

**ALGORITMO PARA CLASIFICACIÓN DE DAÑOS EN PAVIMENTO FLEXIBLE
DE VÍAS URBANAS**

DUVÁN YAHÍR SANABRIA ECHEVERRY

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
ÁREA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA, SANTANDER**

2013

**ALGORITMO PARA CLASIFICACIÓN DE DAÑOS EN PAVIMENTO FLEXIBLE
DE VÍAS URBANAS**

DUVÁN YAHÍR SANABRIA ECHEVERRY

**Trabajo de Investigación para optar el título de
Magíster en Ingeniería de Sistemas e Informática**

Director:

PhD. Hernán Porras Díaz

Codirector:

PhD. Eduardo Alberto Castañeda Pinzón

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
ÁREA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA, SANTANDER
2013**

DEDICATORIA

A DIOS POR AYUDARME A
NO DESFALLECER A PESAR
DE LAS DIFICULTADES Y
PERMITIRME CULMINAR LA
META EMPRENDIDA,

A MIS PADRES POR SU
APOYO INCONDICIONAL, LA
VOZ DE ALIENTO PARA
CONTINUAR ADELANTE Y LA
FÉ EN CADA PASO QUE DOY,

A MIS HERMANOS POR SUS
BUENOS DESEOS, CARISMA
Y A PESAR DE LA DISTANCIA
SIEMPRE ESTUVIERON
ESPIRITUALMENTE
APOYÁNDOME,

A MIS AMIGOS POR SUS
IMPORTANTES APORTES DE
CONOCIMIENTO Y
ENSEÑANZAS.

Y A JOHA POR SU APOYO.

AGRADECIMIENTOS

A mi Dios Todo Poderoso, por permitirme no desfallecer a pesar de las dificultades y ayudarme a subir otro peldaño de mi proyecto de vida.

Al profesor Hernán Porras Díaz director de este proyecto de grado, por el apoyo ofrecido, las enseñanzas inculcadas y el tiempo dedicado.

Al profesor Eduardo Alberto Castañeda Pinzón por el conocimiento transmitido y la asesoría incondicional a lo largo del trabajo de investigación.

A la Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática por la formación académica otorgada.

Al grupo de investigación Geomática, gestión y optimización de sistemas, por la confianza y apoyo que me han otorgado durante el desarrollo del trabajo de investigación y el proyecto de vida.

A mi familia por brindarme apoyo incondicional y ayudarme a superar los obstáculos diariamente.

A mi novia por su apoyo y voz de aliento.

A todos mis amigos por el apoyo mediante las contribuciones personales y profesionales.

A la Universidad Industrial de Santander por la formación integral en el ámbito profesional y humano ofrecida durante la preparación de mi posgrado.

A todas las personas que me apoyaron de alguna manera a la realización del presente proyecto.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	20
1. OBJETIVOS.....	23
1.1. OBJETIVO GENERAL	23
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
2. ESTADO DEL ARTE	24
2.1. SISTEMAS AUTOMÁTICOS EN EL ÁMBITO MUNDIAL	24
2.2. MÉTODOS Y TÉCNICAS APLICANDO PDI.....	25
3. MARCO TEÓRICO	30
3.1. PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.....	30
3.1.1. Adquisición	30
3.1.2. Preprocesamiento	31
3.1.3. Segmentación	39
3.1.4. Representación y descripción	41
3.1.5. Clasificación e interpretación	45
3.2. PAVIMENTO FLEXIBLE O ASFÁLTICO	51
3.2.1. Tipos de daños.....	52
3.3. METODOLOGÍA PARA LA CALIFICACIÓN DEL PAVIMENTO	56
4. CAPTACIÓN DE IMÁGENES DE VÍAS PAVIMENTADAS	59
4.1. SISTEMA SEMIAUTOMÁTICO DE CAPTACIÓN DE IMÁGENES.....	59
4.1.1. Descripción del procedimiento	60
4.2. SISTEMA AUTOMÁTICO DE CAPTACIÓN DE IMÁGENES.....	62
4.2.1. Especificaciones del sistema	62
4.2.2. Características del sistema	63
4.2.3. Implementación del sistema	65
4.2.4. Descripción del procedimiento de captación	69
4.3. CONDICIONES PARA LA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES	70
4.4. GENERADOR DE IMÁGENES CON GRIETAS SINTÉTICAS	71
4.4.1. Codificador	72
4.4.2. Decodificador	72

4.4.3. Generador	73
5. PREPROCESAMIENTO	75
5.1. SUAVIZADO DE LA IMAGEN	75
5.2. AJUSTE DE CONTRASTE Y REMOCIÓN DE OBJETOS NO DESEADOS	76
6. SEGMENTACIÓN	79
6.1. MÉTODOS APLICADOS	79
6.2. PROCESAMIENTO MORFOLÓGICO	81
7. DESCRIPCIÓN	84
7.1. CARACTERIZACIÓN DE GRIETAS	84
7.1.1. Características geométricas	84
7.1.2. Descriptores de forma	86
7.2. INTERPRETACIÓN	87
7.2.1. Eliminación de grietas falsas	87
7.2.2. Conexión de grietas	91
8. CLASIFICACIÓN	95
8.1. REPRESENTACIÓN	95
8.2. <i>TILE PARTITIONING</i>	96
8.3. VECTOR DE CARACTERÍSTICAS	97
8.4. CLASIFICADOR	97
9. CALIFICACIÓN DE GRIETA	104
9.1. PCI	104
9.1.1. LONGITUD DE GRIETA	105
9.1.2. ÁREA Y ANCHO DE GRIETA	107
9.1.3. SEVERIDAD	108
9.1.4. Procedimiento para el cálculo del PCI	109
10. ANÁLISIS DE RESULTADOS	113
10.1. PRUEBAS DE LA DETECCIÓN	113
10.2. PRUEBAS DE LA CLASIFICACIÓN	115
10.3. TIEMPO PROMEDIO DE EJECUCIÓN DE LOS ALGORITMOS	118
10.4. INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO <i>ALFASOFT</i>	120
10.4.1. Descripción de los casos de uso	120

10.4.2. Interfaz gráfica de usuario.....	122
11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	124
BIBLIOGRAFÍA.....	126
ANEXOS.....	134

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Rangos de clasificación	57
Tabla 2. Especificaciones del sistema	63
Tabla 3. Características del sistema	64
Tabla 4. Parámetros de la cámara establecidos en el laboratorio	66
Tabla 5. Características de grietas transversal y longitudinal	89
Tabla 6. Características de grieta diagonal.....	89
Tabla 7. Descriptores de forma.....	90
Tabla 8. Parámetros de la RNA con una capa oculta durante el entrenamiento ...	99
Tabla 9. Parámetros de la RNA con dos capas ocultas durante el entrenamiento	99
Tabla 10. Resultados de las RNA con una capa oculta	101
Tabla 11. Resultados de las RNA con dos capas ocultas.....	103
Tabla 12. Rendimiento de la detección	114
Tabla 13. Detección de grietas	115
Tabla 14. Resultados de prueba para una RNA con una capa oculta	116
Tabla 15. Resultados de prueba para una RNA con dos capas ocultas	117
Tabla 16. Clasificación de grietas en diferentes escenarios	117
Tabla 17. Especificaciones de los equipos de cómputo.....	118
Tabla 18. Tiempos de ejecución	119
Tabla 19. Descripción de los casos de uso.....	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Procedimiento propuesto	29
Figura 2. Clasificación de técnicas y métodos para la mejora de la imagen	32
Figura 3. Negativo de una imagen	33
Figura 4. Mejora de contraste	34
Figura 5. Ecualización del histograma	35
Figura 6. Filtro promedio	36
Figura 7. Efecto del filtro promedio	37
Figura 8. Filtro mediana	37
Figura 9. Efecto del filtrado por mediana	38
Figura 10. Filtrado paso alto	38
Figura 11. Segmentación por el método del umbral	40
Figura 12. Componentes de una red neuronal biológica	46
Figura 13. Neurona artificial	47
Figura 14. Funciones de activación	48
Figura 15. RNA multicapa	49
Figura 16. Métodos de aprendizaje	50
Figura 17. Estructura de pavimento flexible	51
Figura 18. Piel de cocodrilo	53
Figura 19. Grieta de bloque	54
Figura 20. Grieta longitudinal	55
Figura 21. Grieta transversal	56
Figura 22. Sistema para la captación de imágenes	60
Figura 23. Nivel de burbuja	60
Figura 24. Interfaz gráfica para visualizar las imágenes captadas	61
Figura 25. Muestra de las imágenes captadas	62
Figura 26. Esquema del sistema	64
Figura 27. Montaje en laboratorio	66
Figura 28. Montaje del codificador	68
Figura 29. Instalación en la camioneta	69

Figura 30. Muestra de las imágenes captadas	70
Figura 31. Píxel (i,j) de ocho direcciones	71
Figura 32. Muestra de imágenes generadas: (a) Grietas longitudinales, (b) Grieta de bloque	74
Figura 33. Filtro de la mediana	76
Figura 34. Ajuste y remoción de objetos	78
Figura 35. Resultados de los métodos de segmentación	80
Figura 36. Operación morfológica de cierre: (a) Imagen original, (b) Imagen dilatada, (c) imagen erosionada, (d) Imagen resultante	82
Figura 37. Resultado de la operación morfológica de cierre	83
Figura 38. Eje mayor de la elipse circunscrita	85
Figura 39. Rectángulo frontera	85
Figura 40. Orientación	86
Figura 41. Dispersión de la orientación	88
Figura 42. Resultado de la eliminación de grietas falsas	91
Figura 43. Esquema de conexión entre regiones	93
Figura 44. Conexión de grietas	94
Figura 45. Procedimiento para la clasificación	95
Figura 46. Esqueleto de una grieta	95
Figura 47. Matriz de <i>tiles</i>	96
Figura 48. Mejor configuración de la RNA	100
Figura 49. Ancho de grietas longitudinal y transversal	105
Figura 50. Particiones de los esqueletos de grieta	106
Figura 51. Recorrido de un esqueleto	107
Figura 52. Área de una región conexa	108
Figura 53. Condiciones para determinar la severidad	109
Figura 54. Porcentaje de densidad contra valor deducido	110
Figura 55. Deducido total contra deducido corregido	111
Figura 56. IU para calcular el PCI	112
Figura 57. Casos de uso	122
Figura 58. Interfaz gráfica de usuario en el proceso de segmentación	123
Figura 59. Logotipo del programa	147

Figura 60. Ventana principal	147
Figura 61. Opción Abrir imagen	148
Figura 62. Imagen cargada y menús habilitados	148
Figura 63. Formulario para configurar los parámetros iniciales	149
Figura 64. Menú Técnicas	149
Figura 65. Inicio del proceso de detección automática de grietas.....	150
Figura 66. Proceso en la etapa de ajuste de contraste.....	150
Figura 67. Resultado del proceso de detección de grietas	151
Figura 68. Clasificación de grietas	151
Figura 69. Formato PCI	152
Figura 70. Patrón para identificar la zona de visión	156

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. CÓDIGO FUENTE DE LOS ALGORITMOS PROPUESTOS	134
ANEXO B. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA SOFTWARE.....	147
ANEXO C. CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA CÁMARA PIRANHA 2 MEDIANTE EL SOFTWARE XCAP	153
ANEXO D. CALIBRACIÓN DE INTENSIDAD DE LA CÁMARA PIRANHA 2	155
ANEXO E. ADQUISICIONES CON SEÑALES DEL CODIFICADOR RELATIVO	157
ANEXO F. CAPTACIÓN Y GUARDADO DE LAS IMÁGENES CON LA CÁMARA PIRANHA 2.....	159
ANEXO G. REGULACIÓN DE TENSIÓN PARA LA CONEXIÓN DE LOS DISPOSITIVOS.....	161
ANEXO H. INVESTIGACIONES GENERADAS.....	162

GLOSARIO

Acondicionamiento: Etapa del procesamiento digital de imágenes para excluir los objetos que no son útiles, al tiempo de conservar aquellos que en alguna medida se consideren importantes.

Binarización: Procedimiento para convertir una imagen en el formato de color verdadero, o en escala de grises, a un formato de dos tonos (Blanco y Negro) o binaria.

Captación: Etapa del procesamiento digital de imágenes que permite obtener una imagen digital de un objeto. El resultado puede variar, de acuerdo con el proceso de digitalización usado y el método de codificación.

Caracterización: Extracción de características de un objeto en la imagen, de modo que se distinga de los demás.

Clasificación: Separación en diferentes grupos o clases que se definen por una característica intrínseca o patrón. Partición del espacio de características en regiones mutuamente excluyentes [1].

Compacidad: Textura apretada y poco porosa. Describe la densidad de un objeto en la imagen.

Conjunto de aprendizaje: Precisar la existencia de un conjunto de patrones similares que se desea reconocer.

Contraste: Diferencia en la intensidad en un punto de la imagen y su vecindad.

Esqueletización: Consiste en reducir a un grafo la estructura de un objeto en la imagen, que permite contener la menor cantidad de datos posibles, pero conserva el rastro del objeto original.

Excentricidad: Descriptor de forma que establece la relación de la distancia entre los focos de la elipse y la longitud del eje mayor.

Filtrado: Etapa del procesamiento digital de imágenes que permite mejorar las características (contraste, bordes, etc.) de una imagen digital.

Filtro: Transformación de una señal (función de una o varias variables independientes) de entrada mediante una función de transferencia para obtener una señal de salida.

Histograma: Gráfico utilizado para la representación de cada uno de los niveles de color, donde la abscisa representa cada uno de los niveles de color de la imagen, mientras que en la ordenada representa la frecuencia relativa de aparición del nivel de color.

Imagen digital: Representación bidimensional discreta de un objeto, captada mediante un sensor electrónico de una cámara digital y almacenada como un arreglo matricial para que puedan ser procesadas por un computador.

Grieta: Abertura estrecha, larga e irregular, considerada como daño que se genera en vías pavimentadas. En Tratamiento Digital de Imágenes, conjunto de píxeles más oscuros que el fondo, que mantiene una conexión entre sí y una orientación definida.

Grieta de bloque: Grietas interconectadas que dividen el pavimento en pedazos aproximadamente rectangulares.

Grieta longitudinal: Rotura paralela y longitudinal al eje de la carretera.

Grieta piel de cocodrilo: Serie de grietas interconectadas que forman polígonos con ángulos agudos.

Grieta transversal: Se extiende en el pavimento transversalmente en ángulos aproximadamente rectos al eje de la vía.

Nivel de color: Valor asociado con la cantidad de luz detectada por un dispositivo de adquisición. Depende del número de bits empleado; para 8 bits se encuentra entre el intervalo [0, 255].

Pavimento flexible: Capa superficial que recibe las cargas del tránsito vehicular constituida por agregados pétreos tratados con ligantes bituminosos. También denominado pavimento asfáltico.

Reconocimiento: Etapa del procesamiento digital de imágenes que permite distinguir los objetos diferentes de un conjunto predefinido, donde el conjunto se considera dividido en una colección de clases y cada objeto pertenece a alguna clase.

Red neuronal: Conjunto de neuronas interconectadas en forma de red que emula las características y las propiedades de las redes neuronales biológicas.

Segmentación: Etapa del procesamiento digital de imágenes que permiten la separación y la localización de los objetos presentes en una imagen para simplificar la representación. Consiste en agrupar y delimitar la imagen en regiones de interés a partir de atributos homogéneos o características individuales.

Tratamiento digital de imágenes: Conjunto de técnicas que se aplican a las imágenes digitales con el objetivo de mejorar la calidad o facilitar la búsqueda de información [1].

Umbralización: Técnica de segmentación basada en un umbral que consiste en dividir el histograma de la imagen, conservando los píxeles que corresponden al nivel de intensidad del objeto y despreciando aquellos que corresponden al fondo.

Vecindad: Conjunto de píxeles que rodean a un píxel.

RESUMEN

Título: ALGORITMO PARA LA CLASIFICACIÓN DE DAÑOS EN PAVIMENTO FLEXIBLE DE VÍAS URBANAS*

Autor: Duván Yahír Sanabria Echeverry**

Palabras clave: Ajuste de contraste, Características geométricas y descriptores de forma, Clasificación de daños tipo grieta, Detección de grietas, Operaciones morfológicas, Pavimento flexible, Redes neuronales, Procesamiento digital de imágenes.

Descripción: El presente documento muestra el trabajo de investigación realizado en el grupo de investigación Geomática, gestión y optimización de sistemas, en el área de Ingeniería de Pavimentos aplicando técnicas del procesamiento digital de imágenes (PDI), orientada a la clasificación de daños para apoyar la automatización de los procesos relacionados con la inspección de pavimentos. La investigación ha sido enfocada principalmente en la caracterización y detección de grietas en imágenes, y en la clasificación de daños tipo agrietamiento en pavimento flexible usando redes neuronales artificiales, dado que las grietas son el principal tipo de daño en la superficie del pavimento, porque de estas se derivan los demás tipos de deterioros.

En este trabajo, el proceso para la clasificación de grietas inicia con la captación de imágenes mediante los sistemas implementados. Luego a cada imagen captada se aplica el filtro de la mediana, para el suavizado de la imagen; el ajuste de contraste, para hacer uniforme el fondo de la imagen y realzar la grieta; la aplicación de la media y la desviación estándar de los niveles de grises, para segmentar la imagen; la combinación de operadores de morfología matemática, para fusionar separaciones estrechas y rellenar agujeros pequeños; la detección de grietas, usando propiedades geométricas y descriptores de forma; y la aplicación de redes neuronales, para reconocer las grietas en el pavimento asfáltico.

Adicionalmente, se propone un método para cuantificar la extensión y la severidad de las grietas, y con base en la metodología Índice de Condición del Pavimento (PCI, de su sigla en inglés) se califica automáticamente el área de pavimento que abarca la imagen. Por último, se presenta una herramienta *software* que integra los algoritmos propuestos en cada etapa del PDI.

* Trabajo de investigación.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Maestría en Ingeniería de Sistemas e Informática. Director: PhD. Hernán Porras Díaz. Codirector: PhD. Eduardo Alberto Castañeda Pinzón.

ABSTRACT

Title: ALGORITHM FOR PAVEMENT DAMAGES CLASSIFICATION IN URBAN ROADS*

Author: Duván Yahír Sanabria Echeverry**

Keywords: Contrast adjustment, Geometrics features and shape descriptors, Classification of damage type crack, Crack detection, Morphological operations, Flexible pavement, Neural networks, Digital image processing.

Description: This paper shows the research work done in the research group Geomática, gestión y optimización de sistemas, in the area of Pavement Engineering using digital image processing (DIP), oriented classification of damage to support the automation of processes related to pavement inspection. The research has been focused mainly on the characterization and detection of cracks in images, and cracks classification in flexible pavement using neural networks, as cracks are the main type of damage to the road surface, because these are derived from other types of damage.

In this paper, the process for classifying cracks begins with the acquisition of images using the implemented systems. Then for each acquired image is applied median filter for image smoothing; contrast adjustment, to make uniform the background of the image and enhance the crack; applying the mean and standard deviation of gray levels, to segment the image; the combination of mathematical morphology operators to fuse narrow gaps and filling small holes; crack detection, using geometrical properties and shape descriptors; and the application of neural networks to recognize the cracks in the asphalt pavement.

Furthermore, a method to quantify the extent and severity of the damage crack type is proposed, and based on the methodology Pavement Condition Index (PCI) pavement area covering the image is automatically qualified. Finally, a software tool that integrates the algorithms proposed in each stage of the DIP is presented.

* Research work.

** Physical-Mechanics Engineering Faculty. Informatics and Systems Engineering School. Masters in Engineering Systems and Informatics. Director: PhD. Hernán Porras Díaz. Codirector: PhD. Eduardo Alberto Castañeda Pinzón.

INTRODUCCIÓN

Las redes viales de nuestro país fueron construidas durante las últimas décadas para favorecer el desarrollo económico y social de las regiones. Desde entonces estas vías han sido sometidas a un desgaste continuo originado por factores como el tráfico, climáticos, geotécnicos y la baja calidad de la construcción, entre otros. Particularmente en el municipio de Bucaramanga en el año 2010, el 82 % de la red vial presentaba un deterioro severo en su capa de pavimento, ocasionando pérdidas económicas y dificultad en la movilidad del tráfico vehicular.

Esto ha llevado a invertir una cantidad significativa de esfuerzo en la aplicación de métodos para diagnosticar la condición de pavimentos. El método más simple consiste en la inspección visual de pavimentos, llenando formatos a mano; un método que se destaca por ser lento, de altos costos por mano de obra, subjetivo y produce resultados poco fiables [2]. Debido a esto, se han venido implementando a nivel mundial sistemas para captación y análisis de datos, de manera automática o semiautomática, que agilizan los procesos de inspección [3]. El procesamiento digital de imágenes posibilita crear métodos automáticos para la detección de grietas, que permiten apoyar los procesos de la inspección de pavimentos.

Ahora bien, un indicador importante de la condición del pavimento es la aparición de grietas, porque de estas se originan los demás tipos de daños; por tanto, la detección de fisuras en el pavimento es fundamental para la prevención y el mantenimiento de las carreteras. Las grietas de pavimento asfáltico se clasifican en: grieta piel de cocodrilo, grieta de bloque, grieta longitudinal y grieta transversal [4]. Estas se encuentran relacionadas directamente con la inspección y el mantenimiento del deterioro del pavimento [5]. Cabe añadir que, en Bucaramanga

en el 2010 el 38 % de las fallas en la malla vial son de tipo grieta y aproximadamente el 90% del total de la red es pavimento flexible¹.

Las razones anteriores muestran la importancia de detectar, clasificar y cuantificar las grietas en pavimento flexible que constituyen información valiosa para la toma de decisiones relacionada con la gestión del pavimento. Sin embargo, en la práctica, las grietas están desconectadas, presentan ruido y objetos no deseados, lo que causa que los métodos de detección y clasificación fallen. Surge entonces la pregunta que motiva el desarrollo de este trabajo de investigación: ¿Es posible desarrollar un algoritmo que permita detectar y clasificar los daños tipo grieta de pavimento flexible de las vías urbanas del municipio utilizando técnicas de tratamiento digital de imágenes?

La situación descrita permite identificar la necesidad de generar resultados que puedan ser usados en sistemas de gestión de pavimentos, mediante la adquisición de datos captados con una cámara digital de alta resolución y la aplicación de técnicas del tratamiento digital de la información para el desarrollo de algoritmos que permitan realizar la detección, la clasificación y la cuantificación de grietas en pavimentos flexible. Para esto se abarcaron las cinco etapas principales del procesamiento digital de imágenes: adquisición, acondicionamiento, segmentación, descripción y clasificación, donde cada imagen captada y generada fue procesada por medio de los algoritmos implementados, utilizando el entorno de desarrollo de MATLAB.

Este trabajo de investigación muestra el procedimiento propuesto mediante las siguientes secciones: En el Capítulo 1 se presentan los objetivos planteados en la investigación. Luego en el Capítulo 2 se resumen las principales investigaciones, en cuanto a los sistemas de captación y PDI en el ámbito mundial. En el Capítulo 3 se establece el marco teórico relacionado con las etapas del PDI y la definición de los daños en cuestión en el área de la Ingeniería de Pavimentos.

¹ UIS y otros. Modelamiento para la Gestión del Mantenimiento, Rehabilitación y Mejoramiento de Pavimentos Urbanos. Reporte de diagnóstico. Bucaramanga, 2010, p. 12-26.

Posteriormente, en el Capítulo 4 comienza el desarrollo del trabajo de investigación, en este se describen los sistemas semiautomático y automático de captación de imágenes desarrollados en conjunto con el grupo de investigación Geomática, gestión y optimización de sistemas y el algoritmo para generar imágenes con grietas artificiales. En los Capítulos 5 y 6 se presentan los métodos aplicados para el acondicionamiento de la imagen y la segmentación de las grietas del fondo de la imagen junto con el procesamiento morfológico determinado, respectivamente. Consecutivamente, en los Capítulos 7 y 8 se muestra la descripción de las características extraídas y el clasificador de las grietas, respectivamente. Luego, en el Capítulo 9 se presenta la metodología de calificación de daños aplicada en imágenes de pavimento. En el Capítulo 10, se muestra el análisis de los resultados del procedimiento propuesto. Luego se presentan las conclusiones y las recomendaciones. Finalmente, en la sección de Anexos se indican los códigos fuentes de los algoritmos propuestos, la descripción de la herramienta *software* denominada ALFASOFT (Algoritmos para la clasificación de fisuras en pavimento asfáltico) y los procedimientos para la configuración de los dispositivos del sistema de captación implementado.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un algoritmo para clasificación de daños tipo grieta en pavimento flexible de vías urbanas utilizando técnicas de tratamiento digital de imágenes.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Proponer un procedimiento para la adquisición en campo de las imágenes digitales que registran daños tipo grieta en pavimento flexible.
- Caracterizar los daños tipo grieta de pavimento flexible en las imágenes digitales.
- Elaborar un algoritmo que utilice técnicas de tratamiento digital de imágenes para el reconocimiento de grietas en pavimento flexible de las vías urbanas del municipio.
- Desarrollar un algoritmo que clasifique la información segmentada de acuerdo con los patrones de falla establecidos.
- Desarrollar una herramienta que facilite la clasificación de las grietas en pavimento flexible y el cálculo de los diferentes índices de condición de pavimento.
- Validar en diferentes escenarios de falla tipo grieta en pavimento flexible los resultados obtenidos mediante el algoritmo desarrollado y por inspección visual humana.

2. ESTADO DEL ARTE

A continuación, se realiza un resumen de las principales investigaciones, correspondientes a los sistemas automáticos para la captación de imágenes (AICS, de su sigla en inglés) de pavimento y los métodos desarrollados para la segmentación, la conexión, la detección y la clasificación de grietas en vías pavimentadas usando procesamiento digital de imágenes.

2.1. SISTEMAS AUTOMÁTICOS EN EL ÁMBITO MUNDIAL

El sistema *PASCO Roadrecon* fue el primer AICS usado para la captación de imágenes de pavimento. Este sistema usaba una cámara de 35 mm montada en una estructura en la parte delantera de una furgoneta para generar una grabación continua de la superficie del pavimento. Las imágenes se tomaban en la noche con un sistema de iluminación artificial; el vehículo podía conducirse hasta 80 km/h, y la imagen cubría un área de 4,87 m de ancho y hasta 15,24 m de largo, en cuyo caso se analizaban las imágenes de manera visual [6].

A finales de los años ochenta, el consorcio japonés Komatsu diseñó un sistema de adquisición e inspección de daños en las superficies del pavimento, que podía medir simultáneamente las fisuras, el ahuellamiento y el perfil longitudinal. La exactitud de las medidas dependía de la velocidad del vehículo, con una máxima resolución adquirida a 10 km/h. Para medir las fisuras, se usaban imágenes en escala de grises a 8 bits, con una resolución de 1 mm. Aunque el sistema determinaba automáticamente los daños, no los clasificaba por tipo [7].

El primer sistema en usar cámaras de escaneo por línea para adquirir datos fue el *Pavement Condition Evaluation Services* (PCES), de la *Earth Technology Corporation*, a finales de los años ochenta y principio de los noventa. Contaba con cuatro cámaras de 512 píxeles de resolución para realizar una medida de 2,43 m de ancho. Además, realizaba procesamiento de señales digitales en tiempo real para el análisis de las imágenes [3].

Roadware Corporation desarrolló un AICS denominado *Automated Road Analyzer* (ARAN). Este vehículo es capaz de realizar hasta 15 mediciones diferentes en un solo escaneo a velocidades de tráfico. Puede usarse como perfilómetro, captador de video, mapeo móvil o sistema de recolección de datos a gran escala. Este sistema es modular y permite al cliente una configuración específica [8].

El *RoadCrack*, de la compañía australiana CSIRO, es un AICS que incluye cámaras y herramientas de procesamiento de imágenes para detectar, clasificar y hacer un reporte de fisuras en el pavimento. Este sistema es capaz de detectar grietas tan finas como un milímetro de ancho, a una velocidad de hasta 105 km/h, y cuenta con un sistema de iluminación propio [9].

Desde 1999 hasta 2006, Huang y Xu desarrollaron para el Departamento de Transporte de Texas un sistema APSDI (del inglés *automated pavement surface distress inspection*) llamado *VCrack*. El sistema fue diseñado para circular a una velocidad de entre 5 y 112 km/h y caracterizar las grietas en tiempo real. El formato de los datos es compatible con el protocolo del sistema de gestión de pavimento de Texas y AASHTO (del inglés *American Association of State Highway Transportation Officials*). El sistema *VCrack* consiste en una cámara de escaneo por línea con sensor tipo CCD (del inglés *Charge-coupled device*), una tarjeta de captación de imágenes y un computador personal [10].

El sistema *Crackscope* es un proyecto de investigación desarrollado por el Centro de Investigación en Transporte de la Universidad de Texas en Austin. El sistema está compuesto por una cámara de escaneo por línea marca Dalsa, con una resolución de 2048 píxeles, interfaz de comunicación *Gigabit Ethernet* y tasa de datos de hasta 36 kHz, que permite cubrir hasta un ancho de 3,6 m de carril; y un proyector láser lineal para mantener las condiciones de luz uniforme [11].

2.2. MÉTODOS Y TÉCNICAS APLICANDO PDI

Desde la década de los años setenta, diferentes investigadores en el mundo han desarrollado diversos métodos y técnicas para la detección y el reconocimiento de

daños en el pavimento de carreteras con el uso del procesamiento digital de imágenes encaminadas a la inspección de pavimentos mediante sistemas APSDI [10], [12], [13].

Lee y Lee (2002) presentan un sistema de clasificación de grietas que integra tres redes neuronales. Cada red neuronal se basa en los *tiles*² de grieta de la imagen de pavimento. Cada *tile* tiene un tamaño de 40 x 40 píxeles, y la arquitectura de cada red neuronal fue determinada variando el número de capas ocultas, los coeficientes de aprendizaje y el número de épocas. Para el entrenamiento de las redes, utilizaron datos de grietas generados y reales [14].

El Centro de Investigación en Transporte de la Universidad de Texas en Austin creó un algoritmo de procesamiento de imágenes para detectar grietas en el pavimento (2003). Los pasos que sigue el algoritmo son: ecualización de la imagen para uniformar el brillo y el contraste de la imagen; división de la imagen en celdas de 8 x 8 píxeles para localizar las semillas de grieta; filtrado de las semillas, comparando su contraste y su distribución; conexión de semillas, revisando sus direcciones y distribuciones en su vecindad, con base en plantillas predefinidas; conexión de segmentos de grietas, según su distancia y su dirección; remoción de segmentos conectados, que están por debajo del umbral preestablecido, de acuerdo con las directrices del PIMS (del inglés *Pavement Management Information System*) y de AASHTO (del inglés *American Association of State Highway*) [13].

Liu, Xu, Yang, Niu y Pan (2008) plantearon un nuevo enfoque para la conexión y la identificación automática de grietas, basado en la extensión del segmento. El procedimiento comienza aplicando el POSHE (del inglés, *Partially Overlapped Subblock Histogram Equalization*) y un filtro espacial, para mejorar la imagen. Luego, se establecen condiciones basadas en características geométricas para remover el ruido. Posteriormente, para unir las grietas correctas, se analiza la

² Subimágenes o subdivisiones de la imagen en un tamaño específico.

relación entre los dominios conectados respecto a su posición, su distancia y su dirección. Finalmente, basado en las características extraídas, clasifica el dominio conectado en *dirigido* y *no dirigido*, para reconocer los diferentes tipos de grietas [15].

Sun, Salari y Chou (2009) proponen un método para la extracción y la conexión de puntos de ruptura de grietas en imágenes de pavimento. El procedimiento inicia aplicando un filtro no lineal que remueve la intensidad de fondo no uniforme, un umbral adaptativo para la segmentación de la imagen y la operación morfológica de cierre y remoción de puntos aislados. Posteriormente, para la conexión de grietas, el algoritmo comienza buscando el píxel inicial de la grieta, y la recorre hasta el píxel final en las direcciones derecha, arriba y abajo; luego, ubicado en el píxel final, y establecida un área de búsqueda, verifica en la vecindad la presencia de los puntos de ruptura. Por último, el algoritmo traza la línea que conecta los puntos de ruptura, y repite el proceso a toda la imagen hasta no encontrar puntos de ruptura que conectar [16].

Investigadores de la Universidad de Ciencia y Tecnología (2010) en Nanjing, China, proponen un nuevo enfoque para la detección automática de grietas en pavimento, basado en el análisis de texturas y descriptores de forma. El estudio se basa en: a) la matriz de coocurrencia de niveles de gris propuesta por Haralick [17] para extraer las características de textura; los descriptores de forma, compacidad y eje principal, como características invariantes a la traslación para discriminar la iluminación desigual; b) con base en las características extraídas de textura y forma, aplica la técnica de máquinas de soporte vectorial para clasificar como *grieta* o *no grieta* las regiones segmentadas en la imagen [18].

Wang, Sha y Sun proponen un nuevo enfoque del código de la cadena para clasificar las grietas. En primer lugar, se aplica el preprocesamiento de la imagen para remover objetos no deseados y ruido. En segundo lugar, utilizan el método de la máxima entropía para segmentar, y aplican operaciones morfológicas para

afinar las grietas y representar la grieta en forma de esqueleto. Por último, con base en la codificación del código de la cadena, establecen las características estadísticas para clasificar cada tipo de grieta [19].

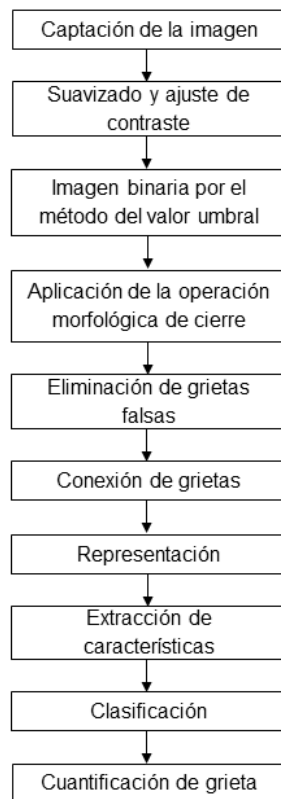
Hong, Salari y Chou (2010), de la Universidad de Toledo, Ohio – Estados Unidos, proponen un algoritmo compuesto de tres fases: detección de grietas por medio de la transformada de Wavelet, la clasificación y la evaluación de grietas por *Domain Mapping*³ usando la transformada Radon. En la detección de grietas se usa la transformada de Wavelet discreta en dos dimensiones, que descompone la imagen de entrada en cuatro subimágenes: la imagen comprimida y las componentes de la imagen en direcciones horizontal, vertical y diagonal. Posteriormente, mediante el *Domain Mapping*, se determinan los picos de las grietas: si están alrededor de los 90°, es una grieta transversal; 0°, es una grieta longitudinal; 135° o 45°, es una grieta diagonal. Para las grietas piel de cocodrilo y bloque, los picos se incrementan a más de cuatro. La separación de este grupo de picos permite identificar este tipo de grietas [20].

Li, Zou y Liu (2011), de la Universidad Wuhan de China, proponen un método para determinar la dirección y la densidad de las grietas como características de distribución espacial de una fisura, y utilizan un modelo de red neuronal para la clasificación de los tipos de grietas. Este método inicia con el hallazgo de los puntos de singularidad, divididos en los siguientes grupos: los puntos finales, presentes en grietas longitudinales y transversales, y los puntos de intersección, presentes en grietas bloque y piel de cocodrilo. Luego se aplica el código de cadena de Freeman de ocho direcciones para determinar la dirección de los puntos de singularidad, que asigna un dígito entre 0 y 7 a la vecindad de cada píxel de grieta. Después, se aplica la técnica de triangulación de Delaunay para analizar la estructura de cada grieta y extraer las características de densidad. Finalmente, con una red neuronal con 60 neuronas ocultas y 2000 épocas, obtiene los mejores resultados para clasificar los tipos de grietas [21].

³ Relación entre el dominio de la transformada de Wavelet y el dominio de la transformada de Radon.

La mayoría de los métodos mencionados anteriormente puede obtener cierta precisión bajo determinadas condiciones de iluminación e imágenes sin ruido. Por tanto, se propone un sistema automático para la captación de imágenes de vías pavimentadas y un método para la clasificación de grietas en imágenes invariante a la iluminación no uniforme y al ruido, que permita clasificar las grietas como transversal, longitudinal, piel de cocodrilo y bloque. Adicionalmente, se cuantifica la extensión y la severidad de los daños tipo grieta y se aplica la metodología *Pavement Condition Index* (PCI). Además, se presenta una herramienta *software* que integra los algoritmos propuestos en cada etapa del PDI. Los pasos del procedimiento se muestran en la Figura 1.

Figura 1. Procedimiento propuesto



3. MARCO TEÓRICO

3.1. PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

Las técnicas para el mejoramiento de una imagen consisten en procesar una imagen para hacerla más adecuada a una determinada aplicación y dependen de su problema específico. El PDI se ocupa básicamente de las siguientes etapas: adquisición, preprocesamiento, segmentación, descripción y clasificación. A continuación, se presenta el marco teórico de las etapas y de las técnicas aplicadas durante la investigación.

3.1.1. Adquisición

En esta etapa, se obtiene una imagen digital con la utilización de dispositivos electrónicos sensibles a la luz visible o en una determinada banda del espectro electromagnético (rayos X, ultravioleta, infrarrojo, etc.), que producen una señal eléctrica proporcional al nivel de energía detectado, y mediante otro dispositivo se convierte esta señal en un formato digital.

La representación digital de una imagen usualmente requiere enormes cantidades de recursos del sistema en forma de memoria. Es por ello que las técnicas en el PDI son de gran importancia para el logro de la máxima eficiencia.

Cabe señalar que el tratamiento concreto en las imágenes dependerá en gran medida de la aplicación a la que vaya dirigido, debido a que no es lo mismo almacenar una imagen y analizar el nivel de intensidad de cada píxel que transmitir imágenes para videoconferencia, cuando no es tan importante la precisión.

A. Características de los dispositivos de captación de imágenes

Los AICS difieren en sus dispositivos de captación de imágenes: estos utilizan cámaras de escaneo por área, cámaras de escaneo por línea y cámaras de

escaneo por línea con TDI (del inglés *Time Delay Integration*⁴). Las características más relevantes son:

- **Tipo de sensor:** Las cámaras utilizan sensores tipo CCD (del inglés *Charge-coupled device*) y CMOS (del inglés *complementary metal-oxide-semiconductor*). Los recientes avances en estas tecnologías han mejorado la sensibilidad a la luz e incrementado la resolución y la tasa de escaneo.
- **Resolución:** Indica el detalle que puede llegar a observarse en una imagen.
- **Interfaz de comunicación:** Existen dos interfaces destacadas: la interfaz *Camera Link*, que requiere una tarjeta de captación de imágenes, pero proporciona un ancho de banda de hasta 5,44 Gb/s, con conexiones punto a punto de hasta 10 m y transferencia de datos dedicada, y la interfaz *Gigabit Ethernet*, con velocidades menores, pero se conecta directamente al computador [22].
- **Tamaño físico del píxel:** Los dispositivos presentan variaciones en su tamaño; deben considerarse el tamaño de la apertura y el espacio entre los píxeles adyacentes.
- **Tamaño de la imagen:** Depende de la capacidad del instrumento, del número máximo de líneas y del número de píxeles por línea.

3.1.2. Preprocesamiento

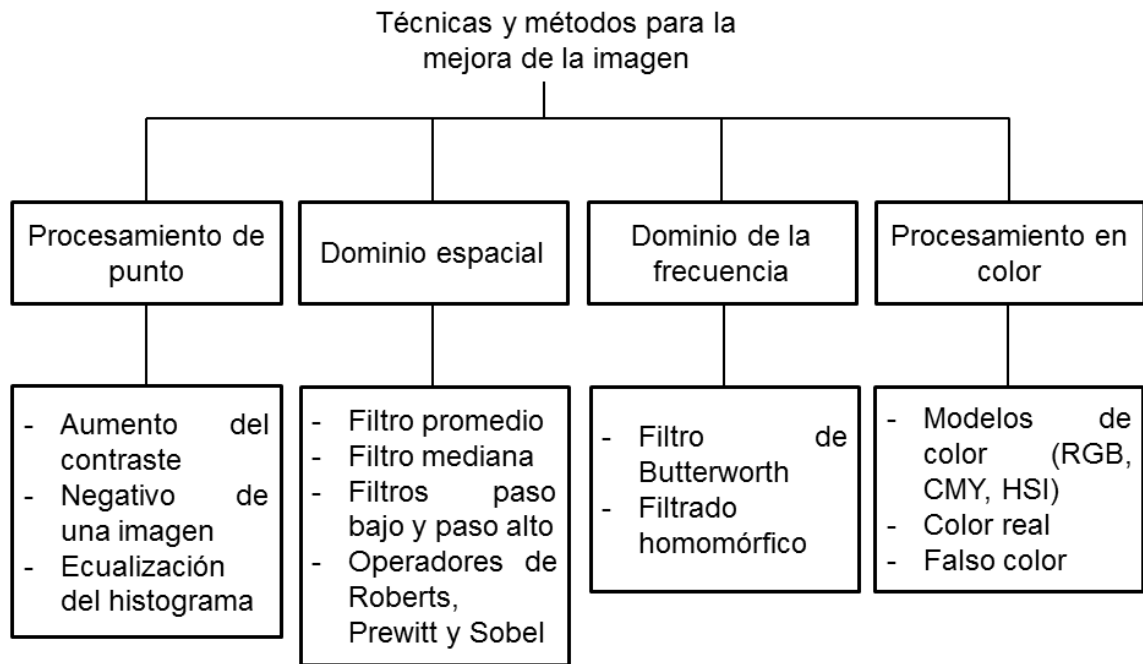
Esta etapa hace referencia a la aplicación de métodos para mejorar la imagen basado en técnicas en el dominio espacial o en el dominio de la frecuencia. El objetivo de esta etapa es aplicar el filtrado para ajustar el contraste y los niveles de gris y suavizar o realzar las características (bordes o contraste) de una imagen.

Las técnicas para mejorar la imagen pueden dividirse en cuatro campos: procesamiento de punto, dominio espacial, dominio de la frecuencia y procesamiento en color. Los primeros se basan en mejorar las intensidades de los

⁴ Tecnología de imágenes para escaneo de objetos en movimiento a alta velocidad para dispositivos con CCD [50].

niveles considerando los píxeles individualmente; el dominio espacial opera con máscaras o filtros espaciales, mientras que el dominio de la frecuencia modifica la transformada de Fourier de la imagen. La Figura 2 muestra los métodos empleados agrupados por las técnicas de filtrado.

Figura 2. Clasificación de técnicas y métodos para la mejora de la imagen



Fuente: GONZÁLEZ, Rafael; WOODS, Richard and EDDINS, Steven. Digital Image Processing Using Matlab. Third Edition. New Jersey: Prentice Hall, 2004, 609 p.

Para la investigación, se abordaron las técnicas del procesamiento por operaciones de punto y en el dominio espacial. Para obtener resultados satisfactorios, se determinaron los criterios experimentalmente.

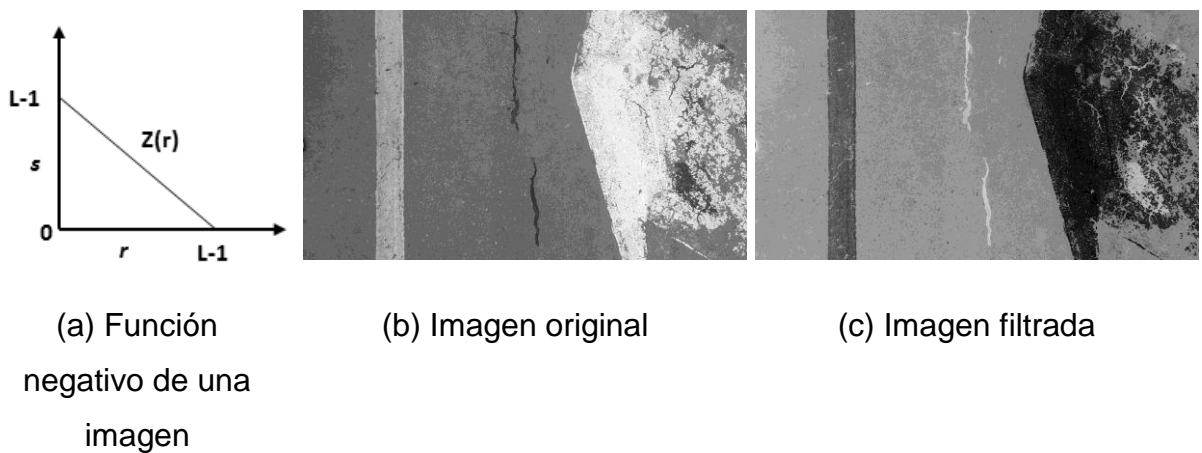
A. Mejora por procesamiento de punto

Entre los más utilizados están: negativos de imágenes, aumento del contraste, compresión del rango dinámico y procesamiento del histograma (ecuilización).

- **Negativo de una imagen**

Consiste en invertir el orden de blanco a negro, de forma que, según el nivel de intensidad de la imagen de entrada aumente, el nivel de salida de la imagen disminuya; es decir, el inverso en la escala de grises de la imagen. Se emplea la función de transformación $s = Z(r)$ a una imagen de pavimento, y se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Negativo de una imagen



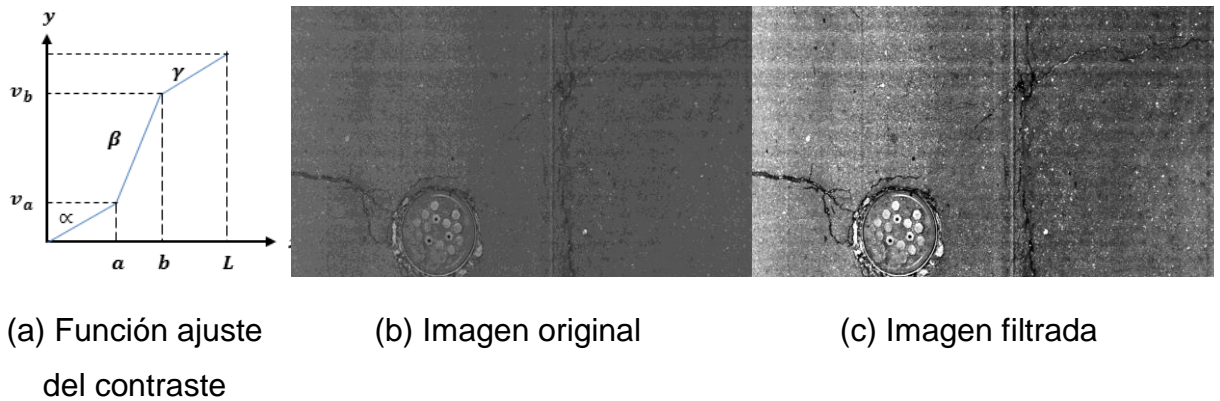
- **Modificación del contraste**

Se aplica cuando una imagen tiene poco contraste, debido a iluminación deficiente, incorrecta selección de la apertura de la lente o rango dinámico pequeño en el sensor. La fórmula general es la siguiente:

$$y = \begin{cases} \alpha x & 0 \leq x < a \\ \beta(x - a) + v_a & a \leq x < b \\ \gamma(x - b) + v_b & b \leq x \leq L \end{cases} \quad (3.1)$$

Donde x, y son los niveles de gris de las imágenes resultantes y original, respectivamente; α, β, γ son las ganancias de cada tramo, y a, b, L son los intervalos de ganancia. La Figura 4 muestra el resultado de aplicar este filtrado a una imagen de pavimento.

Figura 4. Mejora de contraste



- **Compresión del rango dinámico**

En ocasiones, el rango dinámico de una imagen procesada excede la capacidad del dispositivo de visualización, en cuyo caso solo las partes más brillantes de la imagen son visibles en la pantalla. Un método muy efectivo para comprimir el rango dinámico de los valores de los puntos es por medio de la siguiente transformación: ⁵

$$s = c \log(1 + |r|) \quad (3.2)$$

Donde c es un factor de escala y la función logaritmo realiza la compresión deseada.

- **Ecualización del histograma de una imagen en escala de grises**

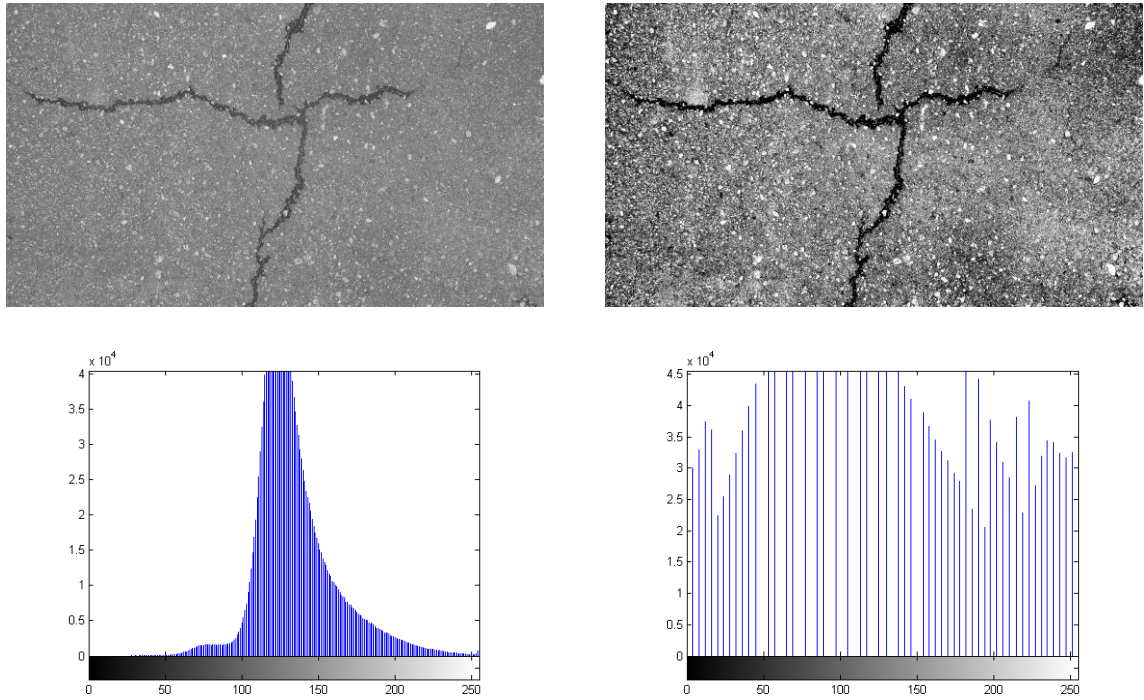
Es el método estadístico para mejorar el contraste de una imagen, que consiste en aplicar una transformación que considera la distribución acumulativa de la imagen original, para repartir de manera uniforme los niveles de grises. Para ecualizar el histograma, se utiliza la siguiente fórmula:

⁵ GONZÁLEZ, Rafael, WOODS, Richard and EDDINS, Steven. Tratamiento digital de imágenes. Delaware: Addison-Wesley/Díaz de Santos, 1996, p. 183

$$S_k = T(r_k) = (L - 1) \sum_{j=0}^k P_r(r_j) = \frac{L - 1}{M * N} \sum_{j=0}^k n_j \quad (3.3)$$

Donde $M * N$ es el tamaño de la imagen, con n_k píxeles para cada nivel r_k , que resulta en una dispersión del histograma en un rango mayor dentro del intervalo $[0, L - 1]$. La Figura 5 muestra el resultado de la ecualización del histograma de una imagen del pavimento.

Figura 5. Ecualización del histograma



(a) Imagen e histograma original

(b) Imagen e histograma ecualizado

B. Mejora en el dominio espacial

Es una operación “local”, en el sentido en que modifica el valor de cada píxel, de acuerdo con los valores de los píxeles que lo rodean. Esta técnica consiste en evaluar el píxel central de un filtro espacial o máscara preestablecida con base en

los píxeles de la vecindad. Esta operación se denomina “convolución bidimensional”.

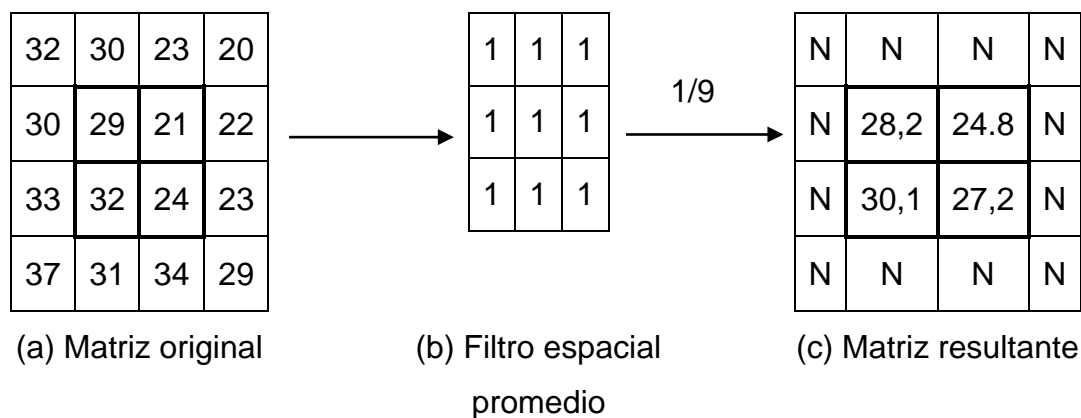
Los filtros espaciales pueden clasificarse según las frecuencias que dejen pasar: paso bajo, paso alto y paso banda. Los componentes de frecuencia baja son las asociadas a cambios suaves de la intensidad en las imágenes, y las altas son las relacionadas con los cambios bruscos, como pueden ser el ruido y los bordes de un objeto. El filtrado paso banda se utiliza fundamentalmente para la restauración de imágenes.

Entre los filtros espaciales más comunes, están: filtro promedio, filtrado por la mediana y filtros diferenciales (operadores de Roberts, Prewitt y Sobel)⁶.

- **Filtro promedio**

Es un promediado del entorno, que consiste en asignar a un píxel el valor promedio de sus vecinos (véase la Figura 6). Es usado para reducir el ruido, aunque se pierde nitidez y la pronunciación de los bordes.

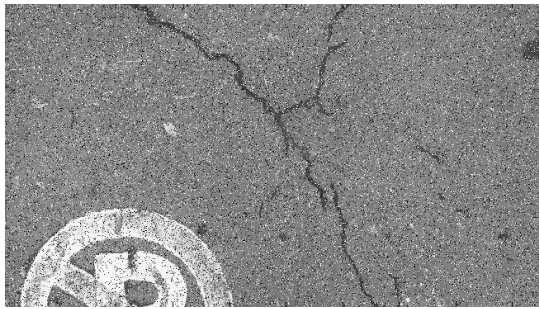
Figura 6. Filtro promedio



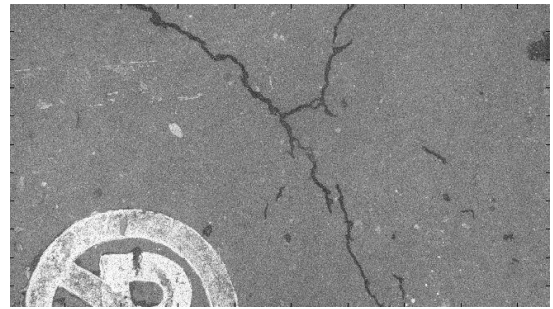
Los valores en los bordes de la imagen no pueden ser filtrados, debido a que carecen de algunos vecinos. La Figura 7 muestra el resultado de aplicar este filtrado a una imagen de pavimento con ruido aleatorio.

⁶ GONZÁLEZ, Rafael C, Op cit., p. 204-218

Figura 7. Efecto del filtro promedio



(a) Imagen con ruido



(b) Imagen filtrada

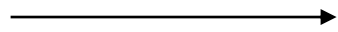
- **Filtrado por la mediana**

Filtrado paso bajo que toma el valor de la mediana de los datos de entrada de la máscara establecida y se lo asigna al píxel central (véase la Figura 8). Para esto, se implementa una matriz cuadrada conocida como máscara, y opera por convolución con la imagen. Este filtro permite disminuir el efecto borroso y la sensibilidad a los valores extremos.

Figura 8. Filtro mediana

7	30	11
8	26	47
16	18	23

(a) Matriz original



7	30	11
8	18	47
16	18	23

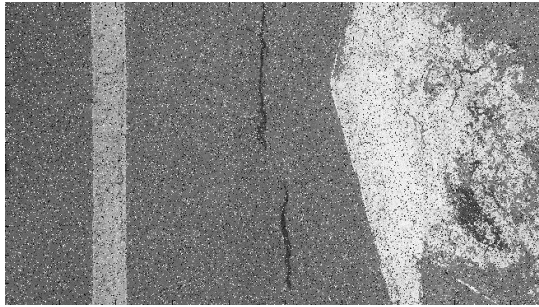
(c) Matriz resultante

7	8	11	16	18	23	26	30	47
---	---	----	----	-----------	----	----	----	----

(b) Filtro espacial mediana

En la Figura 9 se muestra el efecto de aplicar la mediana a una imagen con ruido aleatorio.

Figura 9. Efecto del filtrado por mediana



(a) Imagen con ruido aleatorio



(b) Imagen filtrada

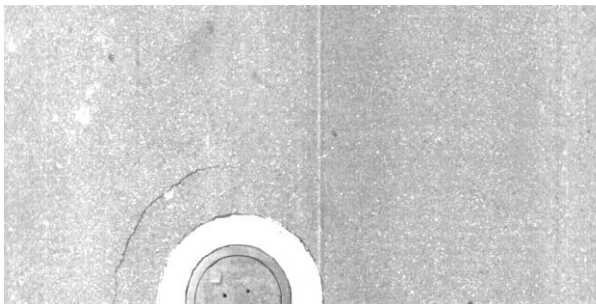
- **Filtros diferenciales**

Se basa en el gradiente de la imagen f en el punto de coordenadas (x, y) , definida como el vector:

$$\nabla f = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Estos filtros típicamente crean una imagen con fondo negro, líneas blancas y negras rodeando los bordes de los objetos y las características de la imagen. La Figura 10 ilustra el resultado de este filtrado.

Figura 10. Filtrado paso alto



(a) Imagen original



(b) Imagen filtrada con el operador de Prewitt

3.1.3. Segmentación

Esta etapa permite separar cada una de las regiones u objetos que componen la imagen. Entre los algoritmos que se utilizan, están: Laplaciano de una función bidimensional, Transformada de Hough, procesamiento global por medio de teoría de grafos y los métodos para el cálculo del umbral. Estos algoritmos producen una imagen de salida donde los objetos se presentan en negro, mientras el fondo se visualiza en blanco. Por ejemplo: en imágenes de pavimento, se dividen las regiones que conforman las grietas y los objetos (hojas y señales horizontales, entre otras), aisladas del fondo o la superficie del pavimento.

Generalmente, la segmentación de imágenes monocromáticas se basa en una de las dos propiedades básicas de los valores del nivel de gris: discontinuidad para la detección de puntos aislados, líneas y bordes; similitud, basados en los métodos del valor umbral, crecimiento de región y división y fusión de regiones⁷.

A. Umbralización

Se emplea cuando hay una clara diferencia entre los objetos que han de extraerse respecto del fondo de la escena. Los principios que rigen son la similitud entre los píxeles pertenecientes a un objeto y sus diferencias respecto al fondo. Los principales problemas que se presentan son las pérdidas de conectividad entre los píxeles que forman el borde y la existencia de falsos bordes por la presencia de ruido.

Al aplicar un umbral T , la imagen en escala de grises $f(x,y)$ se convertirá en binaria; se etiquetan con '1' los píxeles correspondientes al objeto y con '0' aquellos que son del fondo. En este caso, el umbral se define como:

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & \leftrightarrow f(x,y) > T \\ 0 & \leftrightarrow f(x,y) \leq T \end{cases} \quad (3.5)$$

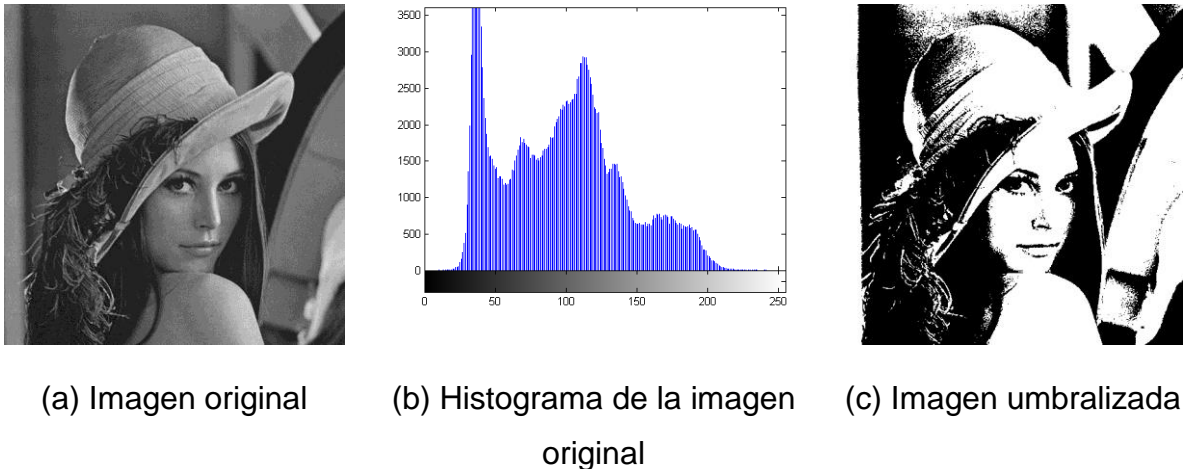
⁷ GONZÁLEZ, Rafael C, Op cit., p. 447

El umbral puede depender de $f(x,y)$, de alguna propiedad local del píxel, $p(x,y)$, y hasta de su propia posición:

$$T = U(f(x,y), p(x,y), x, y) \quad (3.6)$$

Si el umbral solo depende de $f(x,y)$, se dice que es un umbral global; en el caso de que dependa de $p(x,y)$, por ejemplo, el valor medio de los píxeles vecinos, el umbral es denominado local; y si depende también de la posición (x,y) del píxel, se denominará dinámico. La mayoría de las técnicas de umbralización se basan en estadísticas sobre el histograma unidimensional de una imagen. La Figura 11 muestra el resultado de aplicar el método del valor umbral.

Figura 11. Segmentación por el método del umbral



Fuente: GONZÁLEZ, Rafael C. Op cit., p. 494

Existen distintos métodos para determinar el umbral óptimo; por ejemplo, el método iterativo, el de máxima entropía y el método de Otsu. En esta investigación, se aplicó la técnica de umbralización óptima utilizando los valores estadísticos de la media y la desviación estándar de los niveles de grises de la imagen.

B. Crecimiento por regiones

Establece unos píxeles semillas que por su intensidad hacen parte del objeto que ha de segmentarse. Posteriormente, a partir de cada una de estas semillas, se elaboran las regiones conectando tan solo aquellos píxeles que se encuentren dentro de un rango de proximidad al valor semilla, conocido como la tolerancia del método. Los problemas inmediatos son la selección de los generadores iniciales que representen correctamente a las regiones de interés, la selección adecuada de las propiedades para el crecimiento y la formulación de una regla de parada⁸.

C. División y unión de regiones

Parte de la premisa de haber creado las regiones por un método como el de crecimiento por regiones para posteriormente dividir cada región en cuatro regiones. A cada división se le realiza una prueba lógica para determinar si en esa subregión se cumple o no con una condición estipulada de acuerdo con la naturaleza del problema. Si dicha condición se cumple, la subregión no se divide más; de lo contrario, se divide en cuatro nuevas regiones hasta que se cumpla el criterio. Una vez divididas todas las regiones, se procede a conectar las que tienen características semejantes.

3.1.4. Representación y descripción

Esta etapa permite representar una región, lo que implica dos posibilidades:

- a. Hacerlo en términos de sus características externas o su contorno, por ejemplo, la longitud, la orientación, el número de concavidades.
- b. En términos de sus características internas o los píxeles que comprenden la región.

Se elige la representación externa cuando se centra en las características de forma, y una representación interna cuando el principal interés se centra en las propiedades como color y textura. Las características deben ser insensibles a cambios de tamaño, traslación y rotación.

⁸ GONZÁLEZ, Rafael C. Op cit., p. 495

Los esquemas de representación consisten en compactar los datos en representaciones para que sean más útiles en el cálculo de los descriptores. Los métodos de representación son⁹:

- **Códigos de cadena:** Representa un contorno por medio de una sucesión conexa de segmentos de longitud y dirección, normalmente de conectividad 4 u 8. La dirección de cada segmento se codifica con un esquema de numeración.
- **Esqueleto de una región:** La región es reducida a un grafo mediante un algoritmo de reducción o esqueleto. Se define mediante la transformación del eje medio (MAT, del inglés *Medial Axis Transformation*) propuesta por Blum (1997), que consiste en determinar los píxeles equidistantes entre dos puntos del borde de la región.
- **Aproximaciones poligonales:** Busca elaborar un polígono con el menor número de lados posibles, a partir de los puntos de contorno.
- **Firmas:** Se representa el contorno mediante una función unidimensional.

Esta etapa también consiste en describir las características de los objetos presentes en la imagen (contorno y píxeles que comprenden la textura del objeto), para diferenciar las características de las regiones detectadas. Se dividen en las siguientes categorías:

A. Descriptores frontera

- **Descriptores simples o geométricos:** Se utilizan medidas geométricas de la forma del contorno, tales como:
 - Longitud: Número de píxeles conectados en una determinada dirección.
 - Diámetro: Especifica el diámetro de un círculo con la misma área de la región.
 - Área: Número de píxeles dentro de la imagen.

⁹ GONZÁLEZ, Rafael C. Op cit., p. 453

- **Descriptores de forma:** Representación donde los objetos pueden ser diferenciados por su forma. Por ejemplo, para describir la compacidad de una región, se define:

$$C = \frac{2\sqrt{A\pi}}{P} \quad (3.7)$$

Donde A es el área de la región y P es el perímetro o número de píxeles del contorno de la región.

- **Descriptores de Fourier:** Son los coeficientes de una serie de la Transformada Discreta de Fourier, en que las coordenadas de los píxeles son utilizados como números complejos. Su precisión depende del número de coeficientes. Este modelo ha sido utilizado con éxito en la identificación de formas nucleares.

B. Descriptores de región

- **Descriptores topológicos:** Determinan, por ejemplo, el número de huecos H , o la cantidad de componentes conexas C y el número Euler $e = C - H$.
- **Descriptor de textura:** Es utilizado como descriptor de región debido a que proporciona medidas de propiedades, como:
 - Suavizado: Leve diferencia entre los niveles de gris pertenecientes a una misma máscara.
 - Rugosidad: Gran diferencia entre valores de brillo de la vecindad del píxel que ha de tratarse.

Este descriptor utiliza métodos estadísticos, estructurales y espectrales para proporcionar características de texturas. Se basa en la elaboración de la matriz de coocurrencia de niveles de gris (GLCM, del inglés *Gray Level Co-occurrence Matrix*), o matriz de dependencia espacial. Haralick et al.

(1973) propuso catorce descriptores de textura. Algunos se muestran a continuación¹⁰:

- Segundo momento angular

$$f_1 = \sum_i \sum_j \{p(i,j)\}^2 \quad (3.8)$$

- Contraste

$$f_2 = \sum_{n=0}^{N_g-1} n^2 \cdot \left\{ \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} p(i,j) \right\}_{|i-j|=n} \quad (3.9)$$

- Correlación

$$f_3 = \frac{\sum_i \sum_j (i \cdot j) \cdot p(i,j) - \mu_x \cdot \mu_y}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (3.10)$$

- Varianza

$$f_4 = \sum_i \sum_j (i - \mu)^2 \cdot p(i,j) \quad (3.11)$$

Por otra parte, una operación robusta para esta etapa es la morfología matemática, que provee un enfoque para el tratamiento digital de imágenes basado en la forma de los objetos.

C. Morfología matemática

Es útil para simplificar los datos de una imagen que preserve sus características esenciales de forma [1]. En las siguientes operaciones básicas, el conjunto A

¹⁰ HARALICK, Robert M., SHANMUGAM, K. y DISNSTEIN, Textural Features for Image Classification. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics. Vol. SMC 3, no. 6, 1973, p. 610-621.

representa la imagen segmentada, B el elemento estructurante y \emptyset el conjunto vacío.

- **Dilatación:** Hace que los objetos se expandan. La cantidad y la forma dependen del elemento estructurante. Se define como:

$$A \oplus B = \{x | (\hat{B})_x \cap A \neq \emptyset\} \quad (3.12)$$

- **Erosión:** Hace que los objetos se reduzcan. Se define como:

$$A \ominus B = \{x | (\hat{B})_x \subseteq A\} \quad (3.13)$$

- **Apertura:** Consiste en realizar primero una erosión y luego una dilatación, ambas con el mismo elemento estructurante. Suaviza el contorno de los objetos. Se define como:

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (3.14)$$

- **Cierre:** Consiste en realizar una dilatación seguida de una erosión, con el mismo elemento estructurante. Tiende a rellenar agujeros de los objetos y unir objetos cercanos.

$$A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B \quad (3.15)$$

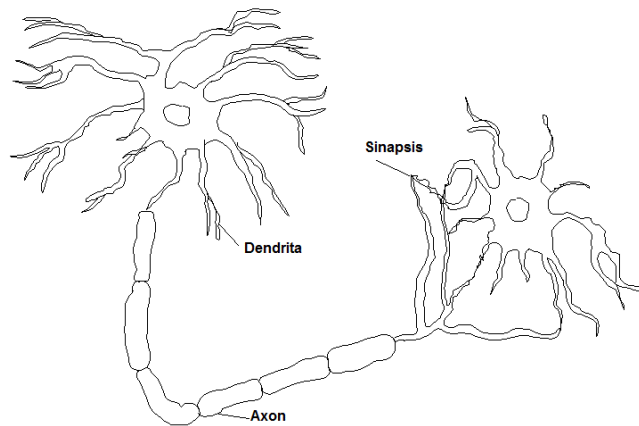
3.1.5. Clasificación e interpretación

Esta última etapa consiste en identificar patrones que permiten clasificar las regiones segmentadas en una clase o categoría. Se denomina reconocimiento de patrones porque se asigna una etiqueta a los objetos, de acuerdo con sus descriptores, lo que permite reconocer e identificar patrones de dichos objetos. Un modelo ampliamente aplicado en la solución de problemas de reconocimiento de grietas es el de las Redes Neuronales [14], [23], [24], [25].

A. Redes neuronales

Para entender las redes neuronales artificiales (RNA), se debe profundizar en cómo funciona una red neuronal biológica (RNB). La RNB consta de un sistema nervioso en que la unidad fundamental es la neurona. Estas neuronas, a su vez, se unen para formar redes (sinapsis), y se componen de un núcleo (axón), que es una ramificación de salida de la neurona, y de un gran número de ramificaciones de entrada llamadas dendritas (véase la Figura 12). Su funcionamiento es el siguiente: las señales de entrada llegan a la neurona a través de la sinapsis, que es la zona de contacto entre neuronas; luego la sinapsis recoge información electroquímica procedente de las células adyacentes, conectadas a la neurona en cuestión, y esta información llega al núcleo de la neurona a través de las dendritas, que la procesan hasta generar una respuesta, posteriormente propagada por el axón.

Figura 12. Componentes de una red neuronal biológica



Fuente: Grupo de circuitos. Universidad Politécnica de Madrid.
<http://www.gc.ssr.upm.es/inves/neural/ann2/concepts/biotype.htm>

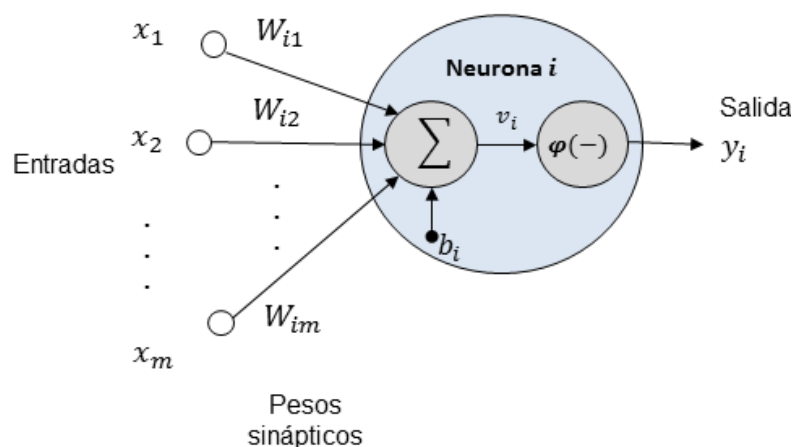
Según la literatura, hay diferentes definiciones de las RNA, como:

- Hassoun (1995) la define como un modelo computacional, paralelo, compuesto de procesadoras adaptativas con una alta interconexión entre ellas.

- Lin (1996) la denomina sistemas de procesamiento de la información que hacen uso de algunos de los principios que organizan la estructura del cerebro.
- Bishop (1996) la describe como una extensión de métodos clásicos estadísticos.
- Chen (1998) la enuncia como modelos matemáticos desarrollados para emular el cerebro humano.

Según lo anterior, existe una variedad de definiciones. Sin embargo, de una manera general, las RNA se definen como el modelo computacional que emula las características y las propiedades de las redes neuronales biológicas. Este modelo consiste en una serie de unidades denominadas neuronas, conectadas entre sí por medio de un peso de ajuste, representado por w_{ij} , en que el primer subíndice i indica la neurona destino y el segundo indica la neurona de origen j . La neurona artificial está formada por un sumador y una función de activación representada por $\varphi(-)$. Esta función debe ser sigmoidea, continua, real, de rango acotado y tener derivada positiva¹¹. La Figura 13 muestra una neurona artificial.

Figura 13. Neurona artificial



Matemáticamente las operaciones son:

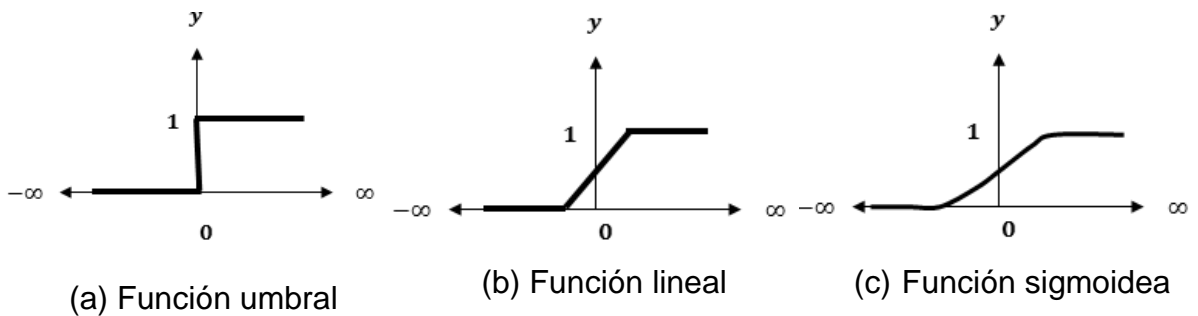
¹¹ LEDESMA, S. Las Redes Neuronales: implementación y consideraciones prácticas. Fifth Mexican International Conference on Artificial Intelligence MICAI.

$$u_i = \sum_{j=1}^m W_{ij}x_j \quad (3.16)$$

$$y_i = \varphi(u_i + b_i) \quad (3.17)$$

Donde x_1, x_2, \dots, x_m son las señales de entrada; $W_{i1}, W_{i2}, \dots, W_{im}$ son los pesos sinápticos; u_i es la salida de la unión lineal de los valores de entrada; b_i es la polarización que tiene el efecto de incrementar o decrecer la entrada a la función de activación; $\varphi(-)$ es la función no lineal de activación, y y_i es la señal de salida de la neurona. Por lo general, se pueden identificar como funciones de activación, el umbral, la lineal a trazos y el *sigmoidal*. La Figura 14 muestra el comportamiento de las funciones mencionadas anteriormente.

Figura 14. Funciones de activación

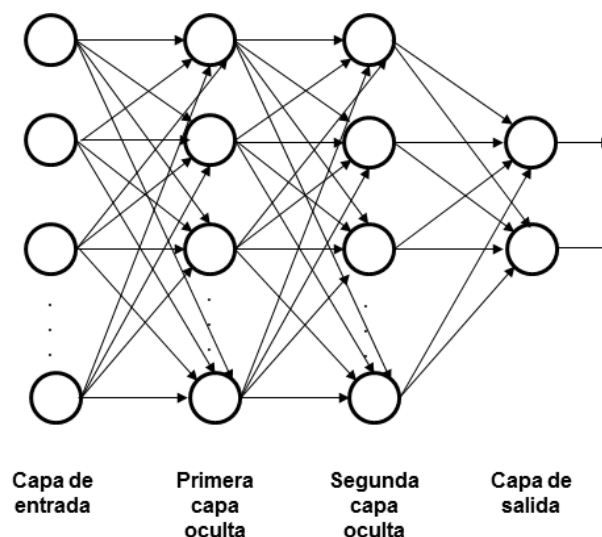


Ahora bien, las neuronas se agrupan en las siguientes capas: capa de entrada, capa de salida y una o varias capas ocultas, donde la información se propaga a través de las conexiones. Las arquitecturas neuronales dependen del número de capas, el tipo de conexiones y el grado de conexión.

- **Redes neuronales multicapa**

Consisten en un conjunto de capas intermedias entre la entrada y la salida, llamadas capas ocultas. Un esquema de una red neuronal multicapa se muestra en la Figura 15.

Figura 15. RNA multicapa



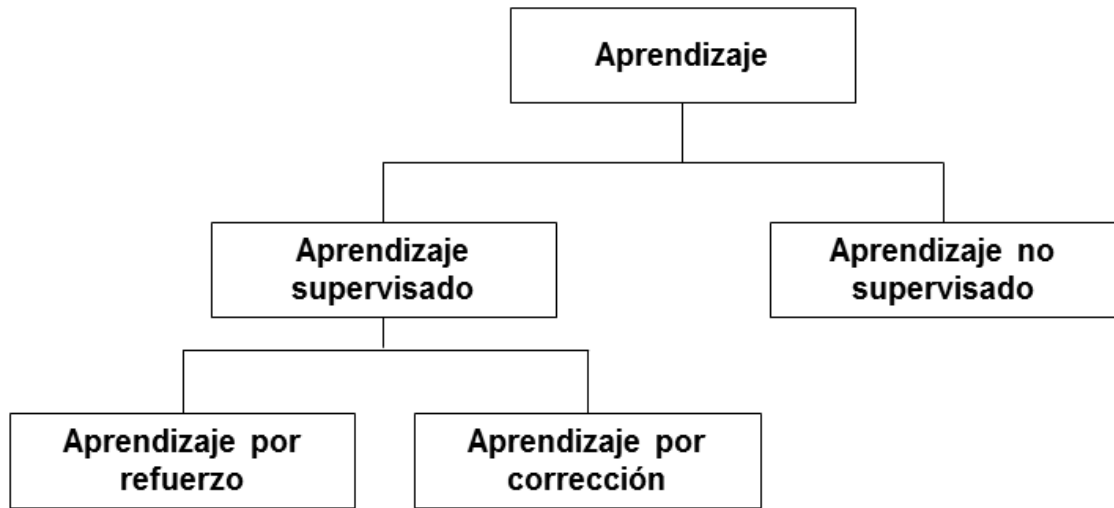
El aprendizaje de la red consiste en hallar los valores precisos de los pesos. Es un proceso de cambio de la ponderación de las entradas mediante el cambio de pesos. Dentro de los tipos de entrenamiento se destacan la de retropropagación (del inglés, *backpropagation*), la regla delta y el aprendizaje de Kohonen. Las reglas de aprendizaje se subdividen en supervisado y no supervisado; el primero permite establecer la relación entre la salida deseada ante una entrada determinada, aprendizaje que admite dos variantes: por refuerzo y por corrección; en cambio, para el aprendizaje no supervisado, la salida es evaluada sin la entrada, por el hecho de que no hay un conocimiento a priori¹² (véase la Figura 16).

En el aprendizaje por refuerzo, solo se conoce si la salida corresponde o no con la señal deseada. En el aprendizaje por corrección, se conoce la magnitud del error y esta determina la magnitud en el cambio de los pesos¹³.

¹² DELGADO A., Efredy. Comparación de Clasificadores de Género: Redes Neuronales, MLP y Teoría de la información. Revista Avances Investigación en Ingeniería No 13. Bogotá: Universidad Libre, enero de 2011. pp. 87 – 97.

¹³ SERRANO, Antonio, SORIA, Emilio y MARTÍN, José. Redes Neuronales Artificiales. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. 2009. pp. 19-20.

Figura 16. Métodos de aprendizaje¹⁴



A continuación, se describe el entrenamiento por retropropagación aplicado en el presente trabajo de investigación.

- **Retropropagación**

Este tipo de redes tiene un método de entrenamiento supervisado, que consiste en presentar un patrón de entrada con un patrón de salida deseada. Luego este algoritmo de entrenamiento realiza una fase de propagación hacia adelante y otra fase hacia atrás. La primera fase inicia cuando se presenta un patrón en la capa de entrada de la red. Cada neurona de la capa de entrada corresponde con un elemento del vector patrón de entrada; estas neuronas, toman el valor de su correspondiente elemento del patrón de entrada, y se calcula el valor de activación o nivel de salida de la primera capa. Posteriormente, las demás capas realizarán la fase de propagación hacia adelante, que determina el nivel de activación de las otras capas. Respecto a la segunda fase de propagación hacia atrás, consiste en la corrección o las modificaciones de todos los pesos de las conexiones; esta fase

¹⁴ SERRANO, Antonio, SORIA, Emilio y MARTÍN, José. Redes Neuronales Artificiales. Valencia, 2009, 145 p. Curso OCW. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Electrónica.

empieza con el ajuste de los pesos por la capa de salida y continúa hacia atrás por medio de las capas de la red hasta la capa de entrada.

Ahora bien, el aprendizaje de la retropropagación mide su convergencia mediante el valor RMS (del inglés, *Root Mean Square*); medida que indica si la red está obteniendo respuestas correctas.

3.2. PAVIMENTO FLEXIBLE O ASFÁLTICO

La estructura de pavimento flexible está conformada por una delgada capa superficial correspondiente a la superficie de rodadura, elaborada sobre una o dos capas de material granular, denominadas base y subbase, que se asientan sobre un suelo de fundación o capa denominada subrasante (véase la Figura 17).

La capa superficial está constituida por agregados pétreos tratados con ligantes bituminosos. Se le denomina pavimento flexible debido a las características viscoelásticas del bitumen, porque las cargas producen deformaciones más altas en comparación con otros tipos de pavimentos¹⁵.

Figura 17. Estructura de pavimento flexible



¹⁵ CAMACHO G., Maryury P. Diseño y Elaboración de Documentación Soporte para las Clases de Diseño de Pavimentos en el Programa de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2008, p. 5-9. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Fisicomecánicas. Área Pavimento.

3.2.1. Tipos de daños

El pavimento asfáltico presenta diferentes tipos de daños, agrupados según su causa en las siguientes categorías: agrietamiento, parcheo y baches, deformación de superficie (ahuellamiento y desplazamiento), defectos de superficie (exudación y desprendimiento, entre otras) y miscelánea de daños. Las características de cada deterioro se describen en el Manual para la identificación de daños, presentado por la Administración Federal de Carreteras (FHWA, de su sigla en inglés) del Departamento de Transporte de los Estados Unidos [4].

Los daños en pavimento flexible que presenta una estructura pueden ser agrupados en cinco categorías:

- A. Grietas o Fisuras
- B. Parcheo y baches
- C. Deformaciones
- D. Defectos de superficie
- E. Miscelánea de daños

Dentro de cada categoría hay diferentes formas de deterioro, que se originan por diversos factores; algunos de ellos se han establecido mediante revisión bibliográfica y otros mediante evaluaciones de campo. Debido al enfoque de este proyecto, se enfatizará en aquellos daños tipo grieta. A continuación, se presenta la definición de las grietas, las causas y las severidades:

- ***Piel de Cocodrilo***

Es una serie de grietas interconectadas. Inicialmente, las grietas se propagan a la superficie como una serie de grietas longitudinales paralelas, lo que se considera un daño estructural. Después de repetidas cargas de tránsito, las grietas se conectan hasta formar polígonos con ángulos agudos que desarrollan un patrón semejante a la piel de cocodrilo. Generalmente, se forman muchas aristas en que

el lado más grande de las piezas no supera los 0,60 m [26]. La Figura 18 muestra este tipo de falla.

Figura 18. Piel de cocodrilo



- **Causas**

Su origen es la falla por fatiga de la capa de rodadura asfáltica bajo acción repetida de las cargas de tránsito. El agrietamiento se inicia en la base estabilizada donde los esfuerzos y las deformaciones unitarias de tensión son mayores bajo la carga de una rueda.

- **Niveles de severidad**

Unidad de Medida: Metros Cuadrados [m^2]

- Bajo: Grietas finas capilares y longitudinales que se desarrollan de forma paralela con unas pocas o ninguna interconectadas. Las grietas no están descascaradas; es decir, no presentan rotura del material a lo largo de los lados de la grieta.
- Medio: Es un patrón o red de grietas que pueden estar ligeramente descascaradas.
- Alto: Patrón de grietas que ha evolucionado de forma que las piezas o los pedazos están bien definidos y descascarados los bordes. Algunos pedazos pueden moverse bajo el tránsito.

- ***Grieta de bloque***

Son grietas interconectadas que dividen el pavimento en pedazos aproximadamente rectangulares. Los bloques pueden variar en tamaño de $0,3 \times 0,3 \text{ m}^2$ a $3,0 \times 3,0 \text{ m}^2$. Este tipo de daño difiere de la piel de cocodrilo en que este forma pedazos más grandes y rectangulares [26]. La Figura 19 muestra este tipo de daño.

Figura 19. Grieta de bloque



• **Causas**

Se originan por la contracción del concreto asfáltico y los ciclos de temperatura diarios. Las grietas en bloque no están asociadas a cargas e indican que el asfalto se ha endurecido significativamente. Normalmente, ocurre sobre una gran porción del pavimento, pero algunas veces aparecerá únicamente en áreas sin tránsito.

• **Niveles de severidad**

Unidad de Medida: Metros Cuadrados [m^2]

- Bajo: Grieta sin relleno de ancho menor que 10 o grieta rellena de cualquier ancho con condición satisfactoria del material llenante.
- Medio: Grieta sin relleno de ancho entre 10 y 76 o grieta sin relleno de cualquier ancho hasta 76, rodeada por grietas aleatorias pequeñas o grieta rellena de cualquier ancho, rodeada de grietas aleatorias pequeñas.

- Alto: Cualquier grieta rellena o no, rodeada de grietas aleatorias pequeñas de severidad media o alta o grieta sin relleno de más de 76 de ancho.

- ***Grieta longitudinal***

Son paralelas al eje del pavimento o a la dirección de construcción. Se extienden a través del pavimento en ángulos aproximadamente rectos a su eje [26]. La Figura 20 muestra este tipo grieta.

Figura 20. Grieta longitudinal



- **Causas**

Resultan porque la junta de carril del pavimento está pobremente construida o debida a bajas temperaturas o al endurecimiento del asfalto o al ciclo diario de temperatura.

- **Niveles de severidad**

Unidad de Medida: Metros [m]

- Bajo: Grieta rellena, de cualquier ancho, con condición satisfactoria del material llenante.
- Medio: Grieta rellena, de cualquier ancho, rodeada de grietas aleatorias pequeñas.
- Alto: Cualquier grieta, rellena o no, rodeada de grietas aleatorias pequeñas de severidad media o alta.

- ***Grieta transversal***

Se extienden en el pavimento en ángulos aproximadamente rectos a la dirección de construcción. La Figura 21 muestra este tipo de agrietamiento.

Figura 21. Grieta transversal



- **Causas**

Usualmente, este tipo de grietas no está asociado con cargas. Resultan porque la junta de carril del pavimento está pobremente construida o debida a bajas temperaturas, al endurecimiento del asfalto o al ciclo diario de temperatura.

- **Niveles de severidad**

Unidad de Medida: Metros [*m*]

- Bajo: Grieta rellena, de cualquier ancho, con condición satisfactoria del material llenante.
- Medio: Grieta rellena, de cualquier ancho, rodeada de grietas aleatorias pequeñas.
- Alto: Cualquier grieta rellena o no, rodeada de grietas aleatorias pequeñas, de severidad media o alta.

3.3. METODOLOGÍA PARA LA CALIFICACIÓN DEL PAVIMENTO

La norma ASTM D6433 *Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys*, más conocida como Índice de Condición del Pavimento (PCI, de su sigla en inglés), se constituye en la metodología más completa para la

calificación objetiva de pavimentos, flexibles y rígidos, dentro de los modelos de Gestión Vial disponibles en la actualidad¹⁶.

El deterioro de la estructura de pavimento es una función de la clase de daño, su severidad y su densidad. La formulación de un índice que tuviese en cuenta los tres factores mencionados ha sido problemática debido al gran número de posibles condiciones. Para superar esta dificultad, se introdujeron los “valores deducidos”, como un arquetipo de 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 [26].

El PCI es un índice numérico que varía desde cero (0), para un pavimento fallado o en mal estado, hasta cien (100), para un pavimento en perfecto estado. El cálculo del PCI se fundamenta en los resultados de un inventario visual de la condición del pavimento en que se establece la clase, la severidad y la cantidad de cada daño. El PCI se desarrolló para obtener un índice de la integridad estructural del pavimento y de la condición operacional de la superficie. En la Tabla 1 se presentan los rangos de PCI con la correspondiente descripción cualitativa de la condición del pavimento.

Tabla 1. Rangos de clasificación

Rango	Clasificación
100-85	Excelente
85-70	Muy Bueno
70-55	Bueno
55-40	Regular
40-25	Malo

¹⁶ ASTM, International. Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. (en línea). Estados Unidos, 2008, 49 p. <http://enterprise1.astm.org/DOWNLOAD/D6433.1210479-1.pdf>

Rango	Clasificación
25-10	Muy Malo
10-0	Fallado

Fuente: VÁSQUEZ V., Luis F. (2002)

4. CAPTACIÓN DE IMÁGENES DE VÍAS PAVIMENTADAS

Las primeras formas de recolectar datos se basan en inspecciones visuales, en las que una comisión de ingenieros se encarga de recorrer las carreteras llenando formatos a mano y siguiendo las instrucciones de un manual específico; un método que se destaca por ser lento, tedioso, subjetivo y peligroso [2], [4], [27]. Debido a esto, se han venido implementando sistemas en otros países para captación y análisis de datos de manera automática o semiautomática, que agilizan los procesos de inspección y disminuyen los tiempos de recolección [9], [10], [11], [13], [28].

En este trabajo de investigación, las imágenes con grietas de pavimento asfáltico fueron captadas por dos sistemas desarrollados con el grupo de investigación Geomática, gestión y optimización de sistemas: uno semiautomático y otro automático. Adicionalmente, se desarrolló un algoritmo generador de imágenes con grietas sintéticas que aplica un nuevo enfoque del código de la cadena de Freeman [21], [29], con el objetivo de verificar la correcta funcionalidad del procedimiento propuesto en imágenes con fondo homogéneo y sin ruido.

4.1. SISTEMA SEMIAUTOMÁTICO DE CAPTACIÓN DE IMÁGENES

Se implementó un sistema semiautomático para la captación de imágenes con el fin de controlar la altura, el ángulo de visión y el área de captación de la cámara. Los elementos que constituyen el sistema son: cámara, nivel de burbuja, trípode y perfiles de aluminio. La Figura 22 muestra el sistema semiautomático empleado para la captación de imágenes. La Figura 23 muestra el nivel de burbuja utilizado.

Figura 22. Sistema para la captación de imágenes



Figura 23. Nivel de burbuja



4.1.1. Descripción del procedimiento

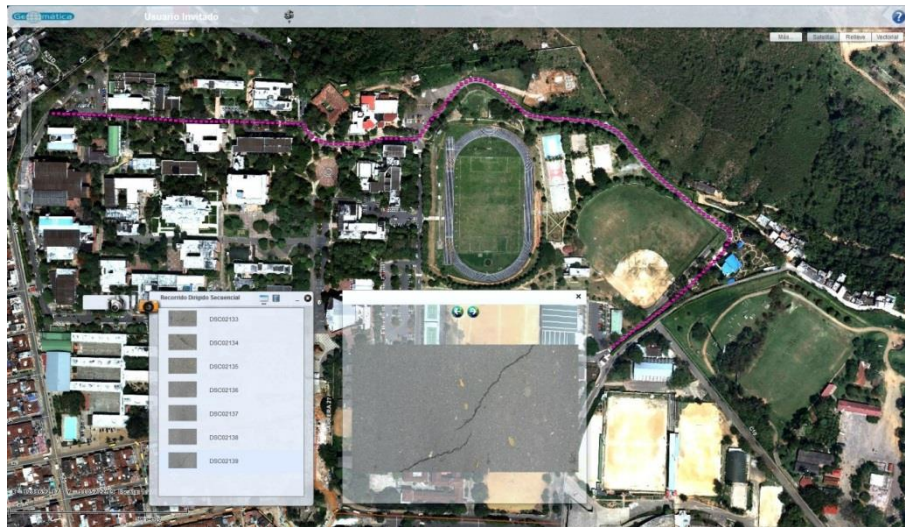
Se instaló una cámara de escaneo por área en un trípode acondicionado. Esta cámara fue la Sony DSC-HX9V, integrada con GPS y configurada con resolución de 1920 x 1080 y representación de color RGB, con profundidad de color de 8 bits; permite ajustar la nitidez, la saturación y el contraste; tiene un sensor tipo CMOS que permite mejorar la sensibilidad, reducir el ruido y obtener imágenes con poca iluminación [30].

La cámara Sony fue fijada a un extremo del brazo adaptado al trípode, y se ubicó en posición perpendicular al pavimento, a una altura de 1,60 m, para alcanzar un detalle de menos de 2 mm/píxel, y su obturación se realizó con la configuración en

modo temporizador. Se utilizó un nivel de burbuja para poner el sistema en la posición horizontal apropiada.

Las imágenes fueron captadas en las vías vehiculares de pavimento asfáltico de la Universidad Industrial de Santander, de manera que el sistema se iba trasladando a la zona previamente detectada con grietas. Se captaron 95 imágenes en formato JPEG, con diferentes tipos de grietas y fondos de textura compleja, y se georreferenciaron utilizando el GPS integrado de la cámara. Estas pueden ser visualizadas accediendo al enlace web <http://garza.uis.edu.co/sig/index.html>, donde se presenta un aplicativo que utiliza la plantilla *ArcG/Viewer* de la empresa ESRI¹⁷ y los mapas base de la ciudad de Bucaramanga suministrados por el grupo de investigación Geomática. En la Figura 24, se muestra la interfaz gráfica de la aplicación web, junto con las imágenes captadas y, en color fucsia, el recorrido realizado.

Figura 24. Interfaz gráfica para visualizar las imágenes captadas



Ahora bien, cada imagen abarca aproximadamente un área de superficie de pavimento de 2,24 m de ancho por 1,26 m de alto. Una muestra de las imágenes digitales captadas con este sistema se muestra en la Figura 25.

¹⁷ *Environmental Systems Research Institute*, empresa que desarrolla y comercializa *software* para sistemas de información geográfica.

Figura 25. Muestra de las imágenes captadas



(a) Grieta transversal

(b) Grieta longitudinal

Para el método propuesto, los daños tipo grieta en la superficie del pavimento son defectos que no necesitan detalles de color; por tanto, las imágenes captadas y generadas se convirtieron a escala de grises para normalizar la diferencia de los valores en la intensidad de los píxeles y reducir el costo computacional de los algoritmos.

4.2. SISTEMA AUTOMÁTICO DE CAPTACIÓN DE IMÁGENES

Uno de los objetivos del grupo de investigación Geomática, gestión y optimización de sistemas, es el desarrollo de sistemas de adquisición de datos que complementen los procesos para la inspección de daños en superficies pavimentadas; por tanto, en conjunto con el grupo, se emprendió la labor de diseñar e implementar un sistema que permita obtener imágenes digitales de estas superficies, a partir de los requerimientos determinados del sistema, la selección adecuada de los equipos de captación y la integración tecnológica para el montaje en un vehículo.

4.2.1. Especificaciones del sistema

Según la literatura, un sistema AICS debe ser capaz de captar grietas finas menores o iguales a 2 mm de ancho en diversas texturas de fondo sobre un carril de 4 m, mientras viaja a velocidad de autopista [9], [10], [11], [13], [28]. La Tabla 2 resume las especificaciones del sistema:

Tabla 2. Especificaciones del sistema

Velocidad del vehículo	0 a 60 km/h
Rango de altura de la cámara	2 a 3 m
Precisión	1 mm
Longitud transversal de escaneo	4 m
Número de cámaras lineales	1
Tasa de datos	160 MHz
Tasa de líneas	36 kHz
Resolución	4096 píxeles
Modo de grabación	Libre/Señal Externa
Capacidad de almacenamiento	Mínimo 160 GB
Procesador	Intel Core i7
Memoria Física [GB]	8
Sistema Operativo	Windows 7 Profesional
Consumo de potencia [W]	99,22

4.2.2. Características del sistema

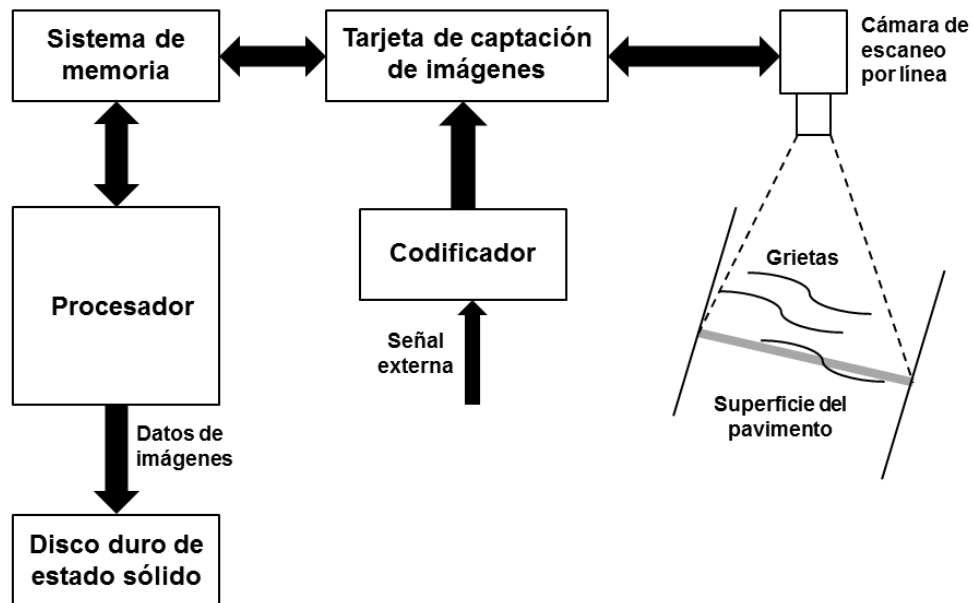
Para cumplir los requisitos determinados del sistema, se seleccionaron algunos dispositivos específicos, teniendo en cuenta sus características y la compatibilidad entre ellos. El sistema general está compuesto por los siguientes elementos:

- Cámara de escaneo por línea Dalsa Piranha 2
- Sistema óptico Distagon de 28 mm
- Tarjeta de captación de imágenes PIXCI EC1 con tecnología *Express Card*
- Codificador rotatorio relativo de 2500 PPR
- Computador *Notebook* robusto Getac B300

- *Software* XCAP Ltd

En la Figura 26, se muestra el esquema de la integración de los elementos que componen el sistema.

Figura 26. Esquema del sistema



Fuente: XU, Bugao, and HUANG, Yaxiong. Automated Pavement Cracking Rating System: A Summary. Report. The University of Texas. Center for Transportation Research. Texas Department of Transportation. Austin, 2003.

La Tabla 3 resume las características del sistema; la selección adecuada de los dispositivos se detalla en [31].

Tabla 3. Características del sistema

Tipo de sensor	CCD Lineal
Interfaz de comunicación	<i>Camera Link</i>
Imagen	Monocromática
Personalización del Formato de Imagen	Sí

Monitorizar imágenes captadas	Sí
Ajustes de configuración	Manual/Automático
Tarjeta de captación	Sí
Codificador rotatorio relativo	Sí
GPS activado	No
Tipo de computador	<i>Notebook</i> robusto
Disco principal	SSD
Almacenamiento removible	Disco Duro USB 3.0
Inversor de potencia	Sí

4.2.3. Implementación del sistema

Para hacer la integración tecnológica entre los dispositivos seleccionados, se tuvieron en cuenta los procedimientos para la configuración de los parámetros iniciales de la cámara *Piranha 2*, la calibración de intensidades, la captación de imágenes a partir de las señales externas generadas por el codificador, la captación y el guardado de las imágenes y la regulación de tensión para la conexión entre los dispositivos, que se detallan en los anexos C, D, E, F y G, respectivamente.

A. Calibración de intensidad de la cámara Piranha 2

El procedimiento de calibración en laboratorio se detalla en el anexo D. La Figura 27 ilustra el montaje en el laboratorio para la calibración, bajo las siguientes condiciones:

- El entorno del laboratorio cuenta con iluminación de luz blanca.
- Se ubicó el lente de la cámara a una distancia de 20 cm respecto a la superficie.

- Para la calibración en blanco, se utilizó una superficie blanca de material acrílico, y la zona de visión fue totalmente iluminada con luz blanca de 550 lm.
- La alimentación de la cámara se hizo por medio de una fuente que suministró 12 V DC, y permitió el consumo de 800 mA.

Figura 27. Montaje en laboratorio



Para el ambiente en el laboratorio, se determinaron los valores que se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de la cámara establecidos en el laboratorio

Parámetros	<i>Tap 1</i> [1 - 1024 píxeles]	<i>Tap 2</i> [1025 -2048 píxeles]	<i>Tap 3</i> [2049 - 3072 píxeles]	<i>Tap 4</i> [3073 - 4096 píxeles]
Ganancia ¹⁸ analógica [dB]	+7,0	+7,0	+7,0	+7,0
Ganancia digital	0	0	0	0

¹⁸ La ganancia incrementa la amplitud de una señal que atraviesa un circuito o material. Mejorar la ganancia analógica permite lograr una mejor relación señal a ruido que al intentar optimizar la ganancia digital.

Parámetros	<i>Tap 1</i> [1 - 1024 píxeles]	<i>Tap 2</i> [1025 -2048 píxeles]	<i>Tap 3</i> [2049 - 3072 píxeles]	<i>Tap 4</i> [3073 - 4096 píxeles]
Ófset ¹⁹ analógico	900	650	650	900
Ófset digital	94	103	68	86
Tasa de líneas [Hz]	5000			
Tiempo de exposición [μs]	199,7			
Número de líneas por muestra	64			
Umbral superior	240			
Umbral inferior	15			
Región de interés [píxeles]	01 - 4096			

B. Adquisiciones con señales del codificador relativo

Para que la tarjeta de captación de imágenes aceptara las señales generadas por el codificador rotatorio, se le adaptaron tres registros que cumplen la función de contar pulsos de entrada (registro INGCC), controlar la frecuencia de captación de líneas (registro INGCR) y contar las líneas de escaneo (registro INGTC), en cuyo caso las señales de entrada a la tarjeta son las salidas *Aa* y *Ba*, señales acondicionadas de las señales *A* y *B* generadas por el codificador rotatorio.

Al hacer funcionar el codificador, el registro INGCC lleva el conteo de las señales de entrada. Cuando este valor sea igual al escrito en los bits [31:3] del registro

¹⁹ Valor de la variable de salida cuando la variable de entrada es nula. Mejorar el ófset analógico permite lograr una mejor relación señal a ruido que al intentar optimizar el ófset digital.

INGCR, aumenta el registro de conteo INGTC, se envía una señal de activación a la cámara para captar una línea, y el registro INGCC se reinicia.

En el caso del registro de conteo actual INGCC, si las señales *Aa* y *Ba* están en la dirección opuesta a la que indica el bit CRC del registro INGC, la cuenta en el registro INGCC disminuye. Por otro lado, existe otra forma de reiniciar el registro INGCC, y es escribiendo 1 en el bit CRR del registro de control. Una vez las imágenes se hayan almacenado en la memoria RAM, puede guardarse la secuencia en el formato deseado por medio de la opción 'guardar secuencia de imágenes' en el menú 'archivo' del *software* XCAP.

C. Montaje en la camioneta

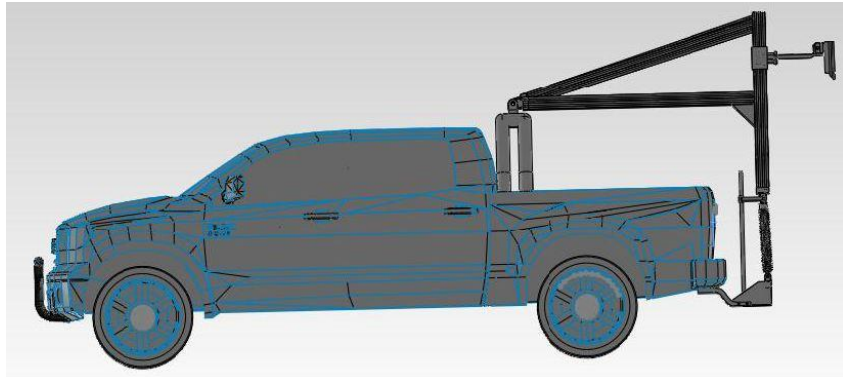
El montaje del sistema Sicaipav se realizó en una camioneta Toyota Hilux 4x4 perteneciente al grupo de investigación. En primer lugar, se instaló un sistema de acople entre el codificador y la llanta trasera derecha de la camioneta. El acople permite que el eje del codificador gire junto con la rueda del vehículo. La Figura 28 muestra este montaje.

Figura 28. Montaje del codificador



Los AICS cuentan con diferentes configuraciones de estructuras para su montaje, de acuerdo con el vehículo de inspección utilizado. Teniendo en cuenta los requerimientos y la estabilidad del sistema, se realizó el diseño y la instalación que se muestran en la Figura 29 (a) y (b), respectivamente.

Figura 29. Instalación en la camioneta



(a) Diseño



(b) Montaje

4.2.4. Descripción del procedimiento de captación

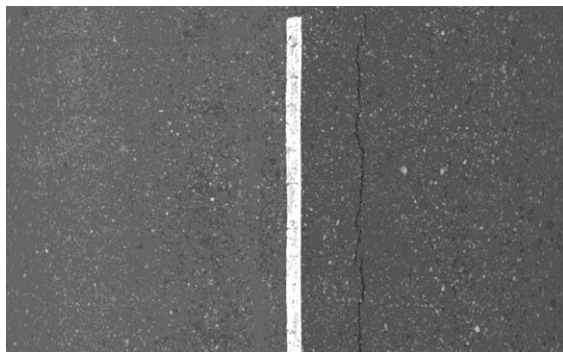
Se instaló una cámara de escaneo por línea en la estructura diseñada. Esta cámara fue la Piranha 2 4k, configurada con resolución de 4096 x 2048 y monocromática, con profundidad de color de 8 bits; con un sensor tipo CCD que según los recientes avances de esta tecnología mejora la sensibilidad e incrementa la resolución y la tasa de escaneo [32].

La cámara Piranha fue fijada en la parte superior de la estructura, y se ubicó en posición perpendicular al pavimento, a una altura de 2,8 m, para alcanzar un

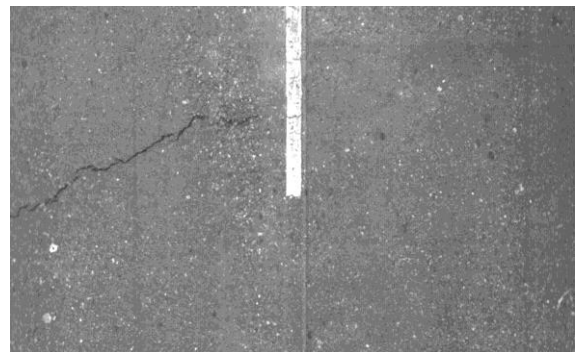
detalle de aproximadamente 1 mm/píxel, y su obturación se realizó con la señal externa emitida por el codificador rotativo acoplada a la llanta del vehículo, sincronizada mediante el *software* XCAP.

Mediante el sistema automático, se captaron las imágenes en las vías vehiculares de pavimento asfáltico de la Universidad Industrial de Santander y en una zona urbana de la ciudad de Bucaramanga. En total se captaron 2828 imágenes en formato JPEG, con diferentes tipos de grietas y variación de contraste, de un recorrido aproximado de 6,6 km. Cada imagen tiene una resolución de 4096 x 2048 píxeles, que abarca aproximadamente un área de superficie de pavimento de 4,096 m de ancho por 2,048 m de alto. Una muestra de las imágenes digitales captadas con este sistema puede verse en la Figura 30.

Figura 30. Muestra de las imágenes captadas



(a) Con señal horizontal y grieta longitudinal



(b) Con señal horizontal y grieta transversal

4.3. CONDICIONES PARA LA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

Con base en las especificaciones estipuladas por *Austroads*²⁰ para la captación de imágenes satisfactorias en vías pavimentadas, se aplicaron las siguientes condiciones [33]:

- Captación de la imagen perpendicular a la superficie del pavimento.

²⁰ Asociación de Australia y Nueva Zelanda en transporte de carreteras y autoridades de tráfico.

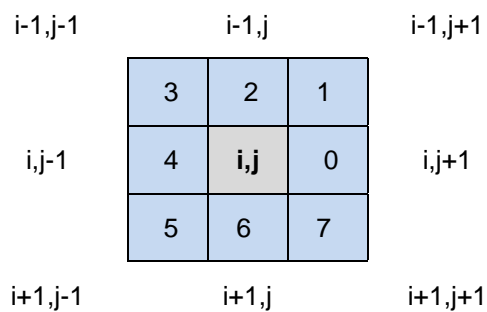
- Resolución de las imágenes mayor o igual a 1280 x 960 píxeles.
- Para reducir el reflejo de la luz solar, el ángulo del sol respecto al eje de la cámara debe ser mayor que 90° y el ángulo de elevación del sol debe ser 40°.
- La carretera debe estar preferiblemente seca.
- Calibración de las cámaras de escaneo.
- Escaneo progresivo.
- Definición a priori del rango de visión y la precisión de la imagen.
- Georreferenciación de las imágenes con sistema de posicionamiento global.

4.4. GENERADOR DE IMÁGENES CON GRIETAS SINTÉTICAS

El algoritmo propone un enfoque para generar imágenes en escala de grises con grietas sintéticas aplicando el código de ocho direcciones de Freeman [29]. Se basa en las directrices y en las características de los tipos de grieta descritas en el catálogo de deterioros de pavimento flexibles del Consejo de Directores de Carreteras de Iberoamérica (Mahbub et al., 2002) y el manual de daños en pavimento de la FHWA (del inglés, *Federal Highway Administration*) [4], [34].

El método consiste en aplicar el código de ocho direcciones de Freeman, que asigna valores de 0 a 7 a la vecindad de un píxel, como se muestra en la Figura 31.

Figura 31. Píxel (i,j) de ocho direcciones



A continuación, se describen las etapas para generar aleatoriamente grietas longitudinales, transversales, bloque y piel de cocodrilo de diferentes tipo, longitud y grosor.

4.4.1. Codificador

En esta etapa se genera la codificación para representar el esqueleto y el sentido de las grietas transversales o longitudinales. Los pasos son:

- I. Se generan aleatoriamente valores entre 0 y 7 hasta una cantidad máxima aleatoria entre 100, y la longitud máxima de la imagen en píxeles.
- II. Si el valor generado pertenece al conjunto $ft[0, 1, 2, 6, 7]$, entonces para cada $Ft(i)$ con $i = 1, 2, 3 \dots n$, donde n es la longitud del vector y Ft es la codificación para una grieta en sentido trasversal.
- III. Si el valor generado pertenece al conjunto $fl[4, 5, 6, 7, 0]$, entonces para cada $Fl(i)$ con $i = 1, 2, 3 \dots n$, donde n es la longitud del vector y Fl es la codificación para una grieta en sentido longitudinal.

Para generar las grietas de piel de cocodrilo y bloque, se realiza la combinación de codificaciones, teniendo en cuenta que en la realidad estas grietas forman rectángulos interconectados que se diferencian en su separación, con tamaños de 0,1 a 0,3 m y 0,1 a 2 m de lado [4], respectivamente.

4.4.2. Decodificador

Se asigna una dirección a cada píxel de grieta con un nivel de gris igual a 255, de la siguiente manera:

- I. Generar aleatoriamente una semilla o píxel inicial P .
- II. Para cada $Ft(i)$ se determina una dirección teniendo en cuenta el valor que se encuentra en la posición i – ésima del vector $Ft(i)$.
- III. Si $Ft(i) = 0$, se dibuja el píxel a la derecha de P .
- IV. Si $Ft(i) = 1$, se dibuja el píxel en la parte superior derecha de P .
- V. Si $Ft(i) = 2$, se dibuja el píxel en la parte superior de P .

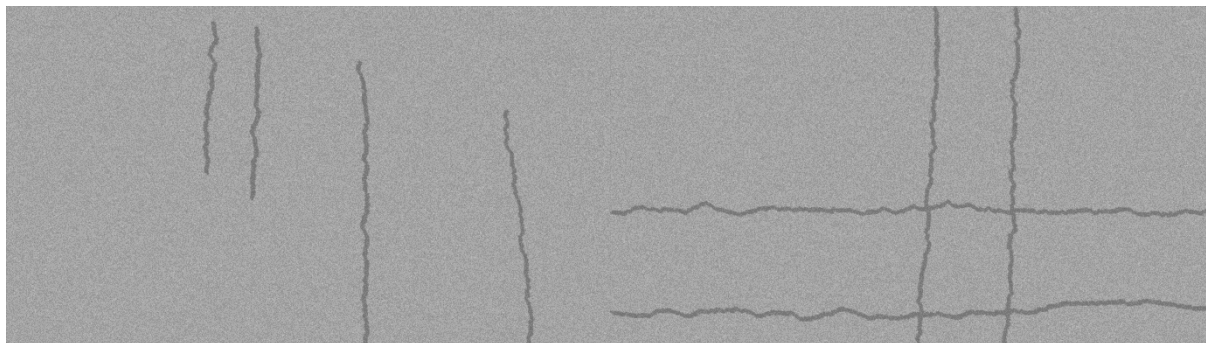
- VI. Si $Ft(i) = 6$, se dibuja el píxel en la parte inferior de P .
- VII. Si $Ft(i) = 7$, se dibuja el píxel en la parte inferior izquierda de P .
- VIII. Para cada $Fl(i)$ se determina una dirección teniendo en cuenta el valor que se encuentra en la posición i – ésima del vector $Fl(i)$.
- IX. Si $Fl(i) = 4$, se dibuja el píxel a la izquierda de P .
- X. Si $Fl(i) = 5$, se dibuja el píxel en la parte inferior izquierda de P .
- XI. Si $Fl(i) = 6$, se dibuja el píxel en la parte inferior de P .
- XII. Si $Fl(i) = 7$, se dibuja el píxel en la parte inferior derecha de P .
- XIII. Si $Fl(i) = 0$, se dibuja el píxel a la derecha de P .

4.4.3. Generador

En primer lugar, se determina el grosor aleatoriamente para cada grieta en un rango entre 3 y 12 mm [27], tomando como base una precisión de $1 \frac{mm}{pixel}$. En segundo lugar, a los píxeles de fondo se les asigna un valor aleatorio entre 130 y 200 niveles de grises. Por último, a las imágenes generadas se les aplica el suavizado de la mediana para realzar las grietas y reducir el ruido.

Finalmente, se generaron 50 imágenes de cada tipo de grieta con fondo parecido al pavimento asfáltico, para un total de 200 imágenes artificiales en escala de grises, con tamaño igual a 1920 x 1080. La Figura 32 (a) y (b), muestra imágenes artificiales con grietas longitudinales y de bloque, respectivamente. Ambas fueron generadas en escala de grises, y se considera que la zona de análisis es el tamaño de la imagen.

Figura 32. Muestra de imágenes generadas: (a) Grietas longitudinales, (b) Grieta de bloque de bloque



(a) Grietas longitudinales

(b) Grieta de bloque

5. PREPROCESAMIENTO

Las imágenes de pavimento presentan ruido y objetos no deseados por causa de escombros y variabilidad de la iluminación. Por tanto, a continuación, se aplican las técnicas para el suavizado de la imagen, el ajuste de intensidades y la remoción de objetos no deseados, con el objetivo de corregir estos defectos.

5.1. SUAVIZADO DE LA IMAGEN

Las imágenes de pavimento presentan un ruido similar al *salt and pepper*, causado principalmente por el dispositivo de captación. Además, la textura que tiene la superficie de pavimento asfáltico se asemeja a este tipo de ruido. Para minimizar este ruido, se aplicaron los filtros paso bajo de la media y la mediana, cuyo resultados satisfactorios fueron mejores con el último.

El filtro de la mediana mejora la continuidad de las grietas y filtra el ruido aleatorio que se presenta en el fondo. Un inconveniente se observó en la operación de filtrado: las regiones de grieta débiles o que tienen una escasa continuidad son afectados por el filtro de mediana y se presenta que algunos pequeños segmentos de las regiones de grieta son filtrados. Sin embargo, el rendimiento global de esta operación fue satisfactoria debido a que la pérdida de los segmentos de las regiones de grietas es insignificante y no es realista esperar que cualquier método de filtrado pueda producir un resultado perfecto.

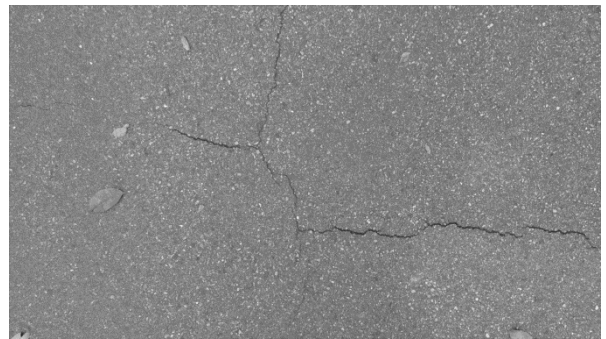
Por las razones anteriores, se aplica el filtro de la mediana para retirar el ruido de la imagen que se asemeja al ruido *salt and pepper* originado por la superficie del pavimento y el dispositivo electrónico. Además, según la literatura, el filtro de la mediana comparado con otros filtros obtiene resultados satisfactorios, esto debido a que realza la grieta, reduce el ruido y la sensibilidad a valores extremos [19], [35], [36].

Para determinar la máscara que ha de utilizarse para el filtro de la mediana, se comparó el comportamiento de máscaras de tamaño 3 x 3, 5 x 5, 7 x 7 y 9 x 9, y se estableció que la máscara 3 x 3 no reduce detalles de grieta, mientras que las máscaras mayores o iguales a 5 x 5 generan pérdidas en el contorno de las fisuras y borrosidad en la imagen; por tanto, en este trabajo se aplicó el filtro de la mediana con una máscara de 3 x 3. La Figura 33 muestra una comparación del filtro de la mediana con diferentes máscaras.

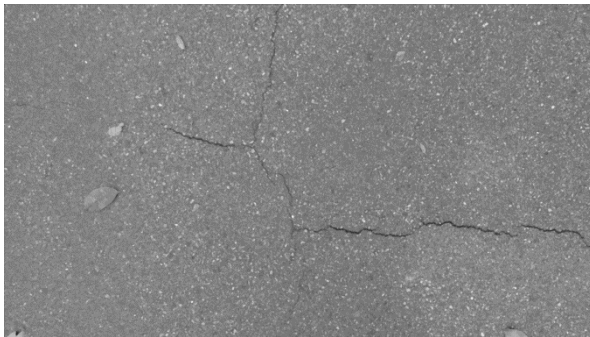
Figura 33. Filtro de la mediana



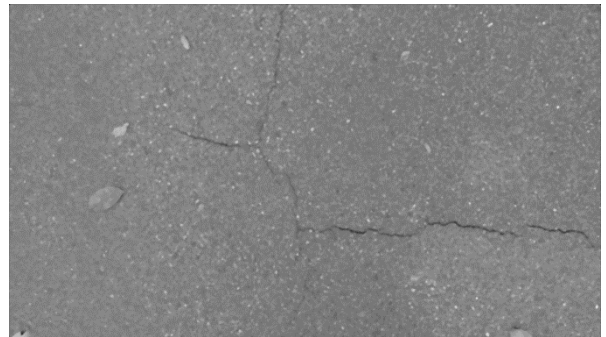
(a) Imagen original



(b) Aplicando máscara 3 x 3



(c) Aplicando máscara 5 x 5



(d) Aplicando máscara 9 x 9

5.2. AJUSTE DE CONTRASTE Y REMOCIÓN DE OBJETOS NO DESEADOS

La iluminación no uniforme y los objetos no deseados sobre la superficie del pavimento asfáltico, principalmente debido a sombras, señales horizontales y

escombros, causa que los algoritmos de acondicionamiento y segmentación de la imagen fallen. Estas etapas son cruciales para obtener buenos resultados en la detección de grietas y extracción de características; por tanto, una vez aplicado el suavizado de la imagen, se requiere aplicar un algoritmo que permita mejorar el contraste de la imagen entre las grietas y el fondo de la superficie del pavimento.

H. Zhou et al. (2010), basado en el estudio de (Ying, 2009), propone un método para mejorar la imagen de pavimento, y que sea invariante a la iluminación, sin descartar detalles de grieta. Para este trabajo de investigación, el algoritmo implementado es una adaptación del descrito por Ying (2009) [37].

La imagen de pavimento está compuesta por la intensidad del fondo, de la grieta y del ruido. El enfoque es hacer uniforme la intensidad de fondo de la imagen para resaltar las grietas. El algoritmo consiste en convertir la intensidad del fondo en una constante A , cuyo valor asignado es la media de los niveles de grises de la imagen. Aplicando el concepto *tile partitioning*²¹, cada imagen es dividida en ventanas de 120 x 120 píxeles, y en cada una de ellas se calcula la media ($G_{m,i}$), el valor máximo ($G_{máx_i}$) y el valor mínimo ($G_{mín_i}$) de las intensidades. Posteriormente, para cada ventana i -ésima, se calculan los límites superior $L_{sup,i}$ e inferior $L_{inf,i}$ [37].

$$L_{sup,i} = G_{m,i} + (k)(G_{máx_i} - G_{m,i}) \quad (5.1)$$

$$L_{inf,i} = G_{m,i} - (k)(G_{m,i} - G_{mín_i}) \quad (5.2)$$

Donde k es una constante, cuyo valor asignado fue 0,6. Luego, para cada ventana, se calcula la media modificada $G'_{m,i}$ de los niveles de gris que se encuentran en el intervalo establecido por los límites superior e inferior. Luego, se calcula el factor de ajuste f_i . Los píxeles con niveles de gris que se encuentren por

²¹ Subdividir la imagen en ventanas o subimágenes de igual tamaño.

fuera del intervalo son considerados puntos sospechosos de ruido y otros objetos de la vía [38].

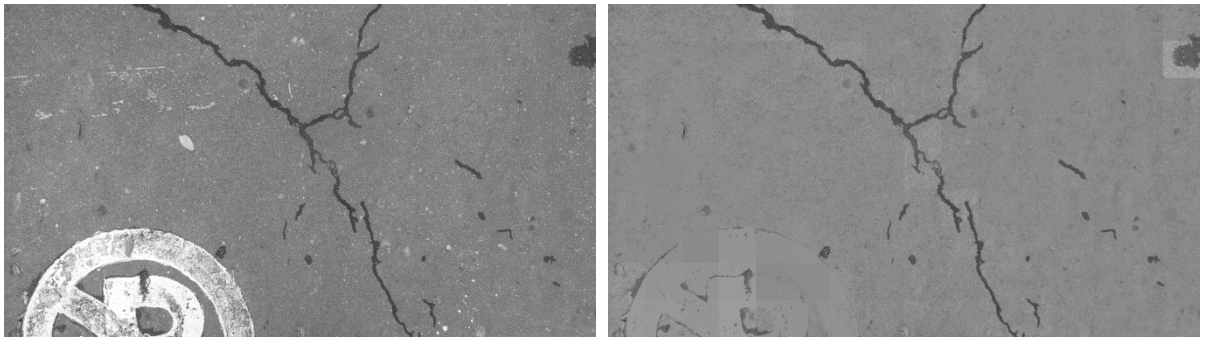
$$f_i = \frac{A}{G'_{m,i}} \quad (5.3)$$

Finalmente, todos los píxeles de cada ventana se amplifican por el factor f_i , excepto aquellos cuya intensidad sea mayor o igual a la constante A . El resultado es una imagen completamente modificada por cada ventana amplificada [38].

$$G'_i = \begin{cases} (G_i)(f_i) & \leftrightarrow G_i < A \\ A & \leftrightarrow G_i \geq A \end{cases} \quad (5.4)$$

El resultado de esta operación se muestra en la Figura 34 (b).

Figura 34. Ajuste y remoción de objetos



(a) Imagen original en escala de grises

(b) Imagen procesada

El código fuente de este algoritmo se encuentra en el apartado C del anexo A.

6. SEGMENTACIÓN

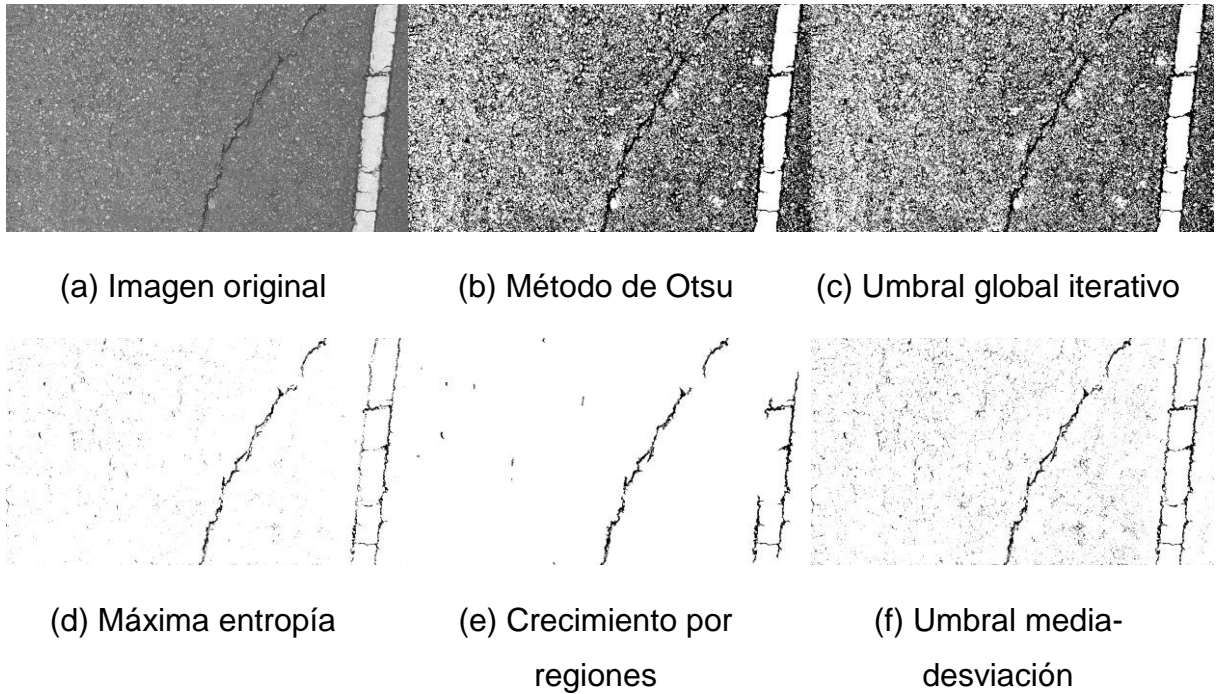
La segmentación de las grietas es considerada por varios autores como la etapa crucial para obtener buenos resultados en la detección y la clasificación de grietas. En esta etapa se desarrollaron varios algoritmos que aplican los métodos de segmentación presentes en la literatura, y los resultados de las imágenes adquiridas se compararon entre sí, para posteriormente optar por el método más apropiado.

6.1. MÉTODOS APLICADOS

Generalmente, los utilizados para la segmentación de daños en imágenes de pavimento son: el método de Otsu (1979), el umbral global iterativo, la máxima entropía, el crecimiento por regiones y el propuesto por Li y Liu (2008) mencionado como NDHM (del inglés *Neighboring Difference Histogram Method*), entre otros [6], [15], [19], [38], [39]. Sin embargo, algunos de estos descartan detalles de grieta cuando la imagen presenta iluminación no uniforme por sombras. Otro método de segmentación es el propuesto por Puan et al. (1998), que utiliza la media y la desviación estándar de los valores de intensidad de la imagen en escala de grises como parámetros base para calcular el umbral [40].

Para determinar el método de segmentación apropiado, se compararon los resultados obtenidos por cada uno de los métodos mencionados anteriormente. La Figura 35 muestra los resultados obtenidos por cada uno de los métodos en cuestión.

Figura 35. Resultados de los métodos de segmentación



Se optó por el método que utiliza la media y la desviación estándar, porque de forma experimental con las imágenes captadas el procedimiento propuesto es invariante a la iluminación no uniforme y al ruido, y no se descartan detalles de grieta indispensables. Adicionalmente, según la literatura [38], [40], este método ha sido aplicado en la segmentación de daños en imágenes de pavimentos y se han obtenido buenos resultados. La Figura 35 (f) muestra el resultado del método seleccionado.

Este método consiste en utilizar la media y la desviación estándar como parámetros base para calcular el umbral apropiado, y divide la imagen en dos categorías: la región de estudio y el fondo. El umbral es calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$T = \bar{G} - B * S \quad (6.1)$$

Donde T es el umbral calculado, \bar{G} es la media, S es la desviación estándar y B es una constante en la que el valor asignado fue 1,6. Cuando el valor de B es menor que 1,6, aparece demasiado ruido, y si es mayor que 2,2, algunas grietas cortas y delgadas son descartadas [38]. Finalmente, teniendo en cuenta el umbral calculado, se aplica la siguiente ecuación para obtener la imagen binaria:

$$I(i,j)' = \begin{cases} 0 & \leftrightarrow I(i,j) < T \\ 1 & \leftrightarrow I(i,j) \geq T \end{cases} \quad (6.2)$$

En el apartado D del anexo A se detalla el código fuente de este algoritmo desarrollado.

6.2. PROCESAMIENTO MORFOLÓGICO

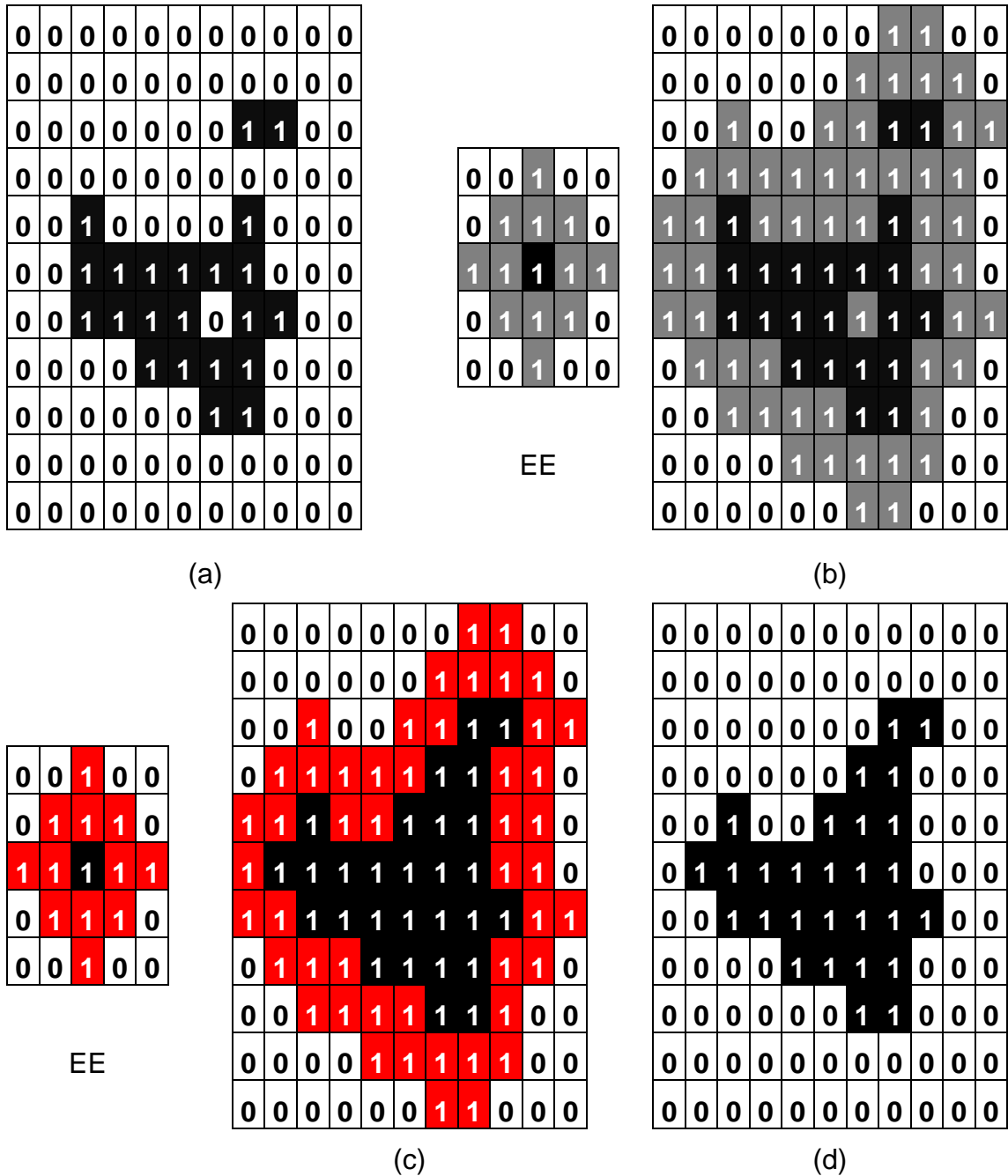
Las imágenes de pavimento binarias necesitan de procesamientos adicionales para fusionar separaciones estrechas entre grietas, remover los puntos aislados o ruido y ajustar las fisuras, lo que puede resolverse con la operación morfológica de cierre, que tiende a suavizar los contornos de las regiones, fusionar separaciones estrechas entre regiones, eliminar huecos pequeños y rellenar agujeros del contorno de la grieta [1]. Adicionalmente, varios estudios han aplicado esta operación para mejorar los resultados en la clasificación y cuantificación de daños [6], [19], [36], [40], [41].

En este estudio la operación de cierre se aplicó con un elemento estructural tipo disco de radio 2, esta permitió mejorar el trazo de las grietas de la imagen segmentada. Esta operación consiste en aplicar la dilatación seguida de la erosión comúnmente especificada por la siguiente ecuación:

$$A.B = (A \oplus B) \ominus B \quad (6.3)$$

Donde A es el conjunto y B es el elemento estructural. La Figura 36 muestra la operación morfológica de cierre aplicando un elemento estructural (EE).

Figura 36. Operación morfológica de cierre: (a) Imagen original, (b) Imagen dilatada, (c) imagen erosionada, (d) Imagen resultante

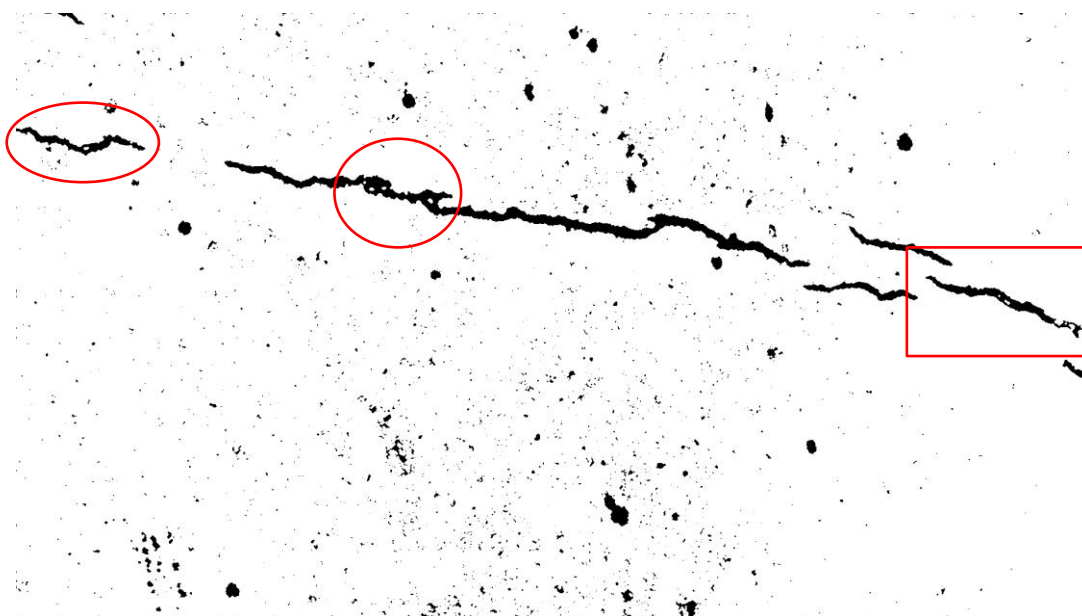


En la Figura 37 se muestra la imagen segmentada antes y después de aplicar la operación de cierre. Se puede observar en la parte resaltada que se rellenan los agujeros de los contornos de las grietas.

Figura 37. Resultado de la operación morfológica de cierre



(a) Antes de la operación



(b) Después de la operación

7. DESCRIPCIÓN

El objetivo de esta etapa es encontrar las medidas adecuadas para caracterizar las grietas encontradas.

7.1. CARACTERIZACIÓN DE GRIETAS

Generalmente, las grietas piel de cocodrilo están compuestas de polígonos interconectados que forman ángulos agudos, y el lado máximo de las piezas no supera los 0,3 m. Las grietas en bloque son piezas interconectadas, aproximadamente rectangulares, con un área entre 0,1 y 10 m²; las grietas longitudinales son paralelas al eje del pavimento, y las transversales son perpendiculares a la dirección de construcción [4], [42]. Diversas investigaciones definen las grietas en imágenes como un conjunto de píxeles más oscuros que el fondo y segmentos de línea con diferentes orientaciones [15], [43]. Se proponen las siguientes características geométricas y de forma:

7.1.1. Características geométricas

Hace referencia a las propiedades y a las medidas de las regiones de estudio en las imágenes.

- **Longitud del eje mayor de la elipse circunscrita (E_M):** Especifica la longitud en píxeles del eje mayor de la elipse circunscrita²² que tiene el mismo segundo momento normalizado de la región. Esta medida permite determinar la longitud en $(\frac{mm}{pixel})$ de las grietas longitudinales y transversales. La siguiente figura representa esta característica.

²² Elipse de menor área que encierra toda la grieta.

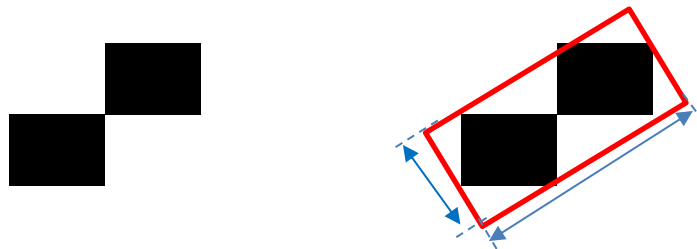
Figura 38. Eje mayor de la elipse circunscrita



(a) Segmento de grieta (b) Eje mayor

- **Razón entre el eje mayor y el eje menor de la elipse circunscrita (E_M/E_m):** Cociente de la longitud de los ejes de la elipse circunscrita.
- **Alargamiento:** Relación del ancho (RF_W) y el alto (RF_H) del rectángulo frontera²³. La Figura 39 muestra el rectángulo frontera de la región de estudio.

Figura 39. Rectángulo frontera

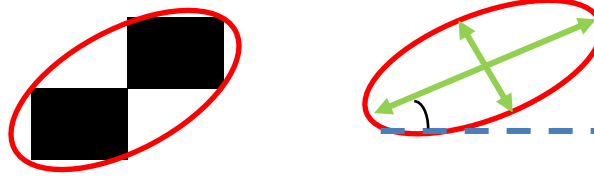


(a) Segmento de grieta (b) Rectángulo frontera

- **Orientación (θ):** Ángulo que forma el eje mayor de la elipse circunscrita respecto al eje horizontal. La Figura 40 indica el ángulo de orientación determinado.

²³ Rectángulo que encierra o limita la región de estudio.

Figura 40. Orientación



(a) Segmento de grieta (b) Ejes

- **Área (A):** Número de píxeles que conforman la región en la imagen binaria. Se calcularon las áreas de la grieta o región conexa²⁴ A_{RC} , del rectángulo frontera A_{RF} y de la elipse circunscrita A_{EC} .

$$A = \sum p \quad (7.1)$$

Donde p representa a cada uno de los píxeles que conforman la región de estudio.

- **Perímetro:** Píxeles encontrados en el contorno de una región, determinada mediante el cálculo de la distancia entre cada par adyacente de píxeles alrededor de la frontera de la región.

7.1.2. Descriptores de forma

Permite diferenciar la forma de las regiones con la ayuda de medidas relacionadas con el tamaño.

- **Excentricidad (ϵ):** Establece la relación de la distancia entre los focos de la elipse y la longitud del eje mayor. El valor se encuentra en un rango entre cero (0) y uno (1): si es cero, se considera un círculo, y si es 1, un segmento de línea.

²⁴ Píxeles interconectados que conforman la grieta.

$$\varepsilon = \frac{c}{a} \quad (7.2)$$

Donde c se considera la semidistancia focal y a el semieje mayor.

- **Compacidad (C):** Describe la densidad de una región en la imagen. Se define como:

$$C = \frac{2\sqrt{A\pi}}{P} \quad (7.3)$$

Donde A es el área de la región y P es el perímetro o número de píxeles del contorno de la región.

7.2. INTERPRETACIÓN

Para detectar correctamente las grietas, a continuación, se eliminan las grietas falsas con base en los descriptores anteriores y después se realiza la conexión entre grietas adyacentes.

7.2.1. Eliminación de grietas falsas

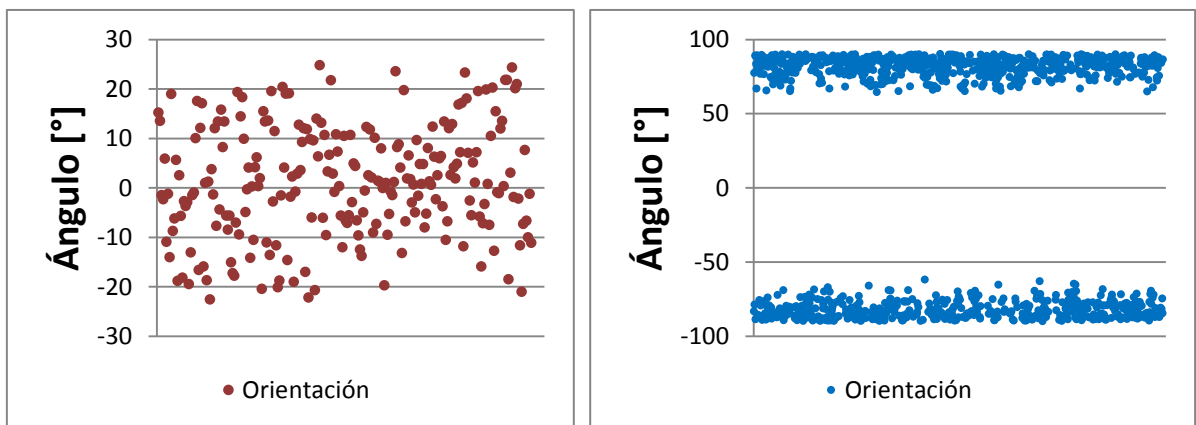
En la etapa de segmentación, las imágenes aún presentan ruido y objetos no deseados, como manchas en el pavimento y hojas. Por tanto, considerando las características geométricas y de forma, y aplicando el análisis estadístico descriptivo a las imágenes captadas, se determinaron diversos parámetros para detectar las grietas. Para esto, se clasificaron visualmente las 95 imágenes captadas por el sistema semiautomático y se agruparon en tres clases: transversales, longitudinales y diagonales.

Para detectar las regiones transversales y longitudinales, en primer lugar, se determinó que la longitud del eje mayor de la elipse circunscrita debe ser mayor o igual a 50 píxeles; de lo contrario, pertenece a puntos aislados, con base en [44] una grieta es significativa cuando tiene longitud mayor a 7 mm; en segundo lugar, se fijó que la razón entre el eje mayor respecto al eje menor de la elipse debe ser mayor o igual a 1, con el fin de remover las manchas presentes en la imagen.

Luego se determinó el descriptor de alargamiento de las regiones transversales y longitudinales, teniendo en cuenta si la dirección que predomina es paralela o perpendicular al eje de la vía; para esto, se estableció que para las grietas transversales el ancho del rectángulo frontera debe ser mayor o igual al doble de su altura, y para las grietas longitudinales la altura del rectángulo frontera debe ser mayor o igual al doble de su ancho.

En cuanto al descriptor orientación, este fue calculado para cada región transversal y longitudinal de las imágenes captadas, donde los valores variaron en un rango de -90° a 90° , y se representan en los diagramas de dispersión de la Figura 41.

Figura 41. Dispersión de la orientación



(a) Orientación de grietas transversales

(b) Orientación de grietas longitudinales

Por lo anterior, se dedujo que el valor absoluto de la orientación para las grietas transversales debe estar en un rango de 0° a 25° , y para las grietas longitudinales, de 65° a 90° . La Tabla 5 resume las características determinadas.

Tabla 5. Características de grietas transversal y longitudinal

Descriptor	Grieta transversal	Grieta longitudinal
Eje mayor (E_M)	≥ 50	≥ 50
Razón (E_M/E_m)	≥ 1	≥ 1
Alargamiento	$RF_W \geq 2RF_H$	$RF_H \geq 2RF_W$
Orientación (θ)	$ \theta \in [0^\circ, 25^\circ]$	$ \theta \in [65^\circ, 90^\circ]$

Para identificar las regiones diagonales, se tomaron las regiones de las imágenes captadas y se calculó la media de las áreas A_{RC} , A_{RF} y A_{EC} , y resultó que el área de la región conexa es 24 % del área del rectángulo frontera y 46 % del área de la elipse circunscrita, y el área de la elipse circunscrita es 52 % del área del rectángulo frontera. En segundo lugar, se removieron los puntos aislados o áreas de regiones menores a 50 píxeles. La Tabla 6 resume las características determinadas.

Tabla 6. Características de grieta diagonal

Descriptor	Grieta diagonal
Eje mayor (E_M)	≥ 50
Área región conexa (A_{RC})	$A_{RC} \leq \frac{6}{25} A_{RF} \wedge A_{RC} \leq \frac{23}{50} A_{EC}$
Área elipse circunscrita (A_{EC})	$A_{EC} \leq \frac{13}{25} A_{RF}$

Respecto a las grietas de bloque y piel de cocodrilo, estas se componen de la combinación de las regiones longitudinales, transversales y diagonales detectadas, y se diferencian por la separación entre regiones.

Por último, se calculó la excentricidad de la elipse circunscrita de cada región y se realizó el análisis estadístico descriptivo de este parámetro a 1361 regiones que

cumplieron las características determinadas anteriormente, y 771042 regiones consideradas como ruido. Calculando la desviación estándar para las grietas y el ruido, se determinó que los segmentos de grieta varían en un rango mayor de 0,75 a 1; de lo contrario, pertenecen a ruido. Adicionalmente, se calculó la compacidad para cada grieta y ruido, y aplicando el procedimiento inmediatamente anterior, se determinó un rango de 0,03 a 0,49 para las grietas y 0 a 0,03 para el ruido. La Tabla 7 resume los rangos de valores estos descriptores de forma.

Tabla 7. Descriptores de forma

Descriptor	Grieta
Excentricidad (ϵ)	(0,75 - 1]
Compacidad (C)	(0,03 - 0,49]

A partir de las características determinadas, se establecen las condiciones (7.4), (7.5) y (7.6) para detectar las grietas; de lo contrario, es considerado como no grieta o ruido.

$$Si E_M \geq 50 \wedge \frac{E_m}{E_m} \geq 1 \wedge RF_W \geq 2RF_H \wedge 0^\circ \geq \theta \leq 25^\circ \wedge 0,75 < e \quad (7.4)$$

$$\leq 1 \wedge 0,03 < C \leq 0,41$$

$$Si E_M \geq 50 \wedge \frac{E_m}{E_m} \geq 1 \wedge RF_H \geq 2RF_W \wedge 65^\circ \geq \theta \leq 90^\circ \wedge 0,75 < e \quad (7.5)$$

$$\leq 1 \wedge 0,03 < C \leq 0,41$$

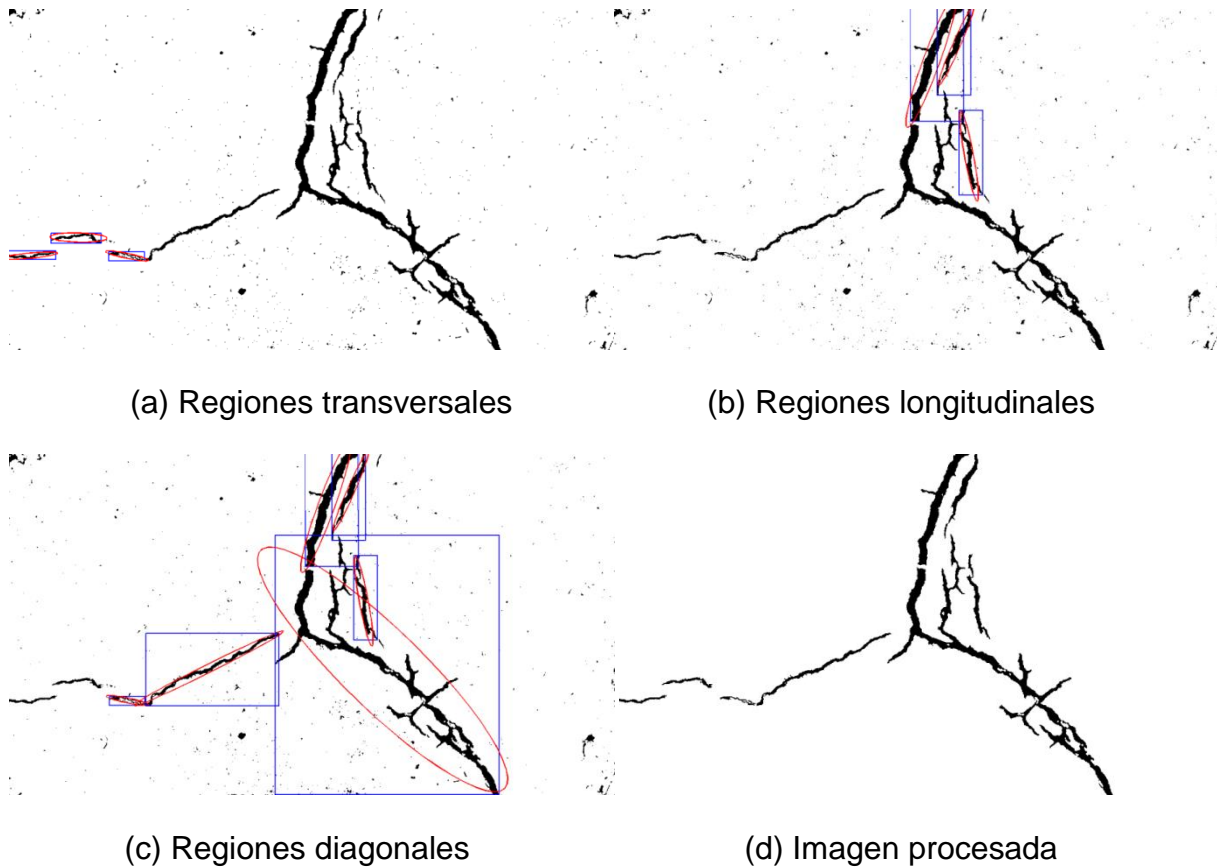
$$Si E_M \geq 50 \wedge A_{RC} \leq \frac{6}{25} A_{RF} \wedge [(A)_{RC} \leq \frac{23}{50} A_{EC} \mid |A_{EC} \leq \frac{13}{25} A_{RF}) \wedge 0,75 < e \quad (7.6)$$

$$\leq 1 \wedge 0,03 < C \leq 0,41$$

Los resultados obtenidos con cada una de las condiciones anteriores se muestran en la Figura 42, donde se resaltan las grietas detectadas. Estos resultados muestran que presentan ruido, aunque la imagen segmentada después del

acondicionamiento no descarta detalles de grieta. Sin embargo, con las condiciones establecidas, se muestra que las grietas son más claras y gran parte del ruido es removido. El código fuente de este algoritmo se encuentra en el apartado E del anexo A.

Figura 42. Resultado de la eliminación de grietas falsas



En la Figura 42 (c) puede observarse que se detectaron nuevamente algunas fisuras longitudinales y transversales, pero no todas. Esto puede suceder debido a que algunas fisuras longitudinales y transversales cumplen las condiciones de áreas.

7.2.2. Conexión de grietas

Dentro de los datos que implican conservar las vías, se encuentran los relacionados directamente con la medición de longitudes y áreas de los daños del

pavimento. Sin embargo, la mayoría de grietas en las imágenes segmentadas está desconectada, lo que causa que fallen los métodos para la clasificación y la medición de grietas. Para resolver este problema, se propone el algoritmo de conexión de grietas, que consiste en unir dos regiones conexas adyacentes RC_a y RC_b que tengan el mismo sentido y la misma orientación. Los pasos del algoritmo son:

- I. Seleccionar la lista de píxeles que constituyen cada región conexa RC , denominada P_n de RC . Esta lista contiene una matriz de $n \times 2$ datos, donde n es la cantidad máxima de píxeles contenidos en RC , con su respectiva posición x y y en la imagen.
- II. Iniciar con el último píxel $P_n(px_n, py_n)$ de la primera región conexa RC_1 .
- III. Determinar el píxel más cercano $P_c(px_c, py_c)$ de las siguientes regiones conexas adyacentes que tienen el mismo sentido u orientación, según los siguientes criterios:

$$a) \sqrt{(px_n - px_c)^2 + (py_n - py_c)^2} \leq 150$$

- b) La razón angular que forman las distancias de P_n y P_c es:

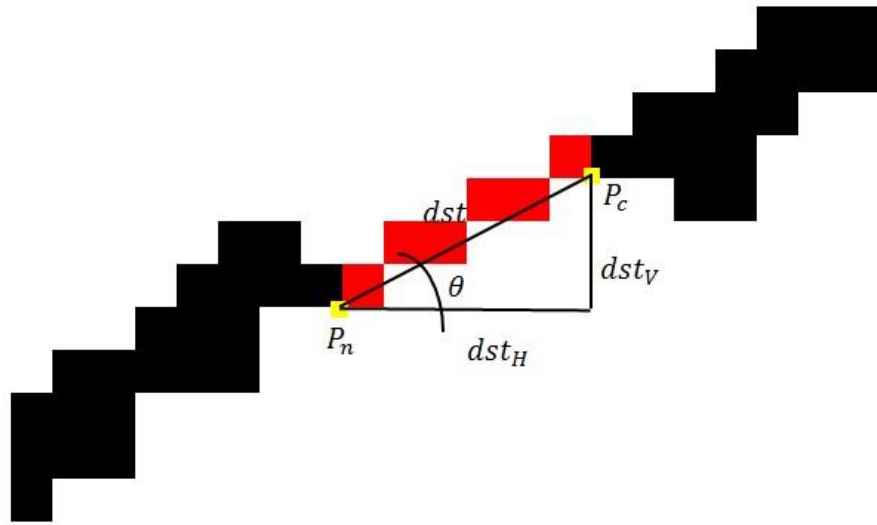
$$\theta = \text{Arcocoseno}(dst_v/dst) \in [0^\circ, 25^\circ]$$

$$c) dst_H \geq 0$$

Donde dst, dst_H y dst_v es la distancia diagonal, horizontal y vertical, respectivamente, del eje que forma P_n y P_c .

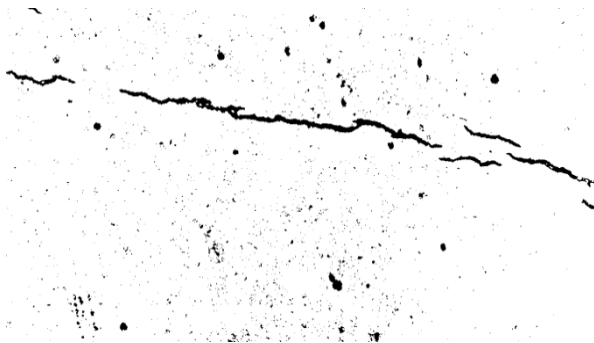
- IV. Conectar las regiones conexas RC_1 y RC_c y repetir el proceso para toda la imagen. La Figura 43 presenta el esquema de la conexión entre grietas.

Figura 43. Esquema de conexión entre regiones

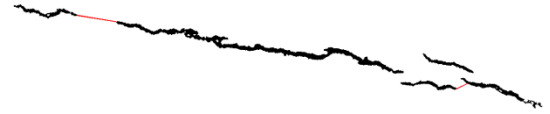


El propósito del criterio (a) es unir solamente regiones conexas cercanas entre sí. El criterio (b) asegura que la conexión se realice a las regiones conexas que tengan el mismo rango de orientación; en este caso, también se aplica para la orientación establecida de las grietas transversales. Sin embargo, cuando se hace una rotación de -90° a las grietas longitudinales, el valor absoluto de esta orientación pasa a estar entre 0° y 25° . Respecto al criterio (c), evita que la RC_c se encuentre atrás de la RC_1 . En la Figura 44, se muestran los resultados de la conexión de grietas, y se señalan con línea roja las conexiones.

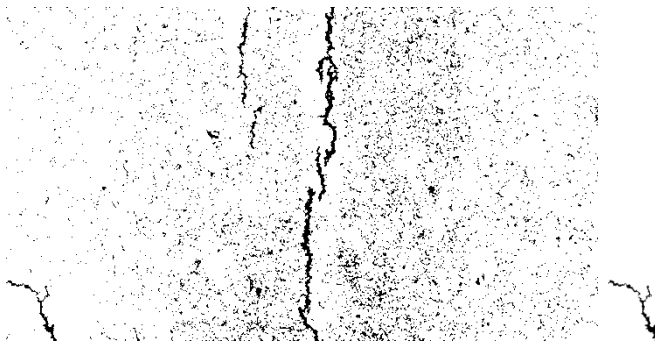
Figura 44. Conexión de grietas



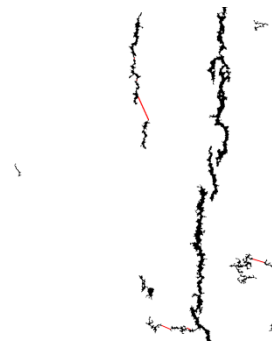
(a) Imagen segmentada



(b) Conexión de grietas



(c) Imagen segmentada



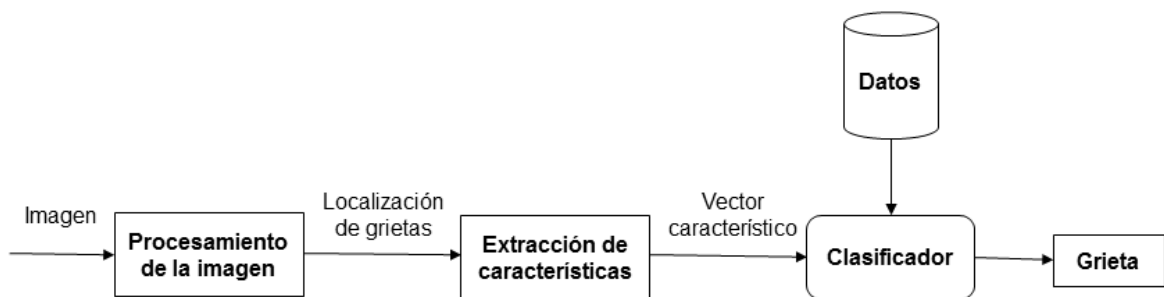
(d) Conexión de grietas

Los resultados indican que las grietas adyacentes que cumplen los criterios de conexión forman una sola región, que constituye la base para cuantificar la longitud de grieta en toda su extensión. El código fuente de este algoritmo se encuentra en el apartado F del anexo A.

8. CLASIFICACIÓN

A continuación se presenta la representación de la grieta reducida a un píxel, el método para determinar el vector de características y el clasificador supervisado mediante la RNA *backpropagation*. La Figura 45 muestra el procedimiento utilizado para la clasificación de grietas usando la técnica de redes neuronales.

Figura 45. Procedimiento para la clasificación



8.1. REPRESENTACIÓN

Un enfoque importante para representar la forma estructural de una grieta es reducirla a un grafo; para esto, se aplica la operación morfológica de adelgazamiento, que puede ser expresado en términos de la operación *hit-and-miss* [1], [45]. Posteriormente, se aplica la operación morfológica *spur* para remover las ramificaciones del esqueleto. La Figura 46 muestra el resultado de estas operaciones para obtener el esqueleto de las grietas.

Figura 46. Esqueleto de una grieta



(a) Imagen segmentada

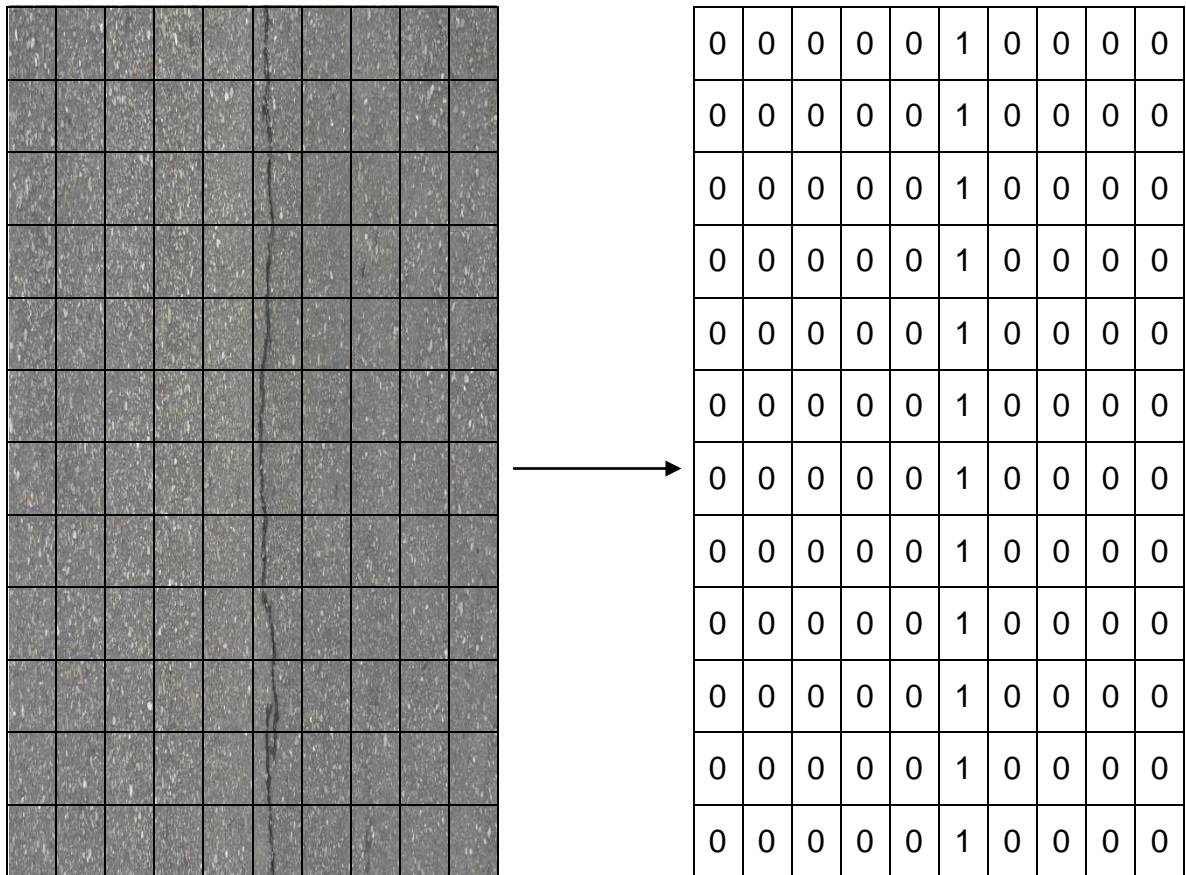


(b) Representación de grieta

8.2. TILE PARTITIONING

El concepto *tile partitioning* consiste en subdividir la imagen en recuadros o sub-*imágenes*, con el fin de reducir el consumo de recursos de cómputo y tiempo en la clasificación de grieta. En este estudio el tamaño de cada *tile* fue de 40 x 40 píxeles que genera una matriz basada en "*tiles*". Para la imagen de 1920 x 1080 el tamaño de la matriz de *tiles* es de 48 x 27. Un *tile* es considerado *tile* de grieta si contiene al menos un píxel de grieta; de lo contrario, se asigna el valor de cero. La Figura 47 representa este proceso.

Figura 47. Matriz de *tiles*



(a) Imagen original

(b) Matriz de *tiles*

8.3. VECTOR DE CARACTERÍSTICAS

Lee, Byoung y Lee, Hosin (2002) proponen tres modelos de ANN (del inglés Artificial Neural Network), con base en el vector de características determinados por los métodos píxel a píxel de la imagen, el histograma y la proximidad, respectivamente. Cada valor de las celdas del vector de características determina los nodos de entrada de la red neuronal [14],

Para este estudio, con base en la matriz de *tiles* de cada imagen, se propone el vector de características mediante el método denominado histograma de adyacencia, una adaptación del método de histogramas descrito en [14]. Este método permite remover algunas de las ramificaciones que quedan en el esqueleto de la grieta aún después de la operación morfológica *spur*.

El método histograma de adyacencia consiste en calcular la diferencia de las celdas adyacentes de los histogramas vertical y horizontal, respectivamente. Se determinan mediante las ecuaciones (8.1) y (8.2).

$$VHA[i] = |VH[i] - VH[i + 1]| \quad (8.1)$$

$$HHA[i] = |HH[i] - HH[i + 1]| \quad (8.2)$$

Donde *VHA* es el histograma de adyacencia vertical, *HHA* es el histograma de adyacencia horizontal y el índice *i* es la posición de cada celda de los histogramas *VH* y *HH* donde el valor depende del número de filas o columnas de la matriz de *tiles*, respectivamente.

8.4. CLASIFICADOR

La red neuronal es recomendada especialmente cuando existe dificultad para determinar la clase apropiada y las reglas suficientes. Su mayor ventaja es su habilidad para aprender respondiendo apropiadamente a los datos de entrada [14].

Se propone una red neuronal aplicando el método de aprendizaje supervisado *backpropagation* o retropropagación, que permite establecer la relación entre la

salida deseada ante una entrada determinada, mediante el aprendizaje por corrección, donde se conoce la magnitud del error y ésta determina el cambio de los pesos en la red²⁵.

En primer lugar, fue conveniente normalizar los datos antes de entrenar la red neuronal, para esto se aplicó el procedimiento de normalización que consiste en transformar los datos de tal forma que tengan una media μ de cero y una desviación estándar σ de uno conocida como la normal tipificada. En segundo lugar, de las 95 imágenes seleccionadas se tomaron 95 vectores característicos, de las cuales el 60 % fueron destinados para entrenamiento y el 40 % para prueba. En tercer lugar, para realizar el entrenamiento se optó por el método optimización de Levenberg-Marquardt, que se caracteriza por emplear el *Jacobiano* para ajustar los pesos de la red y por ser el algoritmo *backpropagation* más rápido de los disponibles en Matlab para el entrenamiento de las RNA²⁶. Por último, se utilizó la función de transferencia *tansig*, relacionado con un sigmoideo bipolar que toma los valores de entrada y restringe la salida a valores entre -1 y +1. Una vez terminado el entrenamiento se aplicó la desnormalización para regresar al dominio original de los datos. El código fuente de este algoritmo se encuentra en los apartados A y B del anexo A.

Ahora bien, el mayor inconveniente de la red *backpropagation* es el tiempo de convergencia, puesto que durante el entrenamiento es posible que la red nunca llegue a converger. Para esto se recomienda variar el parámetro de aprendizaje iniciando con valores altos y progresivamente ir disminuyendo. Otra forma que permite evitar los mínimos locales es aplicar las técnicas de cambiar la configuración de la red o cambiar el conjunto de entrenamiento. Las Tabla 8 y Tabla 9 resume los mejores resultados obtenidos en el entrenamiento en términos de los siguientes parámetros: arquitectura, coeficiente de aprendizaje, épocas, tiempos, el menor error cuadrático medio (ECM), entre otras.

²⁵ SERRANO, Antonio, SORIA, Emilio y MARTÍN, José. Redes Neuronales Artificiales. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. 2009. pp. 19-20.

²⁶ MathWorks. Ayuda del producto para Matlab 7.9.0. Función *trainlm*

Tabla 8. Parámetros de la RNA con una capa oculta durante el entrenamiento

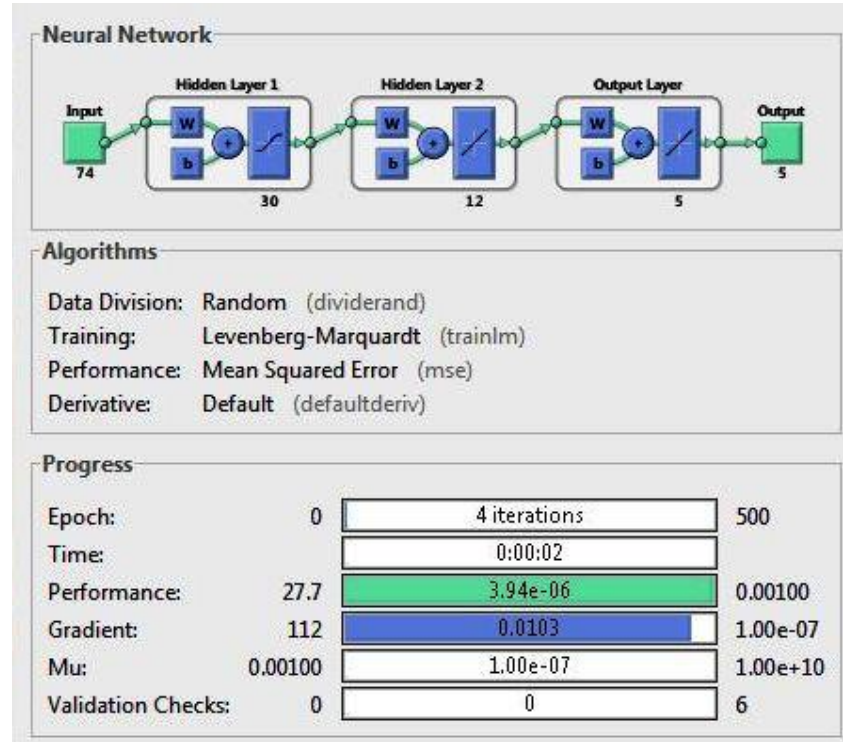
1 CAPA OCULTA					
Arquitectura	74-50-5	74-50-5	74-150-5	74-50-5	74-150-5
Coeficiente de aprendizaje	0,01	0,1	0,1	0,005	0,005
Épocas	3	3	3	3	3
Tiempo [S]	5	5	83	5	77
Menor ECM	9,8 e-7	1,07 e-5	3,72 e-8	7,8 e-7	3,63 e-7
Gradiente del error	0,00592	0,0297	0,00282	0,00236	0,00892
Mu	1 e-6	1 e-6	1 e-6	1 e-6	1 e-6
Validaciones	6	6	6	6	6

Tabla 9. Parámetros de la RNA con dos capas ocultas durante el entrenamiento

2 CAPAS OCULTAS				
Arquitectura	74-50-5	74-60 24-5	74-30 12-5	74-30 12-5
Coeficiente de aprendizaje	0,05	0,01	0,1	0,005
Épocas	3	3	4	4
Tiempo [S]	5	13	2	3
Menor ECM	9,10 e-7	7,03 e-5	3,94 e-6	1,63 e-5
Gradiente del error	0,00229	0,136	0,0103	0,0385
Mu	1 e-6	1 e-6	1 e-6	1 e-7
Validaciones	6	6	6	6

La Figura 48 muestra el resultado del entrenamiento de una red neuronal multicapa configurada con 30 y 12 neuronas en la capa oculta y coeficiente de aprendizaje de 0,1.

Figura 48. Mejor configuración de la RNA



Ahora, en este estudio para revisar el rendimiento de cada arquitectura de la red neuronal se calculó el error, definida por la siguiente ecuación:

$$ERROR = \frac{1}{5n} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^5 (X_{ik} - Y_{ik})^2 \quad (8.3)$$

Donde n es la cantidad de datos para entrenamiento o prueba, X_{ik} es la salida real de la imagen i en cada clase k , y Y_{ik} es la salida de la RNA de la imagen i en cada clase k .

Por otra parte, para evaluar el porcentaje de precisión de los experimentos de entrenamiento y prueba por cada arquitectura de la red neuronal, se define en la ecuación 8.4 para cada tipo de grieta i , donde $i=1,2,3,4,5$ que denomina las cinco tipos de grieta e incluyen la clase definida como no grieta (NG).

$$\% Precision = \frac{\sum_{i=1}^5 VP_i}{\sum_{i=1}^5 VP_i + \sum_{i=1}^5 FP_i} * 100 \quad (8.4)$$

Donde los verdaderos positivos VP_i son el número de grietas correctamente clasificadas como tipo i , y los falsos positivos FP_i son el número de grietas que son tipo i pero no fueron clasificadas por la RNA y los falsos negativos FN_i son el número de grietas incorrectamente clasificadas por la RNA como tipo i .

Para obtener la red neuronal óptima para la clasificación de grietas se realizó las combinaciones de los siguientes parámetros: coeficiente de aprendizaje, cantidad de capas ocultas y número de neuronas ocultas. En general, las redes neuronales determinadas están compuestas de 75 neuronas en la capa de entrada (una por cada *tile* de grieta) y cinco neuronas en la capa de salida (una para cada clase tipo longitudinal, transversal, piel de cocodrilo, grieta en bloque y otra). La Tabla 10 y la Tabla 11 muestran una comparación del error y el porcentaje de precisión para las diferentes configuraciones de las redes neuronales en las etapas de entrenamiento y prueba. La configuración de 50 neuronas en la capa oculta con coeficiente de aprendizaje de 0,005; 0,1 y 0,05 obtuvo una precisión de aproximadamente el 79 %. Sin embargo, la mejor RNA *backpropagation* propuesta con los datos de entrada del método de adyacencia fue la arquitectura de dos capas con 30 y 12 neuronas en la capa oculta, esta obtuvo un error de 1,34 y una precisión del 82 % aproximadamente.

Tabla 10. Resultados de las RNA con una capa oculta

Coeficiente de aprendizaje	Arquitectura	Entrenamiento		Prueba	
		57 Imágenes (60%)		38 Imágenes (40%)	
		Error	Precisión %	Error	Precisión %
0,01	74-50-5	0,000	100,00	1,48	76,98
	74-100-5	0,060	97,40	3,65	62,64
	74-150-5	0,000	100,00	2,56	64,91

Coeficiente de aprendizaje	Arquitectura	Entrenamiento		Prueba	
		57 Imágenes (60%)		38 Imágenes (40%)	
		Error	Precisión %	Error	Precisión %
	74-200-5	0,004	99,84	3,40	62,26
0,1	74-50-5	0,000	100,00	1,42	78,49
	74-100-5	0,018	99,19	4,47	57,36
	74-150-5	0,000	100,00	1,66	75,09
	74-200-5	0,004	99,84	3,58	60,75
0,005	74-50-5	0,000	100,00	1,37	78,49
	74-100-5	0,028	98,86	1,73	74,34
	74-150-5	0,000	100,00	1,97	75,47
	74-200-5	0,007	99,67	3,61	58,49
0,05	74-50-5	0,000	100,00	1,77	78,49
	74-100-5	0,025	98,86	2,87	64,53
	74-150-5	0,025	98,86	1,57	74,72
	74-200-5	0,000	100,00	4,88	53,96

Ahora bien, con las arquitecturas de dos capas ocultas se obtiene una mayor generalización de la red. Un coeficiente de aprendizaje de 0,01 con 60 y 24 neuronas en cada capa oculta obtiene un Error de 1,35 y una precisión de aproximadamente el 79 %, en cambio un coeficiente de aprendizaje de 0,1 con 30 y 12 neuronas en la capa oculta obtiene un Error de 1,34 y una precisión de aproximadamente el 82 % (véase la Tabla 11).

Tabla 11. Resultados de las RNA con dos capas ocultas

Coeficiente de aprendizaje	Épocas	Arquitectura	Entrenamiento		Prueba	
			57 Imágenes (60%)		38 Imágenes (40%)	
			Error	Precisión %	Error	Precisión %
0,01	3	74-30 12-5	0,0211	99,02	2,40	68,30
	3	74-60 24-5	0,0000	100,00	1,35	78,87
	3	74-90 38-5	0,0000	100,00	4,09	58,49
0,1	4	74-30 12-5	0,0000	100,00	1,34	81,89
	3	74-60 24-5	0,0000	100,00	6,35	46,79
	3	74-90 38-5	0,0000	100,00	2,42	66,04
0,005	4	74-30 12-5	0,0000	100,00	1,77	75,47
	3	74-60 24-5	0,0070	99,93	1,84	72,91
	3	74-90 38-5	0,0000	100,00	1,86	74,34
0,05	4	74-30 12-5	0,0000	100,00	2,19	73,21
	3	74-60 24-5	0,0035	99,84	2,80	64,15
	3	74-90 38-5	0,0000	100,00	1,47	73,21

9. CALIFICACIÓN DE GRIETA

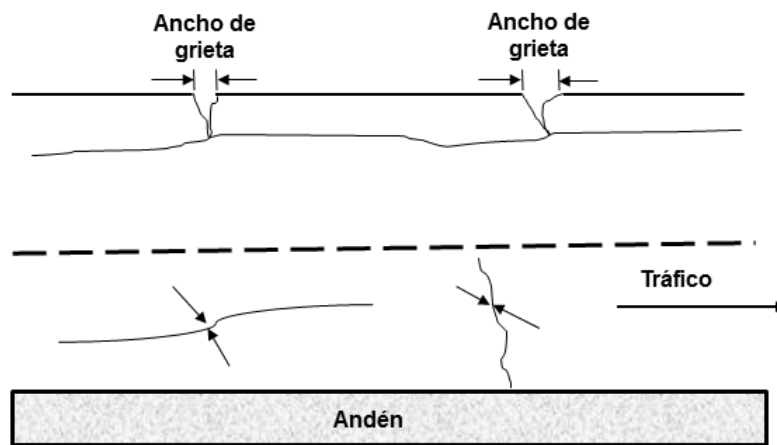
Para superar las limitaciones del proceso de calificación manual de la condición del pavimento, se determinó un enfoque con procesamiento de imágenes para calificar las grietas basado en el nivel de severidad de los daños detectados, con la aplicación de la metodología PCI publicada por la ASTM²⁷ en la norma D6433 *Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys*, la más completa para la calificación objetiva de pavimentos flexibles y rígidos, dentro de los modelos de gestión vial disponibles en la actualidad [26], [46]. El índice de la condición del pavimento PCI es el método aplicado en la presente investigación, y este además se ha adoptado por algunas entidades locales encargadas de realizar la calificación de los deterioros en la superficie de pavimentos [2], [5], [27].

9.1. PCI

Para calificar las grietas cuantitativa y cualitativamente, tres parámetros son frecuentemente usados por el PCI: tipo, extensión y severidad. El tipo establece el daño en una clase (para este caso, en grietas longitudinal, transversal, bloque y piel de cocodrilo); la extensión define la medida de las fallas en longitud o área; y la severidad es el nivel del daño, que puede ser alto, medio o bajo. Por ejemplo: para las grietas longitudinales con nivel de severidad medio, se describe como aquellas que presentan ramificaciones pequeñas y un ancho de grieta que varía entre 3 y 10 mm. La Figura 49 ilustra el ancho de grieta para longitudinal y transversal.

²⁷ American Society for Testing and Materials

Figura 49. Ancho de grietas longitudinal y transversal



Fuente: MILLER, John, BELLINGER, William. Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program. Virginia, 2003. p. 3

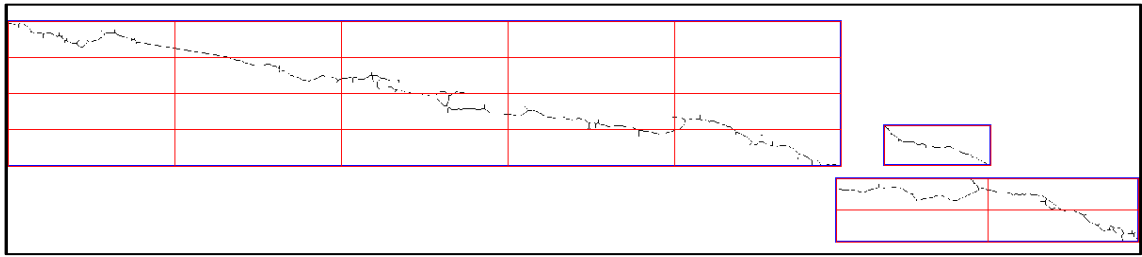
Se propone un método para calcular la extensión de grieta automáticamente en imágenes digitales, que cuantifica la longitud, el área y el ancho de grieta.

9.1.1. LONGITUD DE GRIETA

Para el cálculo de la longitud de grieta se proponen dos formas. El primero consiste en el cálculo de la longitud del eje mayor de la elipse circunscrita L , descrito en la sección 7.1.1.; y el segundo son reglas de recorrido para conectar grietas propuesto por Yao Sun (2009), método replanteado para medir la grieta a lo largo de su recorrido contando píxel a píxel. Esta medida solo se aplica para grietas longitudinales y transversales. Las reglas básicas planteadas son:

- I. Seleccionar el esqueleto de grieta y subdividir en recuadros el rectángulo frontera. La Figura 50 ilustra este paso.

Figura 50. Particiones de los esqueletos de grieta



II. Excluir los recuadros que no contengan información, con el fin de reducir el consumo de recursos de cómputo y tiempo.

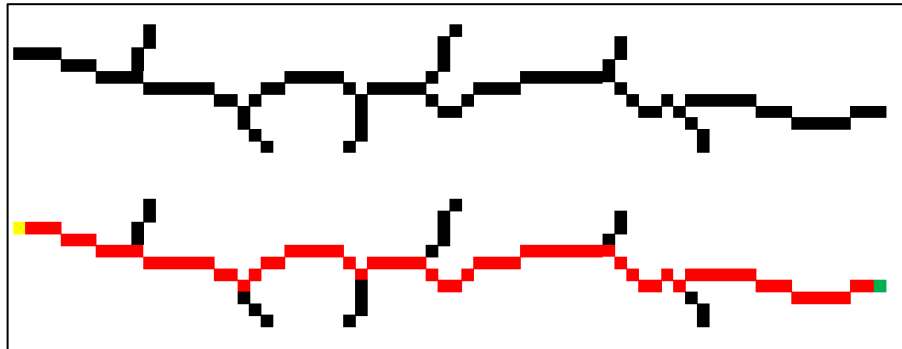
III. Aplicar las siguientes condiciones de recorrido a cada recuadro, según el tipo de grieta seleccionada:

- Condiciones para grieta transversal
 - a) Hallar el píxel más a la izquierda del esqueleto, denominado *inipixel*.
 - b) Partir del $inipixel(i, j)$, y si $esqueleto(i + n, j) = 1$ recorrer n veces a la derecha.
 Donde *esqueleto* es la matriz de la región y $n = 1, 2, 3, \dots$ hasta el ancho del recuadro.
 - c) Si $esqueleto(i + n + 1, j) = 0$ verificar si $esqueleto(i + 1, j - 1) = 1$ y retornar al paso b), de lo contrario ir al paso d).
 - d) Si $esqueleto(i + n + 1, j) = 0$ verificar si $esqueleto(i + 1, j + 1) = 1$ y retornar al paso b), de lo contrario ir al paso e).
 - e) Si $esqueleto(i + n + 1, j) = 0$ verificar si $esqueleto(i, j - 1) = 1$ y retornar al paso b), de lo contrario ir al paso f).
 - f) Si $esqueleto(i + n + 1, j) = 0$ verificar si $esqueleto(i, j + 1) = 1$ y retornar al paso b), de lo contrario finalizar recorrido.
- Condiciones para grieta longitudinal
 - a) Hallar el píxel más arriba del esqueleto, denominado *inipixel*.

- b) Partir del $inipixel(i, j)$ y si $esqueleto(i, j + n) = 1$ recorrer n veces hacia abajo.
Donde esqueleto es la matriz de la región y $n = 1, 2, 3, \dots$ hasta el ancho del recuadro.
- c) Si $esqueleto(i, j + n + 1) = 0$ verificar si $esqueleto(i + 1, j + 1) = 1$ y retornar al paso b), de lo contrario ir al paso d).
- d) Si $esqueleto(i, j + n + 1) = 0$ verificar si $esqueleto(i - 1, j + 1) = 1$ y retornar al paso b), de lo contrario ir al paso e).
- e) Si $esqueleto(i, j + n + 1) = 0$ verificar si $esqueleto(i - 1, j) = 1$ y retornar al paso b), de lo contrario ir al paso f).
- f) Si $esqueleto(i, j + n + 1) = 0$ verificar si $esqueleto(i + 1, j) = 1$ y retornar al paso b), de lo contrario finalizar el recorrido.

La Figura 51 ilustra el recorrido de un esqueleto de grieta transversal, y resalta en amarillo el píxel inicial y en rojo el píxel final.

Figura 51. Recorrido de un esqueleto



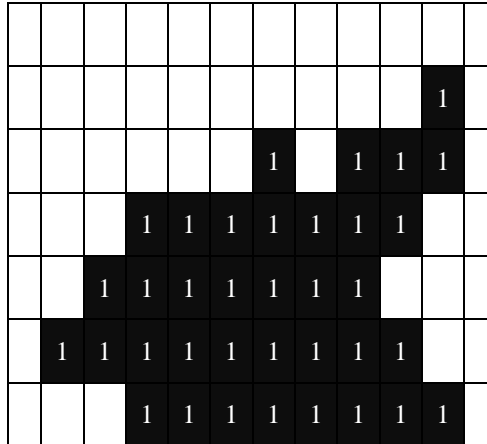
IV. Realizar la suma de la longitud calculada en cada recuadro.

9.1.2. ÁREA Y ANCHO DE GRIETA

Se determinaron dos medidas simples para el cálculo de la severidad: el área y el ancho de grieta. El área es la cantidad de píxeles que pertenecen a la región

conexa (véase la Figura 52). Esta medida solo se aplica para grieta de bloque y piel de cocodrilo.

Figura 52. Área de una región conexa



Para determinar la unidad en metros cuadrados (m^2), se multiplica la cantidad de píxeles por el factor de conversión descrito en el capítulo de captación de imágenes. El porcentaje de área afectada se define como:

$$A = \frac{ag}{at} \times 100 \quad (9.1)$$

Donde A es el porcentaje de área afectada respecto al área total at o tamaño de la imagen y ag es el área de la grieta.

Ahora bien, para el ancho de grieta, se aplicó la fórmula propuesta por Puan, Mustaffar y Ling (1998), que definen como:

$$CW = \frac{ag}{L} \quad (9.2)$$

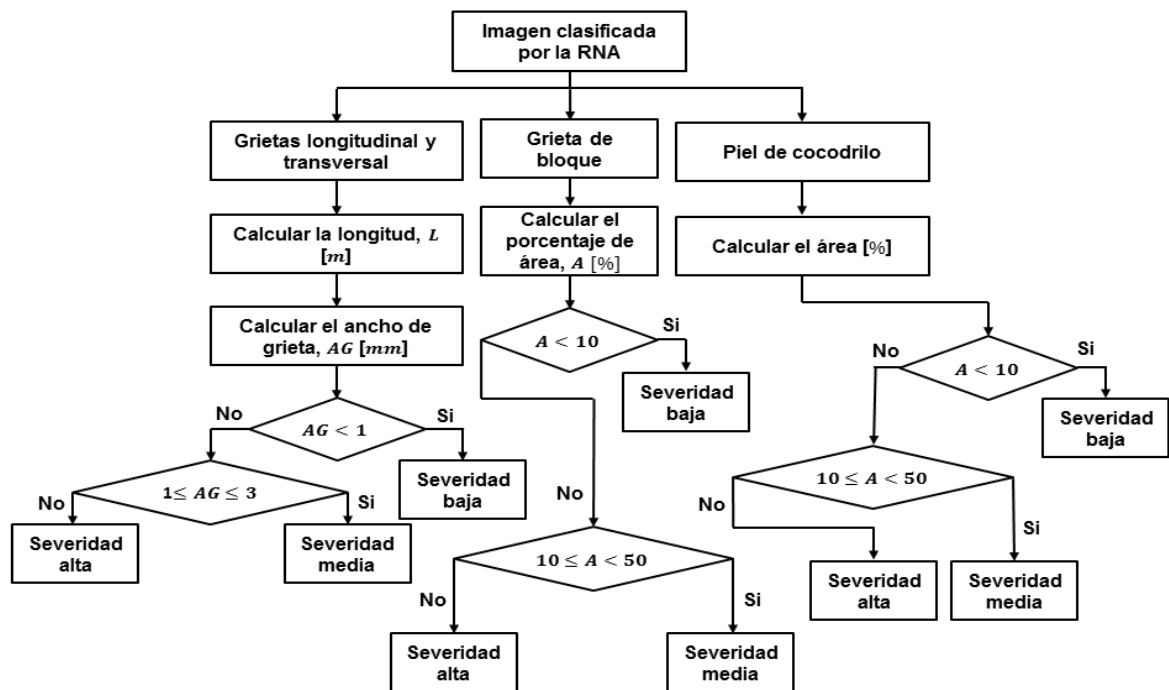
Donde CW es el ancho de grieta y L es la longitud o cantidad de píxeles del eje mayor de la elipse circunscrita. La unidad de medida es en milímetros.

9.1.3. SEVERIDAD

Generalmente, en los métodos de inspección manual, el nivel de cada daño la determina el experto en pavimentos de una manera cualitativa, considerando el

comportamiento, las causas y el origen de la falla. Por tanto, se determinaron de manera cuantitativa los intervalos para hallar el nivel de severidad, que considera el ancho y el porcentaje de área con base en las instrucciones de varios manuales [2], [26], [34]. En la Figura 53 se presenta las condiciones para definir el nivel de severidad:

Figura 53. Condiciones para determinar la severidad



9.1.4. Procedimiento para el cálculo del PCI

Para la inspección de pavimentos, se han efectuado varios intentos para desarrollar un procedimiento automático [8], [9], [28]. En este estudio se propone el procedimiento para el cálculo del PCI aplicando procesamiento digital de imágenes. Los pasos son:

- I. Definir la unidad de muestreo o tamaño de la imagen [m^2], cuyas dimensiones varían según la resolución de la cámara.
- II. Identificar los daños teniendo en cuenta la clase obtenida por la RNA, la severidad y las medidas de longitud o área.

III. Sumar las medidas de las mismas clase y severidad.

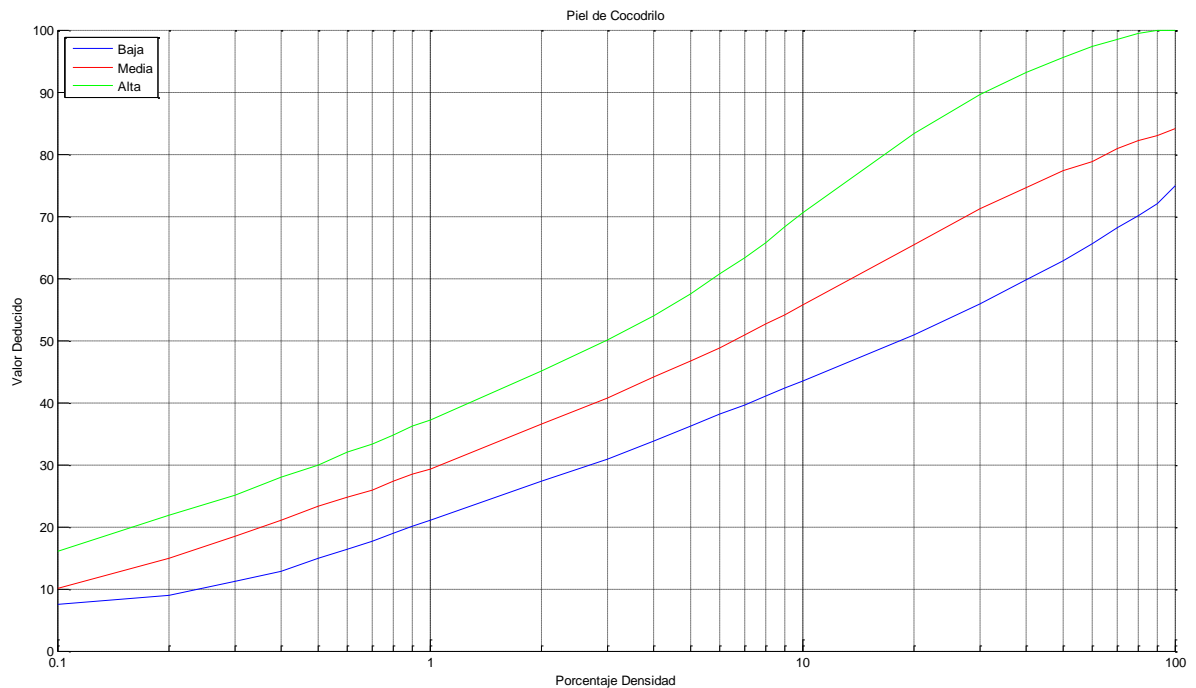
IV. Calcular la densidad del daño en porcentaje, como se define a continuación:

$$D = \frac{m}{A} * 100 \quad (9.3)$$

Donde D es el porcentaje del daño, m es la cantidad de cada clase de daño en cada nivel de severidad y A es el área total de la unidad de muestreo.

V. Determinar el valor deducido VD por cada tipo de grieta y nivel de severidad con base en el valor de la densidad del daño. Se calcula mediante los datos propuestos por la Administración Federal de Carreteras del Departamento de Transporte de los Estados Unidos para el cálculo del PCI²⁸ (véase la Figura 54).

Figura 54. Porcentaje de densidad contra valor deducido

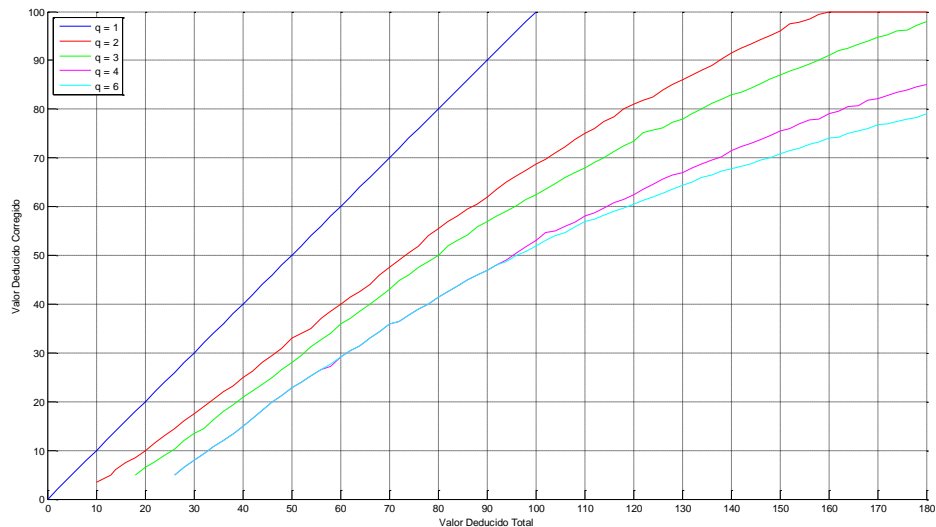


VI. Sumar todos los valores deducidos individuales y determinar el número de valores q que sean mayores que 5.

²⁸ <https://faapaveair.faa.gov/Preferences.aspx>

VII. Calcular el valor deducido corregido según q y el valor deducido total con base en los datos propuestos por la FHWA (véase la Figura 55).

Figura 55. Deducido total contra deducido corregido



VIII. Determinar el PCI de la unidad de muestreo mediante la siguiente ecuación:

$$PCI = 100 - VDC \quad (9.4)$$

IX. Establecer la valoración de la condición del pavimento, según el rango de calificación del PCI descrito en la sección 3.3.

La Figura 56 muestra el formulario utilizado en la interfaz de usuario (IU) de la herramienta *software* donde se realiza automáticamente el procedimiento anterior para pavimento asfáltico.

Figura 56. IU para calcular el PCI

FORMULARIO_PAVIMENTO_FLEXIBLE

ESTUDIO DE LA CONDICIÓN DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

LISTADO DE FALLAS

1. Piel de Cocodrilo	11. Parcheo
2. Exudación	12. Pulimiento de Agregados
3. Agrietamiento en Bloque	13. Huecos
4. Abultamientos / Hundimientos	14. Cruce de Vías Férrea
5. Corrugación	15. Ahueamiento
6. Depresión	16. Desplazamiento
7. Grieta de Borde	17. Grieta Parabólica
8. Grieta de Reflexión de Junta	18. Hinchamiento
9. Desnivel de Carril / Berma	19. Desprendimiento de Agregados
10. Grietas Longitudinales / Transversales	

	TIPO DE FALLA	MEDIDA [m] ó [m ²]	SEVERIDAD	SIGLA TF
1				
2				
3				
4				

	TIPO DE FALLA	DENSIDAD %	SEVERIDAD	VALOR DEDUCIDO
1				
2				
3				
4				

TOTAL DEDUCIDO			
VALOR CORREGIDO DEDUCIDO			

INDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO

CALIFICACIÓN

10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

10.1. PRUEBAS DE LA DETECCIÓN

Para verificar la correcta funcionalidad del método de detección de grietas, en primer lugar, se eligieron 50 de las imágenes captadas, teniendo en cuenta que representarán los escenarios con sombras, señales horizontales y manchas, y, además, se seleccionaron 100 imágenes de las generadas con grietas longitudinales y transversales por el algoritmo propuesto en la sección 4.4.; y, en segundo lugar, se calcularon los índices de sensibilidad y especificidad que se aplican en otras investigaciones [18], [47].

Las ecuaciones (10.1) y (10.2) definen los índices de sensibilidad y especificidad, donde los verdaderos positivos, VP, denotan el número de grietas detectadas correctamente; los verdaderos negativos, VN, regiones que no son grietas y no se detectaron como grieta; los falsos negativos, FN, el número de regiones que no fueron detectadas, y los falsos positivos, FP, regiones incorrectamente detectadas como grieta. La sensibilidad indica la capacidad del método propuesto para detectar como grietas aquellas regiones que realmente lo son, y la especificidad denota la capacidad de no detectar como grietas las regiones que en realidad no lo son.

$$\text{Sensibilidad } (S) = \frac{VP}{VP + FN} \quad (10.1)$$

$$\text{Especificidad } (E) = \frac{VN}{VN + FP} \quad (10.2)$$

La Tabla 12 resume los indicadores calculados para el total de imágenes captadas y generadas.

Tabla 12. Rendimiento de la detección

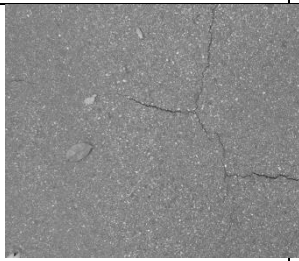
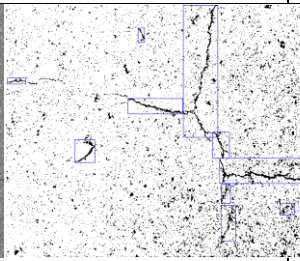
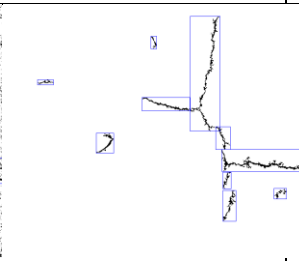
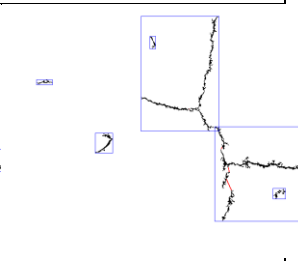

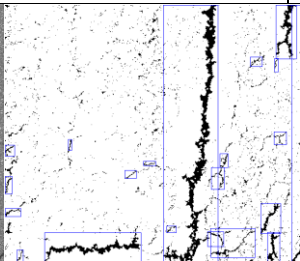
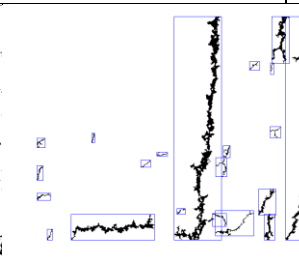
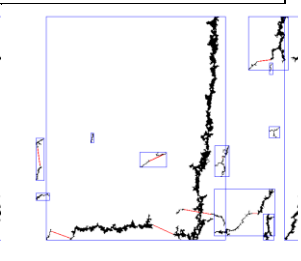
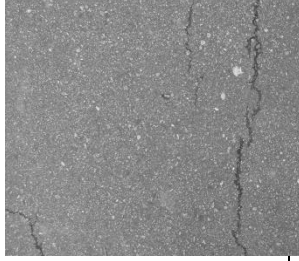
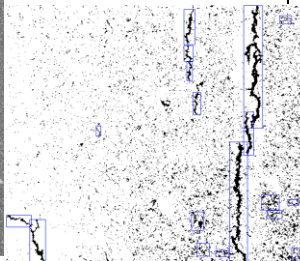

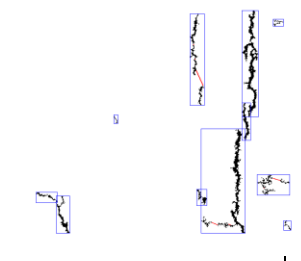
	VP	VN	FN	FP	S (%)	E (%)
Imágenes captadas	380	313.697	85	124	81,72	99,96
Imágenes generadas	229	1'359.557	4	67	98,28	99,99

Un 81,72 % de sensibilidad para las imágenes captadas evidencia que las zonas con humedad que aparecen con las grietas ocasionan que la región conexa ocupe en su mayor parte el rectángulo frontera y cause que las grietas no sean detectadas. Sin embargo, la especificidad de 99,96 % indica que la mayoría de las regiones detectadas como grietas en realidad lo eran.

Ahora bien, para las imágenes generadas resultó una sensibilidad de 98,28 %, que indica que la mayoría de grietas fueron detectadas correctamente, y 99,99 % de especificidad indica que las regiones que no eran grietas no fueron detectadas como tal; todo esto debido a la uniformidad del fondo de las imágenes, la continuidad de cada región y el alto contraste existente en las imágenes.

En la Tabla 13, se señalan en recuadro azul las grietas detectadas, y en líneas rojas, las conexiones. Los resultados muestran que la imagen segmentada después del acondicionamiento no descarta detalles de grieta, pero presenta ruido. Sin embargo, en la etapa de eliminación de grietas falsas, se muestra que las grietas son más claras y gran parte del ruido es removido. Además, se aprecia una reducción del número de recuadros o grietas detectadas, al comparar las imágenes desde la etapa de eliminación en adelante.

Tabla 13. Detección de grietas

Imagen original	Segmentación	Eliminación de grietas falsas	Conexión de grietas
			
			
			

Los resultados experimentales demuestran que el método puede efectiva y eficientemente detectar las grietas de las imágenes de pavimento.

10.2. PRUEBAS DE LA CLASIFICACIÓN

El desarrollo del clasificador de grietas de pavimento mediante la técnica de RNA y usando las características de adyacencia de lo histogramas como datos de entrada obtuvo una precisión del 82 % para una arquitectura de 30 y 12 neuronas en la primera y segunda capa oculta, respectivamente. Para realizar las pruebas del clasificador, se seleccionó el 40 % de las 95 imágenes captadas por el sistema

semiautomático, que fueron las utilizadas para el entrenamiento y la prueba de la RNA.

En general, para calcular el porcentaje de precisión o evaluar el rendimiento global del clasificador se aplicó la siguiente ecuación:

$$\% Precision = \frac{VP}{VP + FP} * 100 \quad (10.3)$$

Donde, *VP* es el número de grietas clasificadas correctamente en cada clase y *FP* es el número de grietas en cada clase que no fue clasificada.

La Tabla 14 y la Tabla 15 resumen los mejores resultados obtenidos de las configuraciones determinadas para la red neuronal *backpropagation*. Para establecer las configuraciones de la RNA, se varió el número de neuronas a 50, 100, 150 y 200 para una capa oculta y [30 12], [60 24] y [90 38] para dos capas ocultas y se combinaron con coeficientes de aprendizaje de 0,01; 0,1; 0,005 y 0,05.

Tabla 14. Resultados de prueba para una RNA con una capa oculta

1 CAPA OCULTA														
Coeficiente de aprendizaje	Arquitectura	Longitudinal		Transversal		Piel de cocodrilo		Grieta en bloque		Otra		Total		
		FP	FN	FP	FN	FP	FN	FP	FN	FP	FN	FP	FN	Precisión [%]
0,01	74-50-5	24	31	30	17	1	1	1	4	5	8	61	61	76,98
0,1	74-50-5	20	31	30	18	1	0	1	1	5	7	57	57	78,49
	74-150-5	44	13	20	27	1	7	1	0	0	19	66	66	75,09
0,005	74-50-5	22	30	28	19	1	0	1	0	5	8	57	57	78,49
	74-150-5	40	20	20	41	1	0	1	0	3	4	65	65	75,47
0,05	74-50-5	7	48	43	9	1	0	1	0	5	0	57	57	78,49

Tabla 15. Resultados de prueba para una RNA con dos capas ocultas

2 CAPAS OCULTAS														
Coeficiente de aprendizaje	Arquitectura	Longitudinal		Transversal		Piel de cocodrilo		Grieta en bloque		Otra		Total		
		FP	FN	FP	FN	FP	FN	FP	FN	FP	FN	FP	FN	Precisión [%]
0,01	74-60 24-5	26	18	27	19	1	1	1	0	1	18	56	56	78,87
0,1	74-30 12-5	3	44	38	4	1	0	1	0	5	0	48	48	81,87
0,005	74-30 12-5	44	15	15	46	1	0	0	2	5	2	65	65	75,47

Cada ejemplo de prueba se clasificó como un tipo de grieta de las cuatro clases determinadas. Un falso positivo en un tipo causa un falso negativo en otro. Sin embargo, debido a las irregularidades de la superficie del pavimento, se ha limitado el éxito de la precisión a un 82 % para clasificar los tipos de grietas.

La Tabla 16 muestra el etiquetado por tipo de grieta obtenido con el procedimiento propuesto en diferentes escenarios de captación.

Tabla 16. Clasificación de grietas en diferentes escenarios


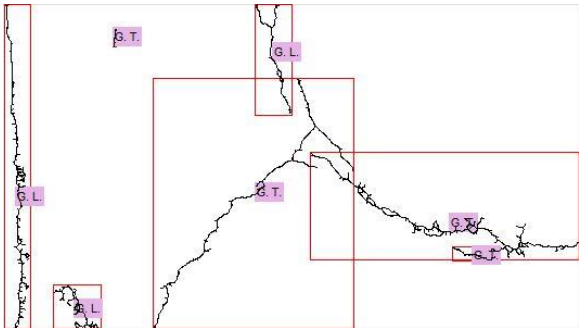

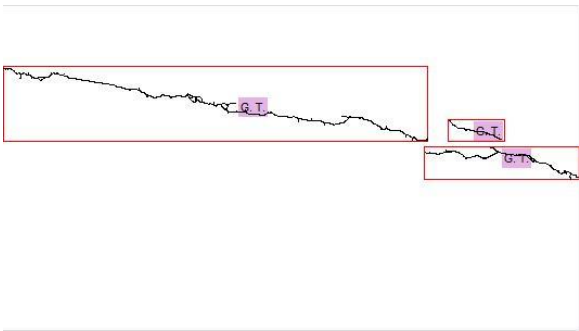

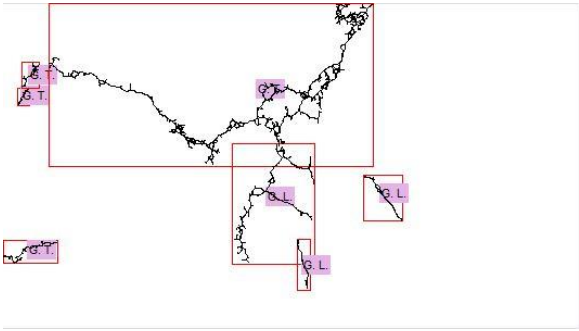
Imagen original	Imagen procesada
	
(a) Con humedad	(b) Clasificada

Imagen original	Imagen procesada
	
(c) Con manchas	(d) Clasificada
	
(e) Con hojas y humedad	(f) Clasificada

10.3. TIEMPO PROMEDIO DE EJECUCIÓN DE LOS ALGORITMOS

Para revisar el rendimiento del procedimiento propuesto, se calculó el tiempo de ejecución promedio, ejecutando el algoritmo en dos equipos de cómputo con características diferentes. Las especificaciones básicas de los computadores utilizados se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17. Especificaciones de los equipos de cómputo

Especificaciones	Equipo 1	Equipo 2
Procesador	AMD Phenom II X4 (3 GHz)	Intel Xeon X3480 (3,07 GHz)
Memoria caché	L3 (6 MB)	L3 (8 MB)

Especificaciones	Equipo 1	Equipo 2
RAM	3 GB	16 GB
Tarjeta de video	ATI Radeon HD 4200	NVidia Quadro FX 580

Ahora bien, la Tabla 18 resume los tiempos de ejecución promedio en cada etapa del procesamiento para 95 imágenes con resolución de 1920 x 1080 y 4096 x 2048, respectivamente.

Tabla 18. Tiempos de ejecución

Tiempo de procedimiento	Imagen captada de 1920 x 1080		Imagen captada de 4096 x 2048	
	Equipo 1 [S]	Equipo 2 [S]	Equipo 1 [S]	Equipo 2 [S]
Filtrado	0,012	0,0065	0,030	0,022
Ajuste de contraste	0,104	0,098	0,392	0,330
Segmentación	0,263	0,180	1,511	1,176
Operación morfológica	0,030	0,022	0,096	0,073
Eliminación de grietas falsas	5,318	4,085	24,277	16,548
Conexión	11,123	9,139	168,500	140,758
Representación	0,346	0,257	1,606	1,037
Clasificación	1,021	0,791	15,699	12,468
Calificación PCI	0,016	0,015	0,017	0,015
Total	18,234	14,594	212,128	172,428

Con base en los resultados obtenidos, se deduce que el tiempo de ejecución depende del tamaño de la imagen y de los recursos de cómputo. Además, las etapas del procedimiento que demandan más tiempo son la eliminación de grietas falsas y la conexión de grietas, debido a que dependen del número de regiones detectadas en la imagen. Se aprecia un aumento del tiempo en la etapa de unión de grietas, porque aumentó el tamaño de la imagen y los criterios de conexión se aplican a todas las regiones conexas cercanas entre sí. Sin embargo, el tiempo promedio total requerido para clasificar y calificar es satisfactorio.

10.4. INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO ALFASOFT

Se desarrolló una herramienta *software* denominada *ALFASOFT* (Algoritmos para la clasificación de fisuras en pavimento asfáltico), que permite, además de clasificar las grietas, visualizar los resultados de la imagen en cada etapa del PDI, calcular el índice de la condición del pavimento de la imagen y guardar los valores calculados. La herramienta *software* fue desarrollada en Matlab® 2012 b.

La metodología aplicada para el desarrollo de la herramienta *software* fue el modelo de procesos para la elaboración de prototipos o prototipado evolutivo, que busca guiar de manera lógica y ordenada las actividades necesarias para lograr el desarrollo del *software*.

10.4.1. Descripción de los casos de uso

A continuación, se describen los casos de uso:

Tabla 19. Descripción de los casos de uso

Nombre:	Algoritmos para la clasificación de fisuras en pavimento asfáltico -ALFASOFT
Fecha:	Mayo de 2013
Descripción:	Clasificar y cuantificar los daños tipo grieta en pavimento flexible, utilizando técnicas de tratamiento digital de imágenes

Actores:	Experto en el área de ingeniería de pavimento
Condiciones iniciales:	<ul style="list-style-type: none"> - El experto debe contar con imágenes de pavimento tomadas por el sistema, semiautomático o automático - Se debe cumplir con las condiciones de adquisición de imágenes descritas en la sección 4.3 - La resolución de la imagen debe ser de 1920 x 1080 o 4096 x 2048 - La herramienta debe ser ejecutada en el entorno de desarrollo de Matlab 2012b o superior
Condiciones finales:	El experto confrontará el resultado obtenido con la herramienta y su criterio, y confirmará o rechazará el resultado.
Flujo:	<p>El experto realiza las siguientes acciones:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Inicia la herramienta <i>software</i> 2. Carga una imagen de pavimento 3. Configura los parámetros iniciales 4. Determina la secuencia de los algoritmos 5. Ejecuta el proceso de detección y clasificación 6. Inicia el cálculo automático del índice de condición de pavimento de la imagen 7. Guarda las cantidades calculadas 8. Como alternativa, puede calcular manualmente el PCI y guardar la imagen procesada en cada etapa

La Figura 57 muestra el diagrama de casos de uso del sistema.

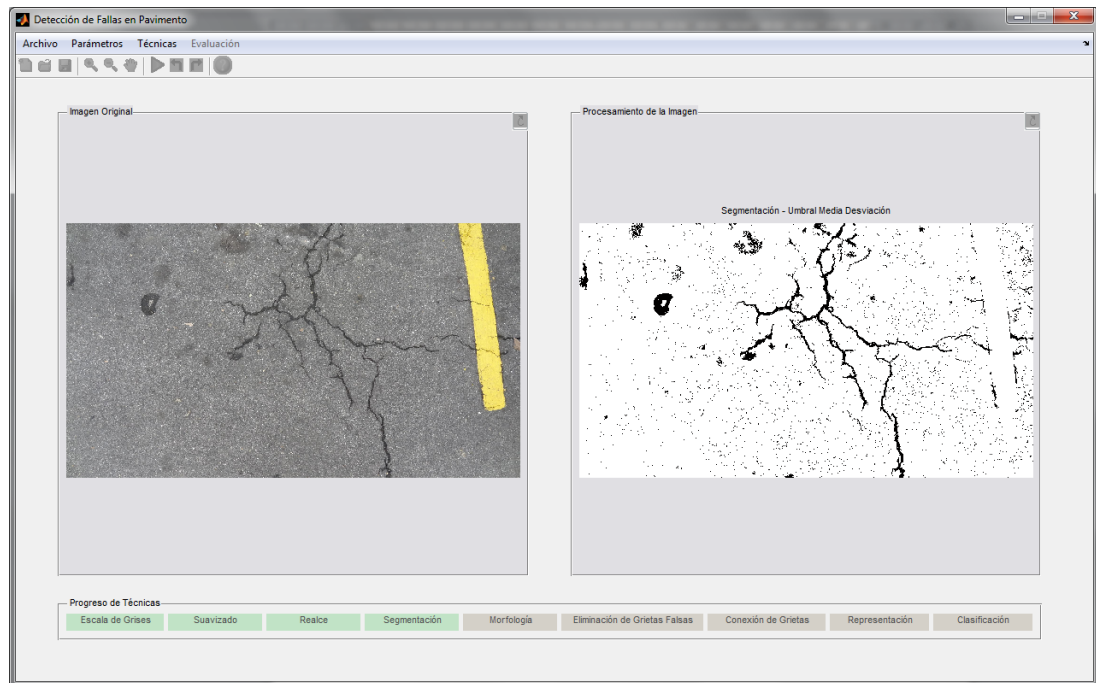
Figura 57. Casos de uso



10.4.2. Interfaz gráfica de usuario

La descripción general del funcionamiento de la herramienta *software* se encuentra en el anexo B. La Figura 58 muestra la interfaz gráfica de usuario con los resultados de la etapa de segmentación.

Figura 58. Interfaz gráfica de usuario en el proceso de segmentación



11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al realizar las pruebas con las imágenes captadas por el sistema semiautomático en diferentes escenarios de captación, el método de clasificación propuesto obtuvo una precisión de 82 % para una red neuronal *backpropagation* con 30 y 12 neuronas en la primera y segunda capa oculta, respectivamente, y con coeficiente de aprendizaje de 0,1.

Por otra parte, los resultados experimentales fueron obtenidos de las imágenes de pavimento captadas y generadas por el sistema semiautomático y el algoritmo generador implementado, respectivamente. Las pruebas de detección demostraron que las grietas fueron correctamente detectadas, con una sensibilidad de 81,72 % y una especificidad de 99,96 % para las imágenes captadas, incluso con un fondo de textura fuerte o iluminación no homogénea.

Los resultados de las pruebas realizadas determinan que la combinación del filtro de la mediana, para el suavizado de la imagen; el ajuste de contraste, para hacer uniforme el fondo de la imagen y realzar la grieta; la aplicación de la media y la desviación estándar de los niveles de grises, para segmentar la imagen; la combinación de operadores de morfología matemática, para fusionar separaciones estrechas; la eliminación de grietas falsas usando características geométricas y descriptores de forma; la conexión de grietas, para obtener grietas continuas; la clasificación por tipo de grieta usando redes neuronales: un método computacional efectivo para el reconocimiento de grietas en pavimento asfáltico.

Los sistemas semiautomático y automático de captación implementados permitieron obtener imágenes con mayor área de cobertura del pavimento, estabilizar la altura y el ángulo de visión de la cámara. Sin embargo, las condiciones de iluminación y las sombras afectaron las imágenes, pero fueron ajustadas en la etapa de acondicionamiento de la imagen y realzaron las regiones

consideradas como grietas. Por tanto, se recomienda integrar un sistema de iluminación artificial para controlar las condiciones de iluminación.

Aunque los resultados son satisfactorios, las imágenes captadas solo contienen un tipo de daño (agrietamiento) de todos los deterioros presentes en una vía pavimentada. Por tanto, se recomienda la continuidad de la investigación en el reconocimiento de daños tipo parcheo y baches, deformación de superficie y desprendimiento de daños utilizando tecnología escáner láser, para proveer la medida de profundidad de los deterioros. Respecto a la cuantificación de la condición del pavimento mediante la metodología PCI, se recomienda incluir otros tipos de daños y calcular los índices por corredor vial o proyecto que ha de evaluarse, para permitir mayor precisión en la calificación del estado del pavimento.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] GONZÁLEZ, Rafael; WOODS, Richard and EDDINS, Steven. Digital Image Processing Using Matlab. Third Edition. New Jersey: Prentice Hall, 2004, 609 p.
- [2] FIGUEROA, Ana S., y otros. Manual para el Mantenimiento de la Red Vial Secundaria Pavimentada y en Afirmado (en línea). Bogotá D.C., Colombia, 2007.<http://web.mintransporte.gov.co/PLANVIAL/images/stories/documentos/pavimentos1>
- [3] WANG, Kelvin. Designs and implementations of automated systems for pavement surface distress survey. Journal of Infrastructure Systems No 1, vol. 6, p. 24-32. ASCE: Transportation & Development Institute, 2000.
- [4] MILLER, John, and BELLINGER, William. Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program. Report. Federal Highway Administration. US Department of Transportation. Virginia, 2003, 154 p.
- [5] PORRAS, Hernán, y otros. Plan Maestro de Movilidad. Bucaramanga 2010 – 2030 (en línea). ISBN: 978-958-44-8645-5, Bucaramanga, 2010. 143 p. <http://albatros.uis.edu.co/eisi/eisi.jsp?IdServicio=S482&&IdReg=CG243#CG243>
- [6] YU, Xinren. Pavement Surface Distress Detection and Evaluation Using Image Processing Technology. Toledo, 2011, 72 p. Thesis (Master of Science Degree in Electrical Engineering). The University of Toledo. Graduate Faculty. The Department of Electrical Engineering.

- [7] FUKUHARA, Toshihiko; TERADA, Keiji; NAGAO, Makoto; KASAHARA, Atsushi, and ICHIHASHI, Shigeki. Automatic Pavement Distress Survey System. Journal of Transportation Engineering No 3, vol. 116, p. 280-286. ASCE: Transportation & Development Institute, 1990.
- [8] FUGRO ROADWARE Inc.. ARAN 9000 (en línea). (Richmond, USA). (accedido: 17 de agosto de 2012). http://www.fugroroadware.com/products/aran_9000/
- [9] CSIRO, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization. CSIRO's Road Crack: Automated detection of road cracks (en línea). (Australia). (accedido: 18 de agosto de 2012). <http://www.csiro.au/Outcomes/ICT-and-Services/People-and-businesses/RoadCrack.aspx>
- [10] GUNARATNE, M.; AMARASIRI, S., y NASSERI, S. Investigation of Automated and Interactive Crack Measurement Systems. Tampa, 2008, 93 p. Report. The University of South Florida. College of Engineering. Department of Civil and Environmental Engineering.
- [11] YAO, Xun; YAO, Ming, and XU, Bugao. Automated Measurements of Road Cracks Using Line-Scan Imaging. Journal of Testing and Evaluation No 4, vol. 39, 9 p. ASTM: American Society for Testing and Materials, 2011.
- [12] HAAS, R.; HUDSON, W., and ZANIEWSKI, J. Modern Pavement Management. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 1994, 604 p.
- [13] XU, Bugao, and HUANG, Yaxiong. Development of an Automatic Pavement Surface Distress Inspection System. Report. The University of Texas. Center

for Transportation Research. Texas Department of Transportation. Austin, 2003, 28 p.

- [14] LEE, Byoung, y LEE, Hosin. A Robust Position Invariant Artificial Neural Network for Digital Pavement Crack Analysis. Annual Meeting Transportation Research Board TRB. Washington D.C., 2002, 41 p.
- [15] LIU, Fanfan; XU, Guoai; YANG, Yixian; NIU, Xinxin, and PAN, Yuli. Novel Approach to Pavement Cracking Automatic Detection Based on Segment Extending. International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling. IEEE, 2008, pp. 610-614.
- [16] SUN, Y.; SALARI, E., and CHOU, E. Automated Pavement Distress Detection Using Advanced Image Processing Techniques. International Conference on Electro/Information Technology. IEEE, 2009, pp. 373-377.
- [17] HARALICK, Robert; SHANMUGAM, K., and DINSTEN, I. Textural Features for Image Classification. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Vol. SMC-3, 1973, pp. 610-621.
- [18] HU, Yong, ZHAO; Chun-xia, and WANG, Hong-nan. Automatic Pavement Crack Detection Using Texture and Shape Descriptors. IETE Technical Review. Vol. 27, No 5, (September, 2010), pp. 398-405.
- [19] WANG, Chaofan, and SHA, Aimin. Pavement Crack Classification based on Chain Code. FSKD: Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. (Rochester, N.Y.), 2010, pp. 593–597.

- [20] HONG, L.; SALARI, E., and CHOU, E. Pavement Information System: Detection, Classification and Evaluation. Journal Electro/Information Technology. No 1. 2010, pp. 1-4.
- [21] LI, Qingquan; ZOU, Qin, and LIU, Xianglong. Pavement Crack Classification via Spatial Distribution Features. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. Vol. 2011, No. 1. Hindawi Publishing Corporation, (March, 2011), pp. 1–12.
- [22] PULNIX América, Inc. Specifications of the Camera Link Interface Standard for Digital Cameras and Frame Grabbers (en línea). Belgrade, Serbia, oct. 2000 (accedido: 16 de julio de 2012). <http://www.imagelabs.com/wp-content/uploads/2010/10/CameraLink5.pdf>
- [23] BRAY, Justin; VERMA, Brijesh; LI, Xue, and HE, Wade. A Neural Network based Technique for Automatic Classification of Road Cracks. International Joint Conference on Neural Networks. (Vancouver, Canadá), 2006, pp. 907-912.
- [24] XU, Guoai; MA, Jianli; LIU, Fanfan; and NIU, Xinxin. Automatic Recognition of Pavement Surface Crack Based on BP Neural Network. International Conference on Computer and Electrical Engineering. 2008, pp. 19-22.
- [25] MOGHADAS, Nejad, and ZAKERI, Hamzeh. An Expert System based on Wavelet Transform and Radon Neural Network for Pavement Distress Classification. Expert Systems with Applications an International Journal. Vol. 38, No. 6. Elsevier Ltd, (June, 2011), pp. 7088-7101.

- [26] VÁSQUEZ, Luis. Pavement Condition Index (PCI) para Pavimentos Asfálticos y de Concreto en Carreteras (en línea). Manizales, Colombia, febrero de 2002. <http://www.camineros.com/docs/cam036.pdf>
- [27] Invías y UNAL. Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles (en línea). Bogotá D.C., Colombia, Oct. 2006. http://www.invias.gov.co/invias/hermesoft/portallG/home_1/recursos/informacion_institucional/20122007/documento_tecnico.jsp
- [28] Gevial SAS, Ingeniería y Gestión Vial. Tecnología aplicada a la ingeniería (en línea). Bogotá D.C., Colombia. (accedido: 05 de diciembre de 2012). <http://gevial.co/brochure.pdf>
- [29] FREEMAN, Herbert. On the Encoding of Arbitrary Geometric Configurations. IRE Transactions on Electronic Computers. Vol. 10, 1961, pp. 260–268.
- [30] SONY, Corp. DSC-HX9V Cámara Digital Compacta Sony (en línea). España, 2012. (accedido: 11 de octubre de 2012). <http://www.sony.es/product/dsc-h-series/dsc-hx9v/características#tab>
- [31] PORRAS, Hernán; SANABRIA, Duvan, y MEJÍA, Yuri. Sistema Automático para la Adquisición de Imágenes de Vías Pavimentadas. Revista Gerencia Tecnológica Informática. Vol. 12, No 32. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2013, 18 p.
- [32] CAMBRIDGE IN COLOUR. Understanding Digital Camera Sensors (en línea). Cambridge, England. (accedido: 27 de septiembre de 2012). <http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/camera-sensors.htm>

- [33] AUSTROADS. Review of Specification for the Collection of Digital Road Imaging. Technical Report no. AP-T169-10. Sydney: Austroads, 2010. p.34.
- [34] IBEROAMÉRICA CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS DE IBERIA. Catálogo de deterioros de pavimentos flexibles. Vol. 11. México, 2002, 25 p.
- [35] ZHANG, Pengyu, and LI, Hong. Recognition of Pavement Surface Crack. ICNC: Sixth International Conference on Natural Computation, 2010, pp. 3393–3396.
- [36] SUN, Yao. Automated Pavement Distress Detection Using Advanced Image Processing Techniques. Toledo, 2009, 77 p. Thesis (Master of Science Degree in Engineering). The University of Toledo. College of Engineering.
- [37] YING, L. Beamlet Transform Based Technique for Pavement Image Processing and Classification. Toledo, 2009, 60 p. Thesis (Master of Science Degree in Electrical Engineering). The University of Toledo. Graduate Faculty. The Department of Electrical Engineering.
- [38] ZHOU, Huilin; YANG, Shu, and ZHU, Jian. Illumination Invariant Enhancement and Threshold Segmentation Algorithm for Asphalt Pavement Crack Image. Image Processing IEEE. 2010. pp. 2–5.
- [39] Q. Zou, Y. Cao, Q. Li, Q. Mao, and S. Wang, CrackTree: Automatic Crack Detection from Pavement Images. Pattern Recognition Letters. Vol. 33, No. 3. (February, 2011), pp. 227–238.
- [40] PUAN, Othman; MUSTAFFAR, Mushairry, and T. LING, Tung-Chai. Automated Pavement Imaging Program (APIP) for Pavement Cracks

Classification and Quantification. No. i. Image (Rochester, N.Y.), 1998, pp. 1–17.

- [41] YU, X., and SALARI, E. Pavement Pothole Detection and Severity Measurement using Laser Imaging. International Conference on Electro/Information Technology (EIT). IEEE, 2005, pp. 1-5.
- [42] RABABAAH, Haroun. Asphalt Pavement Crack Classification: A Comparative Study of Three AI Approaches: Multilayer Perceptron, Genetic Algorithms, and Self-Organizing Maps. Thesis (Master of Sciences). Indiana University South Bend. Graduate Faculty. Department of Computer and Information Sciences. South Bend, 2005, 120 p.
- [43] MONEM, A.; OLOUFA, A., and MAHGOUB, H. Asphalt Crack Detection Using Thermography. Inframation: Thermal Imaging's Leading Users Conference. 2005, p. 1-12.
- [44] CHAMBON, Sylvie, and MOLIARD, Jean. Automatic Road Pavement Assessment with Image Processing: Review and Comparison. International Journal of Geophysics. Vol. 2011. Hindawi Publishing Corporation, (June, 2011), pp. 1-20.
- [45] LAM, L.; SEONG-WHAN, Lee, and CHING Y. Suen, Thinning Methodologies - A Comprehensive Survey. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol. 14, No. 9, (September, 1992), pp. 879.
- [46] ASTM INTERNATIONAL. Standard practice for roads and parking lots pavement condition index surveys (en línea). USA, 2008. <http://enterprise1.astm.org/DOWNLOAD/D6433.1210479-1.pdf>

- [47] RAMÍREZ, Sandra. Detección de grietas en la cinta asfáltica mediante análisis de imágenes. Querétaro, 2012, 64 p. Tesis (Maestría en Tecnología Avanzada). Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada.
- [48] EPIX Inc. PIXCI® EC1 Frame Grabber (en línea). Chicago, USA, 2012 (accedido: 24 de noviembre de 2012). http://www.epixinc.com/manuals/pixci_ec/index.htm
- [49] EPIX Inc. XCAP™ Image Processing Software (en línea). Chicago, USA, 2012 (accedido: 20 de septiembre de 2012). <http://www.epixinc.com/products/xcap.htm>
- [50] FEI, Xing H., and O. Nixon. Time Delay Integration Speeds Up Imaging. Journal Photonics Spectra No May, 4 p. Laurin Publishing, 2012.

ANEXOS

ANEXO A. CÓDIGO FUENTE DE LOS ALGORITMOS PROPUESTOS

A. Reconocimiento de grietas en pavimento asfáltico

```
clear all;
clc;
tiles = 40;
res=1;
while(res==1)
    load('RedEntrenadaA-30-12.mat', 'net'); %    Carga la red neuronal
    entrenada por el metodo de adyacencia
    load('normalizacion.mat', 'media'); %    Carga la media
    load('normalizacion.mat','desvstd');%    Carga la desviación
    estándar
    dircom = imgetfile();
    img = imread(dircom); % leyendo imagen
    gray = rgb2gray(img); % Convertir imagen a escala de
    grises
    mediags = medfilt2(gray); % Filtro mediana
    homog = Homogenizacion(mediags); % Homogenización
    pix = Umbral_Media_Desviacion(homog,1.6); % Binarización
    ee = strel('disk',2);
    pix = imclose(~pix,ee); % Operación Morfológica de
    Cierre
    lmax = 50;
    regsel = FisurasTransversales(pix,lmax);
    reglon = FisurasLongitudinales(pix,lmax);
    diag = FisurasDiagonales(pix,lmax);
    solap = Solapar(regsel,reglon,diag);
    seg = Unir(solap);
    thin = bwmorph(seg,'thin',Inf); % Esqueleto
    img = bwmorph(thin,'spur',2); % Reducción de ramificaciones
    [L, Ne]=bwlabel(img); % Contar elementos y
    etiquetarlos
end
```

```

prop=regionprops(L);    %   Extraer las características de las
regiones
cuenta = zeros(1,5);
for g = 1:Ne
    soltest = zeros(1,5);
    %Particionamiento de la imagen en tiles
    [matriz,numfil,numcol] = SeleccionGrieta(L,tiles,g);
    %Generando el vector de adyacencia
    [vector] = HistogramasAdyacentes(matriz,numfil,numcol);%
    Invoca la función de adyacencia para hacer la extracción de
    características por este método
    %Clasificando la imagen con la red neuronal
    entrada=vector;
    [entradan,meanentrada,stdentrada] = prestd(entrada');%
    Normalizando la entrada de la imagen
    ent= entradan;
    soltest = sim(net, ent); %   Clasificando la imagen
    soltest= poststd(soltest,media,devstd);
    for i=1:5
        if((soltest(i,:)-fix(soltest(i,:))>0.8)
            soltest(i,:)=round(soltest(i,:));
        elseif ((soltest(i,:)-fix(soltest(i,:))<0.8 &&
            (soltest(i,:)-fix(soltest(i,:))>0)
            soltest(i,:)=fix(soltest(i,:));
        else
            soltest(i,:)=0;
        end
    end
    soltest = soltest';
    %Graficando la salida de la red neuronal
    [cuenta] = Graficar(img,soltest,cuenta,prop,g);
end
fprintf('\n\n Desea ingresar otra imagen? si=1 no=0\n\n');
res = input('      Opción -> ');
end
disp('Red Neuronal terminada');

```

B. Histograma de adyacencia

```
function [vector] = HistogramasAdyacentes(matriz,numfil, numcol)
    hh = zeros(1,numfil);           % Crea el vector de histograma
    horizontal
    hv = zeros(1,numcol);           % Crea el vector de histograma
    vertical
    hha = zeros(1,numfil);
    hva = zeros(1,numcol);
    cont=0; contotal=0; ph=0;
    nh=1;
    while(nh~=(numfil+1))           % Recorre cada una de las filas
        for b=1:numcol               % Recorre todas las columnas de la fila
            asignada
                cont = cont + matriz(nh,b); %Realiza la sumatoria de la
            fila
                if(matriz(nh,b)==1) % Cuenta los tiles con valor igual
                    a uno
                        contotal = contotal + 1;
                    end
                end
            hh(nh)=cont; % Almacena el valor de la sumatoria
            nh=nh+1;
            cont=0;
        end
    end
    for a = 1:(numfil-1) % Recorre el vector del histograma
        horizontal
            hha(a) = abs(hh(a)- hh(a+1)); % Diferencia de los valores
        adyacente
    end
    hha(numfil)=hh(a+1);
    cont=0; pv = 0; cos = 0;
    nv=1;
    while(nv~=(numcol+1)) % Recorre cada una de las columnas
        for a=1:numfil % Recorre todas las filas de la columna
            asignada
                cont = cont + matriz(a,nv);
```

```

        end
        hv(nv)=cont;
        nv=nv+1;
        cont=0;
    end
    for a = 1:(numcol-1) % Recorre el vector del histograma vertical
        hva(a) = abs(hv(a)-hv(a+1)); % Diferencia de los valores
        adyacentes
    end
    hva(numcol)=hv(a+1);
    %-----Vector entrada red neuronal-----
    ---
    vector = zeros(1,numcol+numfil); % Crea el vector de adyacencia
    for d=1:(numfil)
        vector(d)=hha(d);
    end
    for d=1:(numcol)
        vector(d+numfil)=hva(d); % Almacena los valores del hva
    end
end
end

```

C. Ajuste de contraste y remoción de objetos no deseados

```

function Hom = Homogenizacion(imc)
    % REFERENCIAS:
    Zhou, Huilin et al. Illumination invariant enhancement and
    threshold segmentation algorithm for asphalt pavement crack image.
    IEEE. 2010.
    grises = imc;
    %Constante de intensidad base, tomada como la media de la imagen en
    escala de gris por defecto [1] toma A=90
    A=mean2(grises);
    %Constante para el cálculo de los límites superior e inferior
    cte=0.6;
    %Copia de la imagen en escala de gris para tener el mismo size and
    %intensity
    Hom=grises;

```

```

%r es el alto de la imagen(Fila) y c es el Ancho de la
imagen(Columna)
[r c]=size(grises);
%Calculamos el paso o tamaño del lado de la celda, por defecto
dividimos la fila en 32, 16 o 8 celdas
paso=r/16;
%Exceptuamos aquellos píxeles cuya intensidad sea mayor a la media
de la imagen original de escala de gris,
%los cuales fueron igualados a la media de la imagen original de
escala de grises
grises(grises>=A*ones(size(grises)))= A;
%Calculamos el paso correcto o tamaño del lado de la celda para
imagenes
%con dimensiones impares y de esta manera poder recorrer toda la
imagen
while mod(r,paso)~=0 || mod(c,paso)~=0
    paso=round(paso)+1;
end
%Cuantificar el número de recuadros o celdas de la imagen
total=r*c/paso^2;
%Constantes para calcular el factor de amplitud
media=ones(total,1);
minimo=ones(total,1);
maximo=ones(total,1);
Ls=ones(total,1);
Li=ones(total,1);
factor=ones(total,1);
mediamod=ones(total,1);
% Creamos en cada celda una matriz o recuadro de la imagen o un
vector de matrices
Q=cell(total,1);
%Para ir recorriendo cada celda o recuadro
k=1;
for i=1:paso:r;
    for j=1:paso:c
        %Recorremos cada celda o recuadro

```



```

Q{k}=grises(i:i+paso-1,j:j+paso-1);
%Calculamos la media a cada celda o recuadro
media(k)=mean2(Q{k});
%Calculamos el mínimo valor de la celda o recuadro
minimo(k)=min(min(Q{k}));
%Calculamos el máximo valor de la celda o recuadro
maximo(k)=max(max(Q{k}));
%Calculamos el límite superior e inferior
Ls(k)=media(k)+(maximo(k)-media(k))*cte;
Li(k)=media(k)-(media(k)-minimo(k))*cte;
%Exceptuamos los puntos con niveles de gris por fuera
de los límites
mediamod(k)=mean(Q{k}(logical(Q{k}<=Ls(k)*ones(size(Q{k}))&
logical(Q{k}>=Li(k)*ones(size(Q{k}))))));
%Calculamos el factor de amplitud o ajuste f=A/G'm para
cada celda o recuadro, donde G'm es el recalcuulo de la
media o media modificada de intensidades del recuadro
de la imagen en intensidad de grises
factor(k)=A/mediamod(k);
%Modificamos la intensidad con el factor de ajuste I' =
I * f
Hom(i:i+paso-1,j:j+paso-1)=grises(i:i+paso-1,j:j+paso-
1).*factor(k);
k=k+1;
end
end
end

```

D. Segmentación basado en los parámetros de la media y la desviación estándar

```

function segmentada = Umbral_Media_Desviacion(img,B)
% REFERENCIAS:
%Zhou, Huilin et al. Illumination invariant enhancement and
threshold segmentation algorithm for asphalt pavement crack image.
IEEE. 2010.

```

%O. Puan, M. Mustaffar, T. Ling. Automated Pavement Imaging Program For Pavement Cracks Classification and Quantification. Malaysian Journal of Civil Engineering. 1998.

```
media = 0;    ds = 0;
gray = img;
% Extracción de los valores lx = largo y ly = ancho.
[lx,ly] = size(gray);
% Procedimiento para cambiar el formato de la matriz de la imagen
de uint8 a double para permitir realizar procedimientos
matemáticos.
gray = im2double(gray);
n = lx * ly;
media = mean2(gray);
% Cálculo Desviación estándar.
ds = std2(gray);
u = abs(media - (B * ds));
% Proceso de binarización para obtener la imagen final a blanco y
negro teniendo en cuenta la condición de umbral.
for i = 1:lx
    for j = 1:ly
        if gray(i,j) < u
            gray(i,j) = 0;
        elseif gray(i,j) >= u
            gray(i,j) = 1;
        end
    end
end
segmentada = gray;
end
```

E. Eliminación de grietas falsas

- Grietas transversales

```
function regsel = FisurasTransversales(pix,lmax)
w = 1;
CCs = bwlabel(pix);
```

```

s =
regionprops(CCs, 'MajorAxisLength', 'BoundingBox', 'Orientation', 'MinorAxisLength', 'Centroid', 'PixelList', 'Area', 'Eccentricity', 'Perimeter');
for k = 1:length(s)
    Compacidad = ((2*sqrt(pi*s(k).Area))/s(k).Perimeter);
    Excentricidad = s(k).Eccentricity;
    if s(k).MajorAxisLength >= lmax &&
        s(k).MajorAxisLength/s(k).MinorAxisLength >= 1 &&
        s(k).BoundingBox(1,3) >= 2*s(k).BoundingBox(1,4) &&
        abs(s(k).Orientation) <= 25 && (Excentricidad > 0.75 &&
        Excentricidad <= 1 && Compacidad > 0.03 && Compacidad <=
        0.41)
        cl(w) = s(k).PixelList(1,1);
        rw(w) = s(k).PixelList(1,2);
        w = w + 1;
    end
end
if w ~= 1
    regsel = bwselect(CCs, cl, rw, 8);
else
    % Ninguna fisura detectada
    [px,py] = size(CCs);
    regsel = zeros(px,py);
end
end

```

- Grietas longitudinales

```

function regsel = FisurasLongitudinales(pix, lmax)
    w = 1;
    CCs = bwlabel(pix);
    s =
    regionprops(CCs, 'MajorAxisLength', 'BoundingBox', 'Orientation', 'MinorAxisLength', 'Centroid', 'PixelList', 'Area', 'Eccentricity', 'Perimeter');
    for k = 1:length(s)

```

```

    Compacidad = ((2*sqrt(pi*s(k).Area))/s(k).Perimeter);
    Excentricidad = s(k).Eccentricity;
    if s(k).MajorAxisLength >= lmax &&
        s(k).MajorAxisLength/s(k).MinorAxisLength >= 1 &&
        s(k).BoundingBox(1,4) >= 2*s(k).BoundingBox(1,3) &&
        abs(s(k).Orientation) <= 90 && abs(s(k).Orientation) >= 65 &&
        (Excentricidad > 0.75 && Excentricidad <= 1 && Compacidad >
        0.03 && Compacidad <= 0.41)
        cl(w) = s(k).PixelList(1,1);
        rw(w) = s(k).PixelList(1,2);
        w = w + 1;
    end
end
if w ~= 1
    regsel = bwselect(CCs,cl,rw,8);
else
    % Ninguna fisura detectada
    [px,py] = size(CCs);
    regsel = zeros(px,py);
end
end
end

```

- Grietas diagonales

```

function diag = FisurasDiagonales(pix,lmax)
    w = 1;
    CCs = bwlabel(pix);
    s =
    regionprops(CCs,'MajorAxisLength','BoundingBox','Orientation','MinorAxisLength','Centroid','PixelList','Area','Eccentricity','Perimeter');
    for k = 1:length(s)
        a = s(k).MajorAxisLength/2;
        b = s(k).MinorAxisLength/2;
        ellipseArea = pi*a*b;
        boundAreaBox = s(k).BoundingBox(1,3)*s(k).BoundingBox(1,4);
        Compacidad = ((2*sqrt(pi*s(k).Area))/s(k).Perimeter);
    end
end

```

```

    Excentricidad = s(k).Eccentricity;
    if s(k).MajorAxisLength >= lmax && s(k).Area <=
    0.24*boundAreaBox && (ellipseArea <= 0.52*boundAreaBox ||
    s(k).Area <= 0.46*ellipseArea) && (Excentricidad > 0.75 &&
    Excentricidad <= 1 && Compacidad > 0.03 && Compacidad <=
    0.41)
        cl(w) = s(k).PixelList(1,1);
        rw(w) = s(k).PixelList(1,2);
        w = w + 1;
    end
end
if w ~= 1
    diag = bwselect(CCs,cl,rw,8);
else
    % Ninguna fisura detectadas
    [px,py] = size(CCs);
    diag = zeros(px,py);
end
end
end

```

F. Conexión de grietas

```

function seg = Unir(regsel)
    for union=1:4
        w = 1;
        aux = 300;
        ind = 1;
        regd = 1;
        reg = bwlabel(regsel);
        s =
        regionprops(reg, 'MajorAxisLength', 'BoundingBox', 'Orientation', 'MinorAxisLength', 'Centroid', 'PixelList');
        if ~isempty(s)
            if length(s) == 1
                ns(1) = 1;
            else
                for i=1:length(s)-1

```

```

        ns(i) = i;
        ns(i+1) = i+1;
    end
end
b = 1;
for a=1:length(ns)-1
    while a+b <= length(ns)
        for p=1:length(s(ns(a+b)).PixelList)
            maxs1 = length(s(ns(a)).PixelList);
            p2s1(w,1) = s(ns(a)).PixelList(maxs1,1);
            p2s1(w,2) = s(ns(a)).PixelList(maxs1,2);
            dist = sqrt((p2s1(w,1) -
            s(ns(a+b)).PixelList(p,1))^2 + (p2s1(w,2) -
            s(ns(a+b)).PixelList(p,2))^2);
            plsc(w,1) = s(ns(a+b)).PixelList(p,1);
            plsc(w,2) = s(ns(a+b)).PixelList(p,2);
            hor = plsc(w,1) - p2s1(w,1);
            razon = acosd(abs(hor/dist));
            if dist <= aux && razon <= 25 && hor >= 0
                aux = dist;
                ind = p;
                regd = ns(a+b);
            end
        end
        b = b + 1;
    end
    maxs1 = length(s(ns(a)).PixelList);
    p2s1(w,1) = s(ns(a)).PixelList(maxs1,1);
    p2s1(w,2) = s(ns(a)).PixelList(maxs1,2);
    pls2(w,1) = s(regd).PixelList(1,1);
    pls2(w,2) = s(regd).PixelList(1,2);
    plsc(w,1) = s(regd).PixelList(ind,1);
    plsc(w,2) = s(regd).PixelList(ind,2);
    alt = pls2(w,2) - p2s1(w,2);
    hor = pls2(w,1) - p2s1(w,1);

```

```

    if aux <= 150 && abs(alt) <= 50 && hor >= 0 &&
    abs(s(a).Orientation) <= 25 && abs(s(regd).Orientation)
    <= 25
        X = [p2s1(w,1), plsc(w,1)];
        Y = [p2s1(w,2), plsc(w,2)];
        M = (Y(2) - Y(1))/(X(2) - X(1));
        B = Y(1) - M*X(1);
        index = 1;
        for p1=X(1):X(2)
            PixelZ(index,1) = p1;
            PixelZ(index,2) = floor(M*p1 + B);
            index = index + 1;
        end
        for pix=1:length(PixelZ)
            regsel(PixelZ(pix,2),PixelZ(pix,1)) = 1;
        end
        w = w + 1;
        regd = 1;
        ind = 1;
        aux = 300;
    else
        regd = 1;
        ind = 1;
        aux = 300;
    end
    b = 1;
end
end
if union <= 3
    regsel = imrotate(regsel,-90);
    ns = 0;
    X = 0;
    Y = 0;
    M = 0;
    B = 0;
    plsc = 0;

```

```
        PixelZ = 0;
elseif union == 4
    regsel = imrotate(regsel,270);
    ns = 0;
    X = 0;
    Y = 0;
    M = 0;
    B = 0;
    plsc = 0;
    PixelZ = 0;
end
end seg = regsel; end
```


ANEXO B. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA SOFTWARE

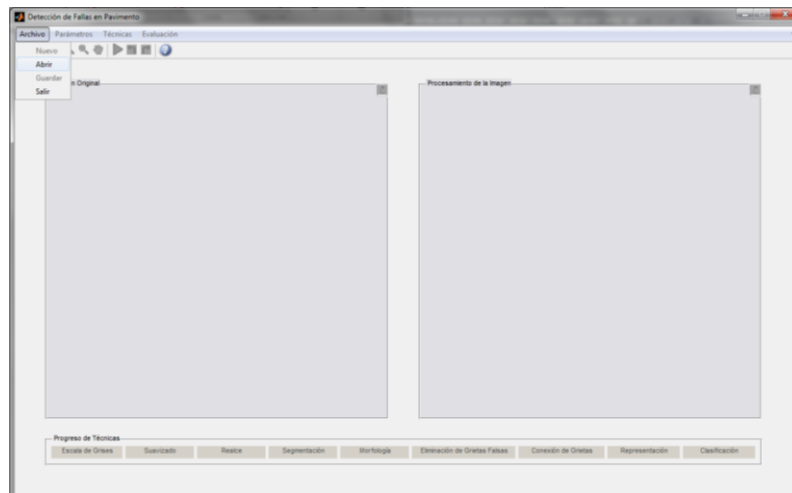
Al ejecutar la herramienta por primera vez aparece una ventana con el logotipo que identifica al programa. La Figura 59 muestra el logotipo de la herramienta software.

Figura 59. Logotipo del programa



Luego se presenta la ventana principal con los siguientes menús: Archivo, Parámetros, Técnicas y Evaluación. En el menú Archivo, solamente se encuentran habilitadas las opciones Abrir y Salir (véase la Figura 60).

Figura 60. Ventana principal




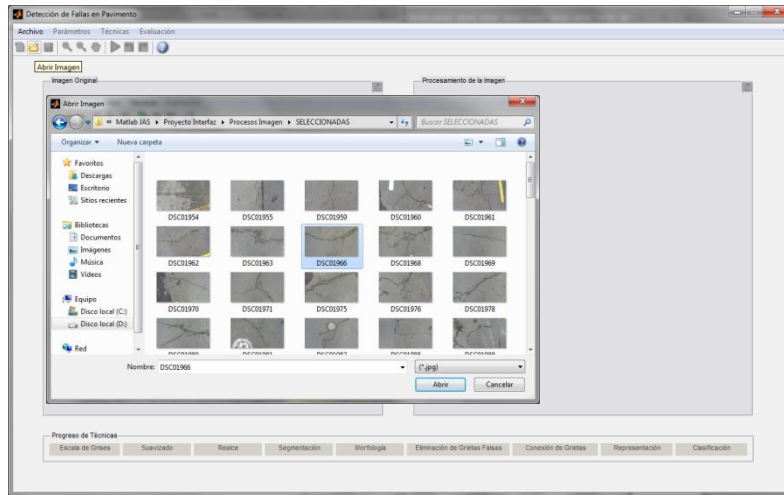
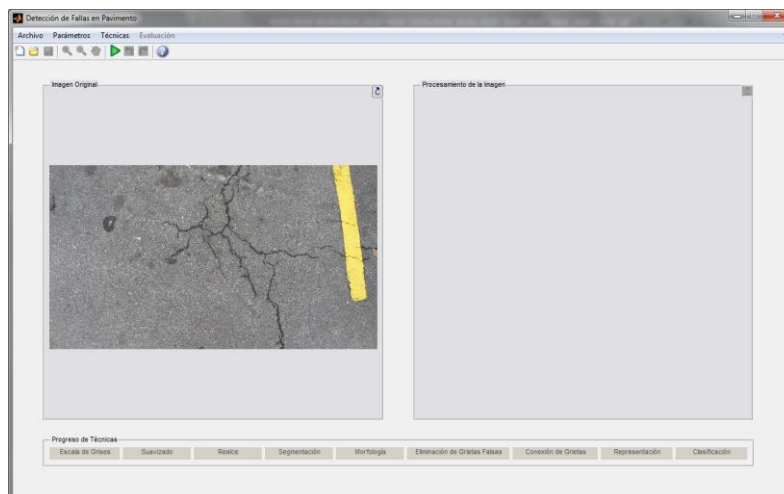
Se procede a cargar la imagen de pavimento para la clasificación de grietas, mediante la opción Abrir o el ícono  ubicado en la barra de herramientas (véase la Figura 61).

Figura 61. Opción Abrir imagen



Una vez cargada la imagen y almacenada en memoria, se habilitarán los menús Parámetros y Técnicas. Estos menús permiten previamente configurar los valores iniciales de las constantes y la secuencia de los algoritmos que han de ejecutarse. La Figura 62 muestra la IU con la imagen cargada, los menús habilitados y la barra de herramientas.

Figura 62. Imagen cargada y menús habilitados



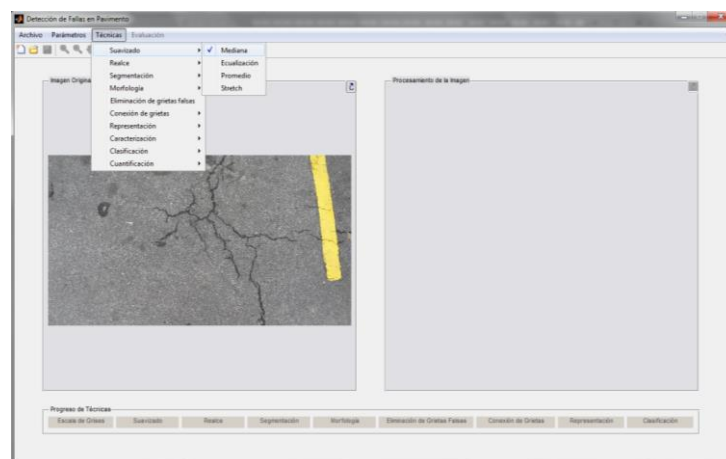
Cuando se hace clic en la opción Modificar Parámetros Iniciales, del Menú Parámetros, se genera un formulario con los valores por defecto de las constantes

utilizadas en cada algoritmo, donde se pueden variar los parámetros o restablecer los valores por defecto (véase la Figura 63).

Figura 63. Formulario para configurar los parámetros iniciales

Posteriormente, desplegando el menú Técnicas, se puede establecer la secuencia de los algoritmos en cada etapa del procesamiento de imágenes. Para esto, se debe chequear el algoritmo de cada proceso. Por defecto, se encuentra el procedimiento propuesto (véase la Figura 64).

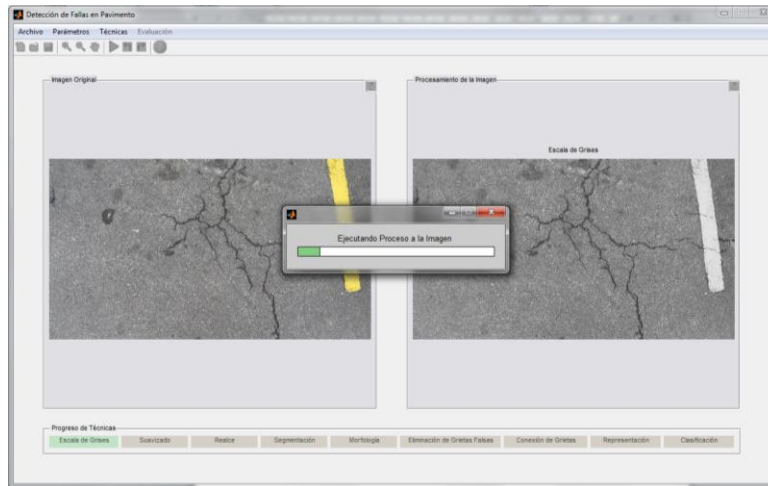
Figura 64. Menú Técnicas



Para iniciar el proceso de análisis, debe darse clic en el ícono Ejecutar Proceso de la barra de herramientas. La herramienta ejecutará cada algoritmo

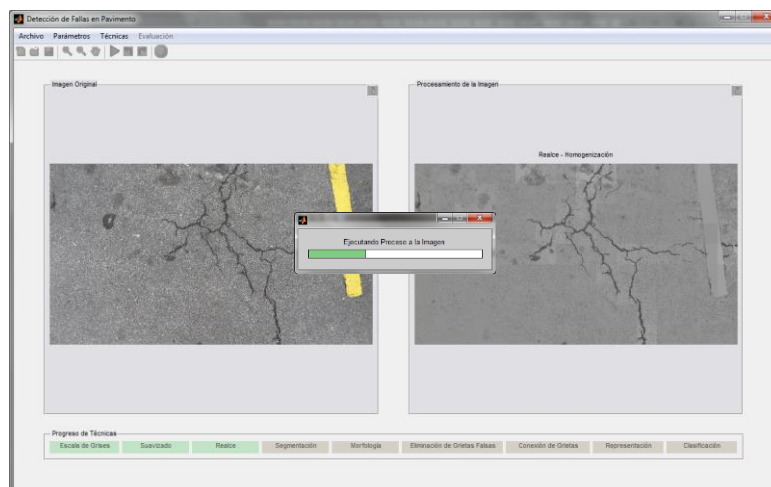
seleccionado, y los resultados de la imagen podrán visualizarse paso a paso en el panel derecho de la IU. En la parte inferior de la IU, se encuentra una barra de estado en cada etapa. Una ventana auxiliar se desplegará para visualizar el estado del proceso (véase la Figura 65).

Figura 65. Inicio del proceso de detección automática de grietas



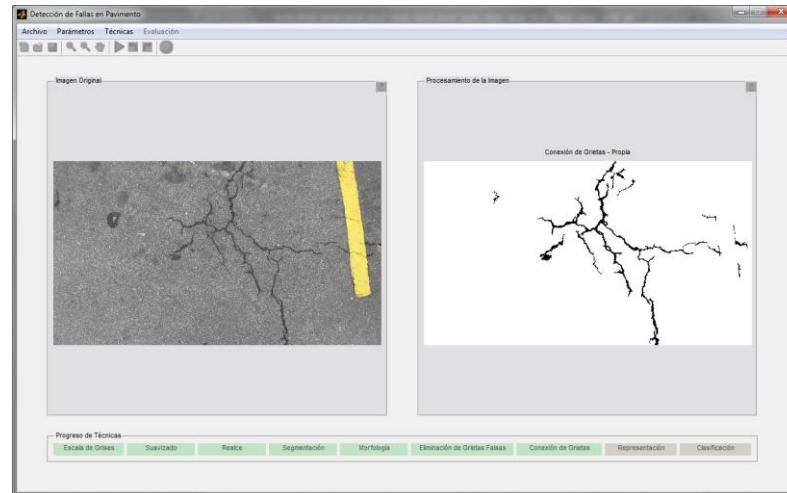
La Figura 66 muestra el resultado del ajuste de contraste de la imagen en el panel derecho de la herramienta *software*.

Figura 66. Proceso en la etapa de ajuste de contraste



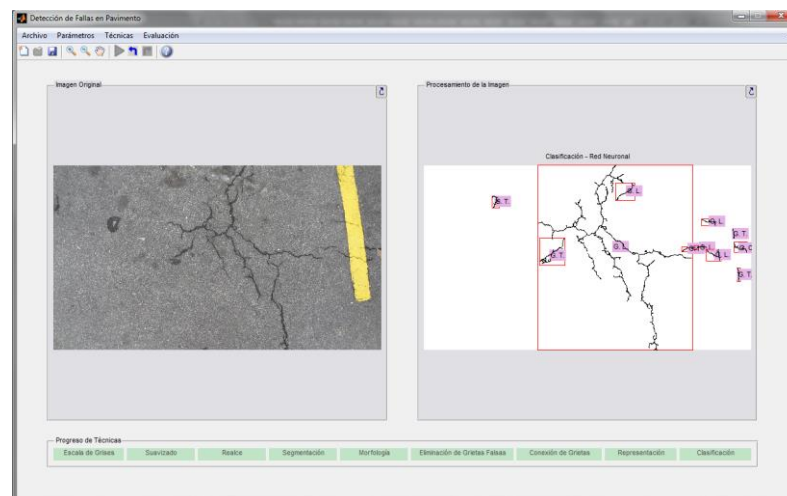
La Figura 67 muestra las grietas detectadas en la imagen cargada.

Figura 67. Resultado del proceso de detección de grietas



Por último, mediante la RNA que obtuvo mejores resultados, se etiqueta cada grieta con su correspondiente clasificación tipo transversal, longitudinal, piel de cocodrilo o bloque (véase la Figura 68).

Figura 68. Clasificación de grietas



Ahora bien, cuando termina el proceso de clasificación, se habilita el menú Evaluación que permite calcular el índice de condición del pavimento aplicando la metodología PCI a la imagen cargada. Para evaluar el PCI, se da clic en la opción Evaluación/PCI. Inmediatamente, se despliega una ventana con el formato para el

cálculo del PCI con los valores asignados automáticamente y el resultado del procedimiento descrito en el capítulo 9 (véase la Figura 69).



Finalmente, al dar clic en el icono  Guardar de la barra de herramientas, se genera un archivo en Excel con los valores utilizados en la evaluación del PCI. Para analizar una nueva imagen, se debe retornar a la ventana principal y dar clic en el botón  Nueva Imagen de la barra de herramientas.

Figura 69. Formato PCI

FORMULARIO_PAVIMENTO_FLEXIBLE

Guardar

ESTUDIO DE LA CONDICIÓN DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

LISTADO DE FALLAS

1. Piel de Cocodrilo	11. Parcheo
2. Exudación	12. Pulimento de Agregados
3. Agrietamiento en Bloque	13. Huecos
4. Abultamientos / Hundimientos	14. Cruce de Vías Férrea
5. Corrugación	15. Ahuellamiento
6. Depresión	16. Desplazamiento
7. Grieta de Borde	17. Grieta Parabólica
8. Grieta de Reflexión de Junta	18. Hinchamiento
9. Desnivel de Carri / Berma	19. Desprendimiento de Agregados
10. Grietas Longitudinales / Transversales	

	TIPO DE FALLA	MEDIDA [m] ó [m²]	SEVERIDAD	SIGLA TF
1	10	0.0727 MEDIA	T	
2	10	1.1187 ALTA	L	
3	10	0.2116 ALTA	T	
4	10	0.1704 MEDIA	L	
5	10	0.0948 MEDIA	L	
6	10	0.0822 MEDIA	L	

	TIPO DE FALLA	DENSIDAD %	SEVERIDAD	VALOR DEDUCIDO
1	10	64.1547 ALTA		78.1516
2	10	34.0385 MEDIA		31.6842
3	10	3.2599 BAJA		1.9477

TOTAL DEDUCIDO	111.7835
VALOR CORREGIDO DEDUCIDO	77.6889

INDICE DE CONDICIÓN DE PAVIMENTO 22.3111

CALIFICACIÓN Muy Pobre

ANEXO C. CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA CÁMARA PIRANHA 2 MEDIANTE EL SOFTWARE XCAP

Instalados el *software* XCAP y el controlador de la tarjeta de captación de imágenes en el sistema operativo Windows 7 con arquitectura de 64 bits, se procede a conectar la tarjeta PIXCI EC1 en el computador Getac B300, para que XCAP Ltd. detecte la tarjeta y pueda ejecutarse correctamente.

Luego, dado que la memoria RAM del computador es de 8 GB, y que la cantidad necesaria para iniciar correctamente Windows 7 (x64) debe ser mayor o igual a 2 GB, se asignan 6 GB de memoria RAM para los *frame Buffers*²⁹, de acuerdo con las siguientes instrucciones, determinadas en el manual de usuario de EPIX Inc. [48]:

- I. En la barra de menús, despliegue el ítem PIXCI® y seleccione PIXCI® Open/Close.
- II. En la ventana emergente, seleccione la opción *Board Info*, e ingrese a la configuración de la memoria.
- III. Seleccione la opción “forzar asignación del *frame buffer*”, y asigne la cantidad de memoria para el sistema operativo, la BIOS y el *frame buffer*.

Sin embargo, cuando se reinicia el sistema operativo, la asignación de memoria establecida desde la interfaz de usuario (IU, de su sigla en inglés) del XCAP no es almacenada, y deja la configuración por defecto; por tanto, se requiere editar los datos de configuración de arranque (BCD³⁰, de su sigla en inglés) del sistema operativo y del registro de entrada para forzar al *software* XCAP que tome los parámetros de memoria asignados. Para esto, se utiliza la herramienta de línea de comandos *BCDEdit* para administrar y almacenar el BCD. Los pasos se resumen a continuación [49]:

²⁹ Una cantidad de RAM u otro tipo de memoria utilizada para guardar una imagen o imágenes temporalmente.

³⁰ *Boot Configuration Data* establece propiedades en la base de datos de arranque para controlar la configuración de arranque de las aplicaciones.

- I. Crear una copia del BCD actual con el comando: ***BCDEDIT /copy {current} /d "PIXCI EC1/UIS"***
- II. Asignar 2 GB para el arranque del sistema operativo con el comando: ***BCDEDIT /set <ID_PIXCI> truncatememory 2147483648***
- III. Ubicar el registro de entrada HKEY_LOCAL_MACHINE\SYSTEM\CurrentControlSet\Services\EPIXXCW 6 y agregar en el registro PIXCI los siguientes parámetros con los valores expresados en kilo bytes:
- IV. -IM 6291456 -IA 2097152 -SM 8388608 -MB 65536 -BH 262144 -MU 2

Donde IM es para reservar el espacio en memoria del *frame buffer*, IA indica desde dónde el *frame buffer* debe comenzar; SM es la cantidad total de memoria RAM; MB es la división en particiones de la memoria especificada en IM; BH, cantidad de memoria reservada para la BIOS, PCI y memoria mapeada de entrada y salida; -MU minimiza el uso de los recursos de memoria del sistema operativo. Este procedimiento de asignación de memoria es principalmente usado para captación de imágenes con secuencias largas, seguido de un análisis fuera de línea. Aunque la tasa de visualización puede disminuir, la captación de imágenes no es afectada [49].

Por otro lado, se realiza la conexión entre la cámara de escaneo por línea Dalsa Piranha 2 a la tarjeta PIXCI EC1 utilizando la interfaz de comunicación *Camera Link*, y mediante la IU del XCAP en el menú *Capture – Adjust* se procede a configurar los parámetros de la cámara y la tarjeta; en primer lugar, el modo de transmisión *Camera Link a media*, los bits y *taps* a 8 bits x 4, la resolución a 4096 píxeles por línea, el color en escala de grises, el modo de captación provisionalmente a *controlled*, la tasa de líneas en 5000 Hz, el tiempo de exposición en 199,7 μ s, el reloj del píxel a 40 MHz y el *Pixel Order Correction* en #08; y, en segundo lugar, se debe pasar la captación de imágenes a modo en vivo y establecer 2048 líneas por imagen. Por último, se guarda la configuración establecida.

ANEXO D. CALIBRACIÓN DE INTENSIDAD DE LA CÁMARA PIRANHA 2

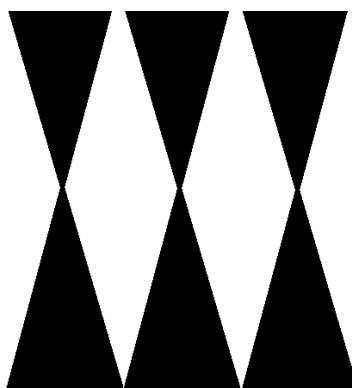
Ahora bien, para realizar este procedimiento, previamente, mediante el *software* XCAP, debe habilitarse el puerto serial en el menú PIXCI® y seleccionarse *PIXCI Serial terminal*. Luego ir al menú *Control – Setup* y en el menú desplegable *Serial Port* seleccionar *Enable*. También se deben enviar los comandos, incluso el retorno de carro (CR), y habilitar esta opción en el menú de control y seleccionar el ítem *opciones* del terminal. Posteriormente, se siguen las instrucciones que se listan a continuación, con base en el manual de usuario de EPIX Inc. [48]:

- I. Verifique que la tensión y la temperatura estén dentro del rango de funcionamiento de la cámara, por medio de los comandos **vt** y **vv**, respectivamente.
- II. Configure la cámara en modo calibrado, mediante el comando **svm 1**.
- III. Especifique el número de líneas por muestra en 64, con el comando **css 64**.
- IV. Ajuste el modo de exposición en 2 con el comando **sem 2**.
- V. Configure los diferentes parámetros de la cámara, de acuerdo con el modo que se utilizará. Esto incluye:
 - En la pestaña actual, de la ventana *Capture & Adjust*, seleccione en el menú desplegable *Camera Link* la opción *Medium*. En el menú *Data Output* seleccione *8 bits x 4*, dado que la cámara es de 4 taps.
 - En la pestaña *Mode*, seleccione la opción *Controlled*. Esto permite configurar el *Line Rate* y *Exposure Time* junto con otras opciones. Estas se deben configurar de acuerdo con el entorno de captación. Para el laboratorio el *Line Rate* y *Exposure Time* se establecieron en 5000 Hz y 199.7 μ s, respectivamente.
 - En la pestaña *Multitap*, seleccione en el menú desplegable *Pixel Order Correction* la opción #08.
- VI. Configure la ganancia (analógica y digital) y el ófset (analógico y digital) con los comandos **sg**, **ssg**, **sao** y **sd**, respectivamente. Cada uno de estos

comandos va seguido por los valores ***t i***, donde *t* indica el *tap* seleccionado e *i* el valor asignado.

- VII. Seleccione el tamaño de muestras con ***css i*** (deje *i* en 64). Esto permite que, al realizar la calibración, la cámara utilice un número determinado de muestras (64 es la mayor). Cuando la señal fue baja o alta, fue necesario reducir el ófset o la ganancia con el comando ***sao*** y ***sg***.
- VIII. Aplique el comando ***ccf*** con el lente de la cámara tapado; esto realiza la calibración en negro. Se debe asegurar previamente que el valor de los píxeles esté entre 1 y 127 DN³¹.
- IX. Con el lente abierto y apuntando a una superficie blanca iluminada, de material acrílico, introduzca el comando ***ccp***. Automáticamente, se realiza la calibración en blanco. El valor de los píxeles debe estar entre 128 y 254 DN.
- X. Identifique la zona de visión de la cámara, revisando los valores generados con el comando ***gl*** cuando se proyecta la cámara sobre el patrón que se muestra en la Figura 70.
- XI. Guarde los coeficientes con el comando ***wpc*** y la configuración del usuario con ***wus***.

Figura 70. Patrón para identificar la zona de visión



³¹ *Digital Numbers*. Hace referencia al nivel de gris de cada píxel.

ANEXO E. ADQUISICIONES CON SEÑALES DEL CODIFICADOR RELATIVO

En primer lugar, para activar la obturación de la cámara por medio de las entradas del codificador, se deben hacer las siguientes configuraciones a la tarjeta mediante el *software* XCAP:

- I. Conecte las señales Aa y Bb a los puertos *trigger* y *strobe* de la tarjeta.
- II. En la ventana *Capture –Adjust*, vaya a la pestaña *Reg*, y en *Lines per image*, configure el número de líneas por imagen. En este caso, se seleccionó 2048.
 - i. Configure en la pestaña *Trig* el *Line Rate* a 36000 Hz (el máximo soportado por la cámara), y en el menú desplegable *Trigger Input*, seleccione *Rising Edge*. También se debe hacer el cambio en el *Line Rate* vía *Serial Port* con el comando **ssf 36000**.
- III. Ajuste al máximo la tasa de líneas controladas.
- IV. Elija la entrada de activación como flanco de subida en la pestaña *Trig*, y en el menú *drive*, seleccione *Mastered*. Esta opción permite iniciar la toma de imágenes con un contador de líneas interno al codificador.
- V. Configure la cámara con sincronización externa. Esto se logra con el comando **sem i**, donde el parámetro *i* puede ir de 3 a 6. En este caso, se seleccionó el modo 3, que permite obtener el máximo tiempo de exposición.

Después de estas configuraciones básicas, se debe ir a la ventana de estado de la tarjeta para escribir en el registro de control y verificar el estado de los otros dos registros. En el menú *PIXCI – PIXCI Status* se encuentra la pestaña *EC1/UIS*, donde se presentan los registros INGTC, INGCR e INGCC. El procedimiento para la obturación es el siguiente:

- I. Escriba en los bits [31:3] del registro INGCR el número de pulsos antes de que la tarjeta envíe una señal de activación a la cámara.
- II. Escriba en el bit 2 (CRC) del registro INGCR '1' para habilitar la adquisición de imágenes.

- III. Escriba '1' o '0' en el bit 1 (CRD) del registro INGCR para indicar la dirección de rotación en la que se quiere realizar la adquisición.
- IV. Escriba un 0 en el bit 0 (CRR) del registro INGCR.

Para adquirir una imagen, después de configurar el *software* y el registro de control, se debe ir al menú *capture*, seleccionar el número de *buffers* que se van a utilizar y el modo de captación con evento libre. Finalmente, se inicia la adquisición dando clic en el botón de grabar.

ANEXO F. CAPTACIÓN Y GUARDADO DE LAS IMÁGENES CON LA CÁMARA PIRANHA 2

Siga las instrucciones que se listan a continuación, con base en el manual de usuario de EPIX Inc., para la captación y el guardado de las imágenes mediante el *software* XCAP s[48]:

- I. Conecte las señales A y B del codificador a los puertos *Trigger* y *Strobe* de la tarjeta de captación de imágenes.
- II. Configure la cantidad de memoria que se asignará a los *frame buffers*.
- III. En la pestaña *Res*, configure la opción *Lines per image* a 2048.
- IV. Con el comando **ssf**, establezca el *Line Rate* en el máximo permitido por la cámara (36000).
- V. En la pestaña *Trig*, seleccione en el menú desplegable *Trigger input* la opción *Rising Edge*, y en el menú *V Drive*, seleccione *Mastered*.
- VI. En el *Serial Port*, configure la cámara para sincronización externa con el comando **sem 3**.
- VII. Vaya a *PIXCI – PIXCI Status* y seleccione la pestaña *EC1/UIS*. En el cuadro *I-R Quadrature Control*, ingrese en los bits 31 a 3 el número de pulsos en el codificador antes de tomar una foto, y en los bits 2 a 0, la habilitación, dirección y *reset*, respectivamente.
- VIII. Vaya a *Capture*, luego *Sequence Capture & Video to frame buffers*, seleccione en el modo de captación una secuencia lineal, para que la adquisición de datos se detenga cuando se llenen los *frame buffers*. Luego elija el número de *buffers* que se utilizarán y las opciones *Live Video at Video Interval* y *Event Free*.
- IX. Para empezar a grabar las imágenes, dé clic en *Record*.
- X. Para detener la captación de imágenes en cualquier momento, haga clic en *Stop*; de lo contrario, al llenarse los *frame buffers*, la captación de imágenes se detendrá automáticamente.

- XI. En la pestaña *Display*, seleccione la casilla *Slow rate to display images* para que pueda visualizar las imágenes, pero no a la misma velocidad de captación; de esta forma, se puede ir verificando la calidad de la imagen bajo los parámetros actuales de la cámara.
- XII. Una vez captadas las imágenes, vaya a *File – Save sequence* y seleccione el nombre y el formato deseados para guardar.
- XIII. Para guardar todos los *frame buffers* utilizados de manera más rápida, dé clic en “*Save Frame Buffer Memory*” del menú *File*. En este menú, debe seleccionarse la cantidad de *frame buffers* que se guardarán, iguales a los *frame buffers* utilizados.
- XIV. Posteriormente, cuando se desee realizar la conversión a cualquier formato, se debe ir al menú *File* y seleccionar la opción “*Load Frame Buffer Memory*”, luego indicar el número de *frame buffers* y dar clic en OK.

ANEXO G. REGULACIÓN DE TENSIÓN PARA LA CONEXIÓN DE LOS DISPOSITIVOS

Como el codificador y la cámara requieren alimentación 12 V DC, y la batería del vehículo varía su tensión de 7 V a 13,8 V, de acuerdo con su carga y el estado del motor, se conectó un circuito intermedio que toma la energía directamente de la batería, la regula a tensión de 12 V DC, y cuenta con protección de altas corrientes.

Por otro lado, la señal generada por el codificador relativo tiene una tensión de 1,5 V menor que la de alimentación, es decir, que genera pulsos de 10,5 V, si se alimenta con 12 V DC. Esta tensión de salida es mayor que la admitida por la tarjeta de captación, de 3,3 V; por tanto, se realizó un circuito de acondicionamiento de estas señales. Además, en esta etapa se recibe la tensión regulada a 12 V DC, y se suministra alimentación a la cámara y al codificador.

ANEXO H. INVESTIGACIONES GENERADAS

El desarrollo de la investigación ha contribuido con la generación de conocimiento mediante la dirección de trabajos de grado y la publicación de resultados en revistas científicas relacionadas con esta área temática, que se mencionan a continuación:

A. Trabajos de grado finalizados

- CASTILLO RANGEL, Miguel, y MESAR RIBERO, Sulay. Algoritmo para Reconocimiento de Fallas tipo Fisura en Pavimento Rígido mediante Tratamiento de Imágenes Digitales. Bucaramanga, 2011, 95 p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander. Facultad Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil.
- MEZA SANTOS, Jonathan, y PICO VERA, Cristhian. Sistema para la Captación, Georreferenciación y Publicación de Imágenes Digitales del Pavimento de Vías Urbanas. Bucaramanga, 2011, 118 p. Trabajo de grado (Ingeniero de Sistemas). Universidad Industrial de Santander. Facultad Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática.

B. Trabajos de grado en ejecución

- ALARCÓN SANABRIA, Miguel, y SAAVEDRA GARCÍA, Jahír. Herramienta *software* para el reconocimiento de fallas tipo desprendimientos en pavimento flexible. Bucaramanga, 2013. Plan aprobado (Ingeniero de Sistemas). Universidad Industrial de Santander. Facultad Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática.

C. Artículos publicados

- PORRAS, Hernán; SANABRIA, Duván, y MEJÍA, Yuri. Sistema Automático para la Adquisición de Imágenes de Vías Pavimentadas. Revista Gerencia Tecnológica Informática. Vol. 12, No 32. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2013, 18 p.
- PORRAS, Hernán; CASTAÑEDA, Eduardo; SANABRIA, Duvan, y MEDINA, Manuel. Detección Automática de Grietas de Pavimento Asfáltico aplicando Características Geométricas y Descriptores de Forma. Revista INGE CUC. Vol. 8, No 1. Barranquilla: Universidad de la Costa, 2012, 13 p.