

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



TESIS

**“EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE
MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN ESPECTRAL CONTENIDA EN
IMÁGENES SATELITALES”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

GARCIA BASHUALDO FERNANDO

ID: 0000-0001-8442-0368

ASESOR

PhD. MIGUEL LUIS ESTRADA MENDOZA

ID: 0000-0002-8646-3852

LIMA- PERÚ

2025

© 2025, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir de la Tesis en su totalidad o en parte,
con fines estrictamente académicos.”**

Garcia Bashualdo, Fernando
fgarciab@uni.pe
990870467

AGRADECIMIENTOS

Quiero dedicar este trabajo de investigación, con todo mi amor y gratitud, a Dios. A mi esposa Katy, gracias por tu comprensión, paciencia y constante aliento. A mi familia, quienes me han brindado su apoyo incondicional a lo largo de este proceso. A mis amigos del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), por su compañía y valiosa colaboración. Finalmente, a mi asesor, por su orientación y por ser un verdadero guía en cada etapa de esta investigación.

ÍNDICE

	Página
Resumen.....	3
Abstract.....	4
Prólogo.....	5
Lista de tablas	6
Lista de figuras.....	7
Lista de símbolos y siglas.....	9
Capítulo I: Introducción	10
1.1 Generalidades.....	10
1.2 Problemática	10
1.3 Hipótesis	12
1.3.1 Hipótesis general.....	12
1.3.2 Hipótesis específicas.....	12
1.4 Objetivos de la tesis.....	13
1.4.1 Objetivo principal:.....	13
1.4.2 Objetivos específicos:	13
1.5 Organización de la tesis.....	14
Capítulo II: Marco teórico y conceptual	15
2.1 Definición del pavimento asfáltico.....	15
2.1.1 Estructura de un pavimento asfáltico	15
2.1.2 Clasificación de los pavimentos	15
2.1.3 Pavimentos flexibles.....	15
2.2 Índice de condición del pavimento (PCI).....	16
2.3 Principios físicos de la teledetección	18
2.3.1 Espectro electromagnético	19
2.4 Resolución de un sistema sensor en teledetección	20
2.4.1 Resolución espacial	21
2.4.2 Resolución espectral	21
2.4.3 Resolución radiométrica	22
2.5 Firmas espectrales.....	23
2.6 Spectral angle mapper (SAM).....	24
Capítulo III: Metodología para el procesamiento de datos espectrales.....	25

3.1	Descripción de la zona de trabajo	25
Capítulo IV: procesamiento de imágenes adquiridas remotamente y análisis...		41
4.1	Adquisición de imagen satelital worldview-3.....	41
4.2	Corrección atmosférica.....	42
4.3	Pansharpening	43
4.3.1	Creación de una banda simulada de baja resolución	44
4.3.2	Ortogonalización mediante gram-schmidt	44
4.3.3	Reemplazo y ajuste	44
4.4	Calibración de la reflectancia.....	45
4.5	Corrección geométrica.....	46
4.6	Clasificación espectral	47
Capítulo V: Comparación de resultados y calibración del sistema automatizado		49
5.1	Resultados de la comparación	50
5.2	Interpretación de resultados	51
Conclusiones.....		52
Recomendaciones		53
Referencias bibliográficas.....		54
Anexo 01 Ficha técnica Espectroradiómetro.....		57
Anexo 02 Especificaciones técnicas de worldview-3		60
Anexo 03 Fichas de puntos de control GNSS		62
Anexo 04 Fichas técnicas de firmas espectrales		65
Anexo 05 Levantamiento de campo PCI		87

Resumen

La presente tesis propone una metodología que integra la espectrometría aplicada a pavimentos flexibles con el análisis de imágenes satelitales, desarrollando una herramienta remota y automatizada para evaluar el deterioro superficial de los pavimentos. Se utilizaron imágenes satelitales capturadas por el sensor WorldView-3 en la zona norte del distrito de Ancón y la carretera Panamericana Norte, las cuales fueron post-procesadas para su análisis. Las firmas espectrales de los daños superficiales en la carpeta asfáltica se extrajeron utilizando un espectrorradiómetro portátil ADC, basadas en el catálogo de fallas del Índice de Condición del Pavimento (PCI).

Tras un proceso de filtrado y validación estadística, se creó una biblioteca de firmas espectrales representativas de las condiciones superficiales del pavimento flexible. Estas firmas mostraron diferencias significativas en su respuesta espectral, permitiendo su clasificación según el grado de pérdida de asfalto, validando la hipótesis de que es posible discriminar los diferentes estados de deterioro mediante firmas espectrales. La clasificación temática de las imágenes satelitales se realizó mediante el algoritmo SAM (Spectral Angle Mapper), logrando correlaciones superiores al 70 % en la exactitud global de la clasificación.

Este trabajo no solo presenta una alternativa eficiente para la evaluación de pavimentos, sino que también ofrece una herramienta accesible para la gestión y mantenimiento periódico de la infraestructura vial.

Palabras clave: Pavimento Flexible, Teledetección, Firmas Espectrales, Índice De Condición Del Pavimento (PCI)

Abstract

This thesis proposes a methodology that integrates spectrometry applied to flexible pavements with the analysis of satellite images, developing a remote and automated tool for evaluating the surface deterioration of pavements.

Satellite images captured by the WorldView-3 sensor were used in the northern area of the Ancón district and the Panamericana Norte highway, which were post-processed for analysis. Spectral signatures of surface damage in the asphalt layer were extracted using an ADC portable spectroradiometer, based on the Pavement Condition Index (PCI) failure catalog.

Through a process of filtering and statistical validation, a library of spectral signatures representative of the surface conditions of flexible pavement was created. These signatures showed significant differences in their spectral response, allowing their classification according to the degree of asphalt loss and validating the hypothesis that it is possible to differentiate between various states of deterioration through spectral signatures. The thematic classification of satellite images was performed using the SAM (Spectral Angle Mapper) algorithm, achieving correlations higher than 70 % in global classification accuracy.

This work not only presents an efficient alternative for pavement evaluation but also provides an accessible tool for the periodic management and maintenance of road infrastructure.

Keywords: Flexible Pavement, Remote Sensing, Spectral Signatures, Pavement Condition Index (PCI)

Prólogo

La presente investigación se enfoca en desarrollar una metodología innovadora que combina la espectrometría aplicada a pavimentos flexibles con el análisis de imágenes satelitales para la evaluación del deterioro superficial de las carreteras. A lo largo de este trabajo, se presenta un enfoque automatizado y remoto que busca optimizar la detección de fallas en la carpeta asfáltica, contribuyendo de manera significativa a la gestión y mantenimiento de la infraestructura vial.

El **Capítulo I** introduce el contexto general de la problemática y plantea los objetivos de la investigación, abordando la necesidad de una herramienta eficaz que supere las limitaciones de los métodos tradicionales de evaluación, como el Índice de Condición del Pavimento (PCI). En el **Capítulo II**, se desarrolla el marco teórico que sustenta la integración de la espectrometría con la teledetección, explicando los principios fundamentales de estas técnicas y su relevancia para el estudio del pavimento flexible.

El **Capítulo III** describe la metodología aplicada, detallando los procesos de recolección y análisis de datos espectrales tanto en campo como a partir de imágenes satelitales capturadas por el sensor WorldView-3. En el **Capítulo IV**, se exponen los procedimientos utilizados para el procesamiento de las imágenes y el análisis espectral, destacando el uso de herramientas avanzadas de clasificación temática como el algoritmo SAM (Spectral Angle Mapper).

Finalmente, en el **Capítulo V**, se presentan los resultados de la investigación, comparando los métodos propuestos con las técnicas tradicionales y demostrando la efectividad de la nueva metodología para la clasificación y evaluación del estado de los pavimentos. Este trabajo culmina con las conclusiones y recomendaciones, aportando una herramienta útil y accesible para el monitoreo continuo de la red vial, tanto para entidades gubernamentales como para actores privados.

Lista de tablas

Tabla 1.	Catálogo de Fallas del pavimento flexible para el método PCI	17
Tabla 2.	Especificaciones técnicas de las imágenes del Word View-3 (Digital Glove, 2016)	28
Tabla 3.	Clases de pavimento según la perdida de aglomerante	32
Tabla 4.	Alturas de instrumentales	34
Tabla 5.	Registro de firmas espectrales levantadas en campo	37
Tabla 6.	Ficha de Firmas Espectral	40
Tabla 7.	Matriz de Confusión	50
Tabla 9.	Clasificación del pavimento	86
Tabla 10.	Muestras levantadas en campo	86

Lista de figuras

Figura 1.	Estructura típica de pavimento flexible. Recuperado de Reyes y Rondón (2022)	16
Figura 2.	Caracterización del envejecimiento del pavimento asfáltico a partir de los patrones de agrietamiento	18
Figura 3.	Esquema de una onda Electromagnética. Se muestran los vectores eléctricos (E) y magnéticos (M), perpendiculares entre ellos, de una onda electromagnética.	19
Figura 4.	Espectro electromagnético	20
Figura 5.	Imagen satelital a diferentes resoluciones espaciales. Recuperado de González y Martínez (2019).	21
Figura 6.	Número y ancho de bandas de imágenes con distinta resolución espectral.	22
Figura 7.	Imagen satelital a distinta resolución radiométrica.	22
Figura 8.	Comparación de las firmas espectrales.....	23
Figura 9.	Representación gráfica del algoritmo Spectral Angle Mapper (SAM) para la clasificación espectral.....	24
Figura 10.	Vista de la ubicación de la zona es estudio	25
Figura 11.	Vista de la imagen satelital WV3 utilizada	26
Figura 12.	Satélite World View-3 tomado de Digital Globe	27
Figura 13.	RPAS Phantom 4 PRO con sus accesorios	29
Figura 14.	Receptor Geodésico NOVATEL ProPak-V3.....	30
Figura 15.	Espectrorradiómetro de mano ASD HandHeld2	30
Figura 16.	Modelo de superficie digital global de ALOS	31
Figura 17.	Levantamiento en campo de firmas espectrales	35
Figura 18.	Calibración del espectrómetro	36
Figura 19.	Esquema de muestreo de las firmas espectrales	36
Figura 20.	Vista de la interfaz del programa ViewSpecPro	38
Figura 21.	Pavimentos flexibles según el nivel de condición en tres clases: a) Malo PCI 25 b) Regular PCI 60 c) Bueno PCI 80.....	39
Figura 22.	Vista de la estructura de archivos de la imagen WV3	42
Figura 23.	Interfaz del programa para la entrada de parámetros atmosféricos.	43
Figura 24.	Las imagines antes (derecha y centro) y el producto final (izquierda). ...	45
Figura 25.	Reflectancia de un píxel de la imagen.....	46
Figura 26.	Ubicación de puntos de control GNSS	47
Figura 27.	Clasificación del pavimento de la zona de estudio	48

Figura 28.	Distribución de las muestras levantadas en campo.....	49
Figura 29.	En la imagen de la izquierda esta la clasificación propuesta y en la derecha las muestras recolectadas en campo para su comparación.	52

Lista de símbolos y siglas

GIS	Geographic Information System (Sistema de Información Geográfica)
MTC	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
PCI	Índice de Condición del Pavimento
RENAC	Registro Nacional de Carreteras
SAM	Spectral Angle Mapper (Algoritmo de Mapeo de Ángulo Espectral)
UAV	Unmanned Aerial Vehicle (Vehículo Aéreo No Tripulado)
USGS	United States Geological Survey (Servicio Geológico de los Estados Unidos)
VANT	Vehículo Aéreo No Tripulado
GNSS	Global Navigation Satellite System (Sistema Global de Navegación por Satélite)
WV3	WorldView-3
CISMID	Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres
ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales)

Capítulo I: Introducción

1.1 Generalidades

La presente investigación se aboca en integrar la espectroscopia de las diferentes coberturas del pavimento flexible con la espectroscopia de una imagen multiespectral WorldView-3 con el objeto de identificar y discriminar los diferentes estados del deterioro superficial del pavimento flexible, utilizando técnicas de clasificación orientadas a pixel SAM (Spectral Angle Mapper) que tienen su base en la similitud espectral de las muestras tomadas en campo y la información espectral contenida en la imagen satelital. Logrando así una diferenciación acertada de la superficie del pavimento flexible. La investigación busca elaborar una metodología que complemente a las diferentes técnicas de supervisión superficial, entre ellas el **PCI** (Pavement Condition Index), teniendo como ventajas con respecto a los métodos clásicos: la automatización del proceso, monitoreo a distancia y el procesamiento de grandes tramos de una carretera para su diagnóstico.

1.2 Problemática

El Perú al ser un país de gran extensión territorial (1 285 216,20 km²) necesita para su integración física de vías de transporte, destacando su red de carreteras dividida en tres niveles: nacional, departamental y vecinal sumando en total 149,659 km de carretera entre pavimentada, afirmada y no afirmada (Registro Nacional de Carreteras –RENAC resumen general 2012).

Por otra parte, las carreteras de la red vial nacional son en su mayoría de pavimento flexible esto debido a su bajo costo inicial. El Perú tiene alrededor de 18,000 km (RENAC año 2012) de carretera pavimentada que están sujetas a múltiples factores (tráfico, factores ambientales entre otros) que ocasionan la disminución de la condición de servicio de las vías y teniendo como política del estado que se dé prioridad a la conservación de la infraestructura y, de manera específica, determina: ampliar la cobertura de conservación de la red de carreteras mejorando la transitabilidad el nivel de servicio, fortalecer la gestión de conservación vial. Lo que obliga a los administradores de estas a realizar actividades de mantenimiento y

rehabilitación de manera periódica, entre los requerimientos para tal fin está el monitoreo de la condición superficial del pavimento flexible en dichas vías.

Las técnicas usadas actualmente (índice de condición del pavimento PCI, entre otras) en el país para la determinación de la condición superficial del pavimento flexible consisten en métodos de inspecciones visuales que estiman la regularidad superficial del pavimento y determinan el nivel de las fallas superficiales presentes en el pavimento. Presentando estas técnicas algunas desventajas como: la gran cantidad de volumen de información que se tiene que procesar, la demora para obtener la información requerida, la experiencia del personal que realiza la evaluación lo que implica una subjetividad de los datos obtenidos con estos métodos.

Es en este contexto que nace la necesidad de elaborar una herramienta de bajo costo, con gran cobertura y capacidades de evaluación a distancia, donde las facilidades de adquisición de imágenes satelitales, la gran calidad de la resolución espacial, espectral de éstas y la múltiple gama de nuevos sensores instalados en los satélites nos permitiría el desarrollo de una nueva herramienta de clasificación automatizada de las imágenes satelitales para evaluar los daños y estados de la carpeta asfáltica.

Adicionalmente, del gran potencial de su aplicación se busca conseguir una herramienta eficaz para el control o monitoreo de las diferentes vías asfaltadas que pueda beneficiar a los organismos estatales (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, gobiernos regionales, entre otras instituciones) o privados (contratista-concesionario) encargados de la administración de la infraestructura vial.

1.3 Hipótesis

La presente investigación se sustenta en las siguientes hipótesis

1.3.1 Hipótesis general

La integración de la espectrometría del pavimento flexible y la espectrometría de las imágenes satelitales nos permita elaborar una metodología con una moderada correlación con el fin de evaluar remota y automatizada del deterioro superficial en pavimentos.

1.3.2 Hipótesis específicas

- 1) Existen diferencias significativas entre los espectros de los distintos niveles de deterioro del pavimento flexible tomados en el campo que nos permitan discriminarlos y diferenciarlos, y pueden integrarse adecuadamente con la espectroscopia de imágenes satelitales.
- 2) Clasificando las imágenes multiespectrales WorldView-3 con las técnicas Spectral Angle Mapper (SAM) se pueda discriminar los diferentes estados superficiales del pavimento flexible.
- 3) La clasificación temática en imágenes multiespectrales WorldView-3 muestra una correlación mayor al 70% entre las clases predichas y clases reales del pavimento.

1.4 Objetivos de la tesis

La presente investigación tiene los siguientes objetivos:

1.4.1 Objetivo principal:

Desarrollar una metodología, basada en el análisis del contenido espectral de las imágenes adquiridas remotamente a través de los satélites u otro tipo de plataforma, que permita la evaluación superficial del estado de la carpeta asfáltica, por medio del procesamiento digital de imágenes y automatizado esta evaluación para que sea usada en la gestión y mantenimiento de la infraestructura vial.

1.4.2 Objetivos específicos:

Elaborar una biblioteca de firmas espectrales de los daños encontrados en una estructura de pavimento flexible con la ayuda de un espectrómetro portátil permitiendo la integración entre la espectroscopia de campo y la espectroscopia satelital

Elaborar la clasificación del estado superficial del pavimento flexible mediante las técnicas de clasificación: Spectral Angle Mapper (SAM)

Elaborar una comparación utilizando la nueva herramienta propuesta con otros métodos tradicionales para evaluar la exactitud temática de la clasificación del estado de la capeta asfáltica.

1.5 Organización de la tesis

La presente tesis está organizada en cinco capítulos, estructurados de manera que cada uno contribuye al desarrollo integral de la investigación.

En el **Capítulo II**, se presenta el Fundamento Teórico, que sustenta los conceptos clave sobre los cuales se basa todo el estudio. Se abordan los principios fundamentales de la teledetección, las técnicas de clasificación orientadas a píxeles utilizadas, los fundamentos teóricos del pavimento flexible, así como una explicación detallada de los métodos tradicionales de evaluación superficial del pavimento, entre otros aspectos relevantes.

El **Capítulo III** se enfoca en describir el área de estudio y la metodología aplicada para la creación de la biblioteca espectral. Aquí se detallan los procedimientos utilizados para capturar, organizar y procesar los datos espectrales.

En el **Capítulo IV**, se expone el procesamiento de la información espectral contenida en las imágenes satelitales. Se detalla el uso de las diferentes herramientas empleadas en esta investigación para el análisis de los datos espectrales y su interpretación.

El **Capítulo V** presenta los resultados de la clasificación temática de las imágenes satelitales, comparando estos con los métodos tradicionales, como el Índice de Condición del Pavimento (PCI). También se lleva a cabo un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos a lo largo de la investigación.

En la parte final de la investigación se presentan las conclusiones y las recomendaciones basadas en los hallazgos y análisis realizados durante el desarrollo de esta investigación.

Capítulo II: Marco teórico y conceptual

2.1 Definición del pavimento asfáltico

El pavimento asfáltico es una estructura vial multicapa, compuesta por una serie de capas horizontales formadas por materiales seleccionados, cuyo propósito principal es distribuir las cargas vehiculares y resistir las condiciones del entorno. Este tipo de pavimento se apoya sobre una subrasante natural o una plataforma, que puede ser una subrasante mejorada, estabilizada, o un terraplén, conocida comúnmente como capa de conformación (Miranda, 2010; Suárez, 2012). El objetivo fundamental de los pavimentos asfálticos es ofrecer una superficie de rodadura segura y confortable para los vehículos, mientras que cada capa debe soportar las condiciones adversas del medio ambiente.

2.1.1 Estructura de un pavimento asfáltico

Las capas que conforman un pavimento asfáltico son las siguientes:

- **Capa de rodadura:** Es la capa superior, que puede ser bituminosa (flexible), de concreto de cemento Portland (rígido) o de adoquines. Su función principal es soportar el tránsito vehicular, recibiendo directamente las cargas del tráfico.
- **Base:** Se encuentra inmediatamente debajo de la capa de rodadura, encargada de distribuir y transmitir las cargas del tránsito hacia las capas inferiores. Esta capa puede estar compuesta por materiales granulares drenantes, con un Índice de Capacidad de Soporte de California (CBR) mayor o igual al 80%, o puede ser tratada con ligantes como asfalto, cal o cemento.
- **Subbase:** Diseñada para soportar la base y la capa de rodadura, su función también incluye el drenaje y el control de la capilaridad del agua. Dependiendo del diseño del pavimento, esta capa puede ser opcional. Generalmente, está constituida por materiales granulares con un CBR igual o superior al 40%, o tratada con asfalto, cal o cemento (Pérez, 2009).

2.1.2 Clasificación de los pavimentos

Los pavimentos pueden clasificarse en función de su estructura y componentes, agrupándose en las siguientes categorías:

1. Pavimentos flexibles
2. Pavimentos con capas asfálticas gruesas
3. Pavimentos con capas tratadas con ligantes hidráulicos
4. Pavimentos con estructuras mixtas
5. Pavimentos con estructuras inversas
6. Pavimentos rígidos
7. Pavimentos articulados o de adoquín
8. Pavimentos semirrígidos

2.1.3 Pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles se componen de una capa asfáltica sobre capas de menor rigidez, constituidas por materiales granulares no tratados o tratados con ligantes.

Estas capas incluyen la base, la subbase, el afirmado y, en algunos casos, una subrasante mejorada o material de conformación. La capa asfáltica en los pavimentos flexibles puede estar compuesta por la carpeta de rodadura, la base intermedia y la base asfáltica. En situaciones de bajo tráfico, puede estar formada únicamente por la capa de rodadura.

Entre los tipos de capas de rodadura asfáltica, se incluyen el mortero asfáltico, tratamientos superficiales bicapa, micropavimentos, macadam asfáltico, mezclas asfálticas en frío y mezclas asfálticas en caliente (Suárez, 2012).

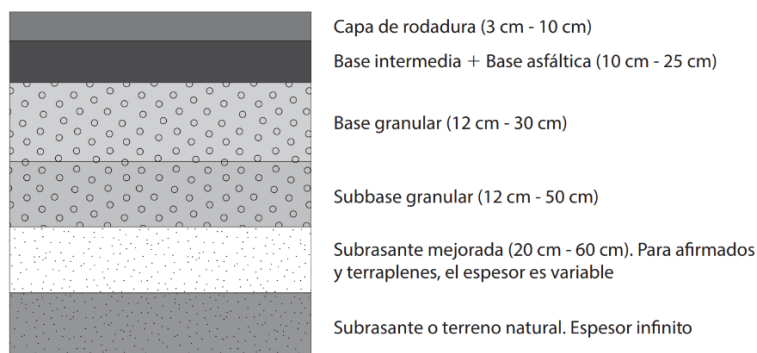


Figura 1. Estructura típica de pavimento flexible. Recuperado de Reyes y Rondón (2022)

2.2 Índice de condición del pavimento (PCI)

El método PCI fue desarrollado por M. Y. Shahim y S.D. Khon y publicado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en 1978. El método permite evaluar la condición estructural y de superficie (operacional) en una sección de pavimento, con fines de determinar actividades de mantenimiento y reparación. Además, determina el comportamiento de la estructura mediante evaluación continua del PCI a lo largo del tiempo (Gutierrez, s.f.).

$$PCI = 100 - \left[\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^{mi} VD(Ti, Sj, Dij) \right] * F$$

Donde:

VD: Valor de deducción o grado de deterioro

Ti: Tipo de falla encontrada

Sj: Severidad que la falla presenta

Dij: Área expresado en porcentaje

F: Factor de ajuste en función de las fallas

- Tipos de Falla: Cada falla en el pavimento evaluado debe ser clasificada dentro de los distintos tipos de falla descritos en el método y según se muestra en el catálogo (ver Figura 2).

- Severidad de Falla: En vista de las variaciones de severidad que presentan los tipos de fallas, se han descrito los diferentes niveles contemplados en el método para cada una de ellas.

- Valor de Deducción: Estos valores (VD) son determinados en función del tipo de falla, su severidad y su densidad en el pavimento. Ver Tabla 1.

Tabla 1. Catálogo de Fallas del pavimento flexible para el método PCI

FALLA N°	DESCRIPCIÓN	UND
1	Piel de Cocodrilo	m ²
2	Exudación de asfalto	m ²
3	Grietas en bloque	m ²
4	Elevación - hundimiento	m
5	Corrugaciones	m ²
6	Depresiones	m ²
7	Grietas de borde	m
8	Grietas de reflexión de juntas	m
9	Desnivel carril - berma	m
10	Grietas longitudinal y transversal	m
11	Parcheo en zanjas reparadas	m ²
12	Agregados pulidos	m ²
13	Huecos	N°
14	Cruce de rieles*	m
15	Ahuellamiento	m ²
16	Desplazamiento	m ²
17	Grietas de deslizamiento	m ²
18	Hinchamiento	m ²
19	Desprendimiento de agregados	m ²

Fuente: ASTM D6433-16

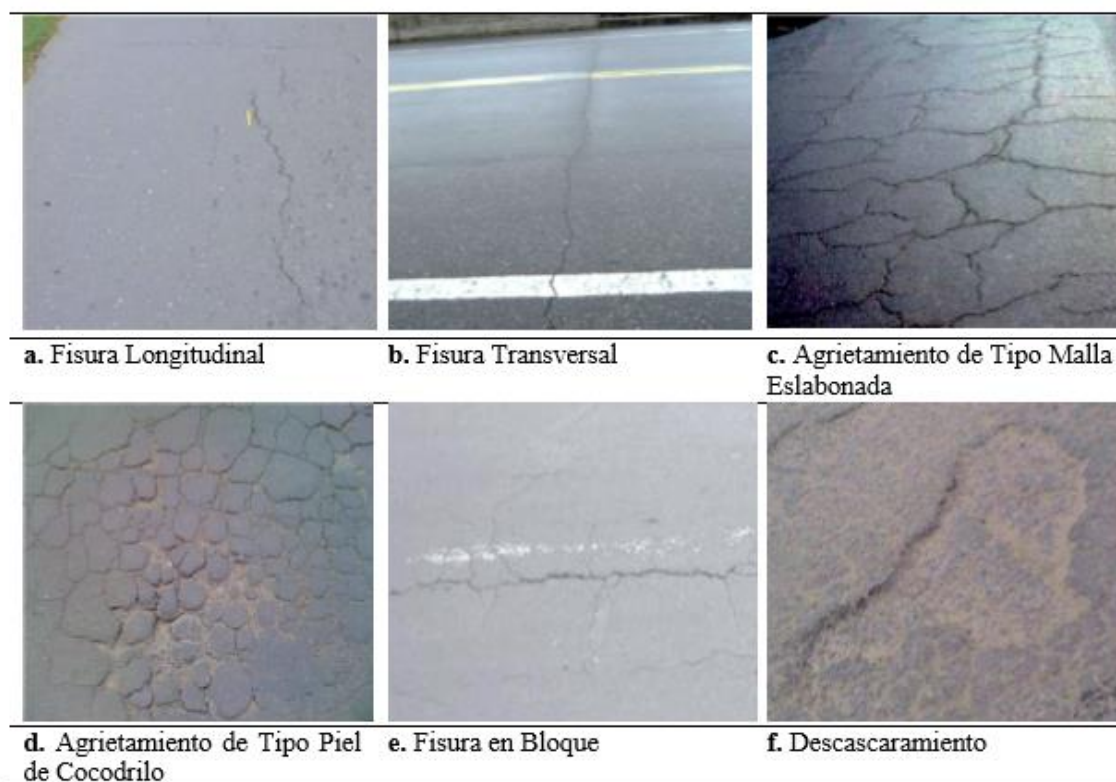


Figura 2. Caracterización del envejecimiento del pavimento asfáltico a partir de los patrones de agrietamiento

2.3 Principios físicos de la teledetección

La teledetección es una técnica que permite la adquisición de información de objetos sin necesidad de un contacto físico directo. Esto es posible mediante la interacción entre el objeto y un sensor remoto, ubicado generalmente en satélites o aeronaves a cierta distancia del área de estudio.

En el proceso de teledetección, la interacción se basa en la recepción de energía electromagnética emitida o reflejada por el objeto hacia el sensor. Existen tres formas principales de obtener esta información: por reflexión, emisión y emisión-reflexión.

La reflexión es el mecanismo más relevante en teledetección, ya que involucra la radiación solar que es reflejada por la superficie terrestre, dependiendo del tipo de cobertura presente en ella. Esta radiación, después de atravesar la atmósfera, es captada por el sensor, aunque la atmósfera puede absorber y dispersar parte del flujo electromagnético. La emisión se refiere al proceso en el cual el sensor detecta la energía electromagnética emitida directamente por el objeto. Por último, en el caso de emisión-reflexión, el sensor emite un flujo energético que, al interactuar con la superficie, es reflejado y capturado de nuevo por el mismo sensor.

En todos estos casos, la transferencia de energía entre la superficie terrestre y el sensor se produce en forma de radiación electromagnética. Esta radiación puede explicarse mediante dos teorías físicas fundamentales: la teoría ondulatoria y la teoría cuántica.

La teoría ondulatoria sostiene que la radiación electromagnética es un fenómeno ondulatorio en el cual la energía se propaga en un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz, mediante dos campos perpendiculares: uno magnético y otro eléctrico (ver Figura 3). Los dos conceptos fundamentales de esta teoría son la longitud de onda, que es la distancia entre los picos de las ondas, y la frecuencia, que se refiere al número de picos que pasan por un punto en un segundo. La relación entre la velocidad de la luz (c), la longitud de onda (λ) y la frecuencia (f) está dada por la fórmula:

$$c = \lambda \cdot f$$

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío (aproximadamente 3×10^8 m/s), λ es la longitud de onda (en metros), y f es la frecuencia (en Hertz).

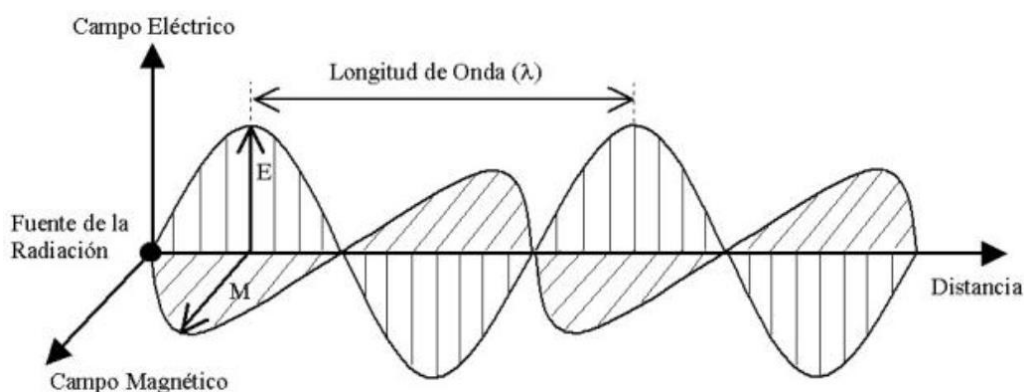


Figura 3. Esquema de una onda Electromagnética. Se muestran los vectores eléctricos (E) y magnéticos (M), perpendiculares entre ellos, de una onda electromagnética.

Por otro lado, la **teoría cuántica** establece que toda radiación emitida por un cuerpo se realiza en pequeñas cantidades discretas de energía, denominadas fotones o cuantos. La cantidad de energía transportada por un fotón se puede calcular mediante la fórmula:

$$Q = h \cdot f$$

Dónde Q es la energía radiante de un fotón (Joule), f la frecuencia y h la constante de Planck (6.63×10^{-34} J.s)

2.3.1 Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es la distribución de energía correspondiente al conjunto de ondas electromagnéticas que un cuerpo puede emitir o absorber (ver Figura 4). Estas ondas abarcan desde longitudes de onda muy grandes, como las ondas de radio y televisión, hasta longitudes extremadamente cortas, como los rayos gamma.

En el contexto de la teledetección, es fundamental destacar ciertas bandas espectrales que son las más utilizadas para la adquisición de datos. Aunque la nomenclatura y la amplitud de estas bandas pueden variar entre diferentes autores, la clasificación más común es la siguiente :

- Espectro visible ($0.4 - 0.7 \mu\text{m}$): Esta es la única radiación electromagnética perceptible por el ojo humano. Dentro de este rango, se distinguen tres

bandas elementales: azul ($0.4 - 0.5 \mu\text{m}$), verde ($0.5 - 0.6 \mu\text{m}$) y rojo ($0.6 - 0.7 \mu\text{m}$).

- Infrarrojo cercano ($0.7 - 1.3 \mu\text{m}$): También conocido como infrarrojo reflejado o fotográfico, puede detectarse utilizando películas con emulsiones especiales. Es especialmente relevante en teledetección debido a su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- Infrarrojo medio ($1.3 - 8 \mu\text{m}$): En esta banda, se combinan los procesos de reflexión de la radiación solar y la emisión de la superficie terrestre, lo que lo convierte en un rango clave para el análisis de diversos fenómenos terrestres.
- Infrarrojo lejano o térmico ($8 - 14 \mu\text{m}$): Esta banda cubre la porción del espectro que corresponde a la emisión térmica de la Tierra, siendo crucial para el estudio de la temperatura superficial y otros procesos térmicos.
- Microondas (a partir de 1 mm): Estas ondas de gran longitud pueden penetrar a través de nubes, niebla y precipitaciones, lo que las hace especialmente útiles en condiciones meteorológicas adversas y para la detección remota a través de interferencias atmosféricas.

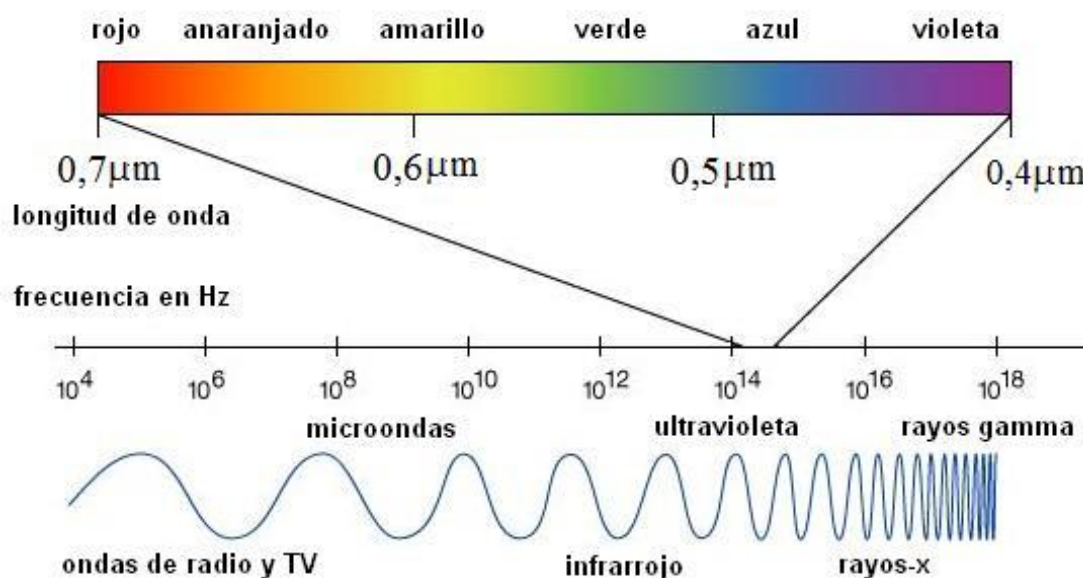


Figura 4. Espectro electromagnético

2.4 Resolución de un sistema sensor en teledetección

La resolución de un sensor se refiere a su capacidad para registrar y discriminar detalles de la información, lo cual depende del efecto combinado de sus componentes. En teledetección, se distinguen cuatro tipos de resolución que determinan las características de las imágenes satelitales: espacial, espectral, radiométrica y temporal.

2.4.1 Resolución espacial

La resolución espacial corresponde al tamaño del objeto más pequeño que puede ser detectado por el sensor. La unidad mínima de una imagen satelital es el píxel, que representa un área de la superficie terrestre. La resolución espacial se expresa en metros o en metros por píxel. Factores como la altura orbital del sensor, la velocidad de escaneo y el número de detectores montados en el sensor afectan directamente esta resolución. Cuanto mayor sea la resolución espacial (es decir, cuanto menor sea el área representada por cada píxel), más detalles podrán observarse en la Figura 5.

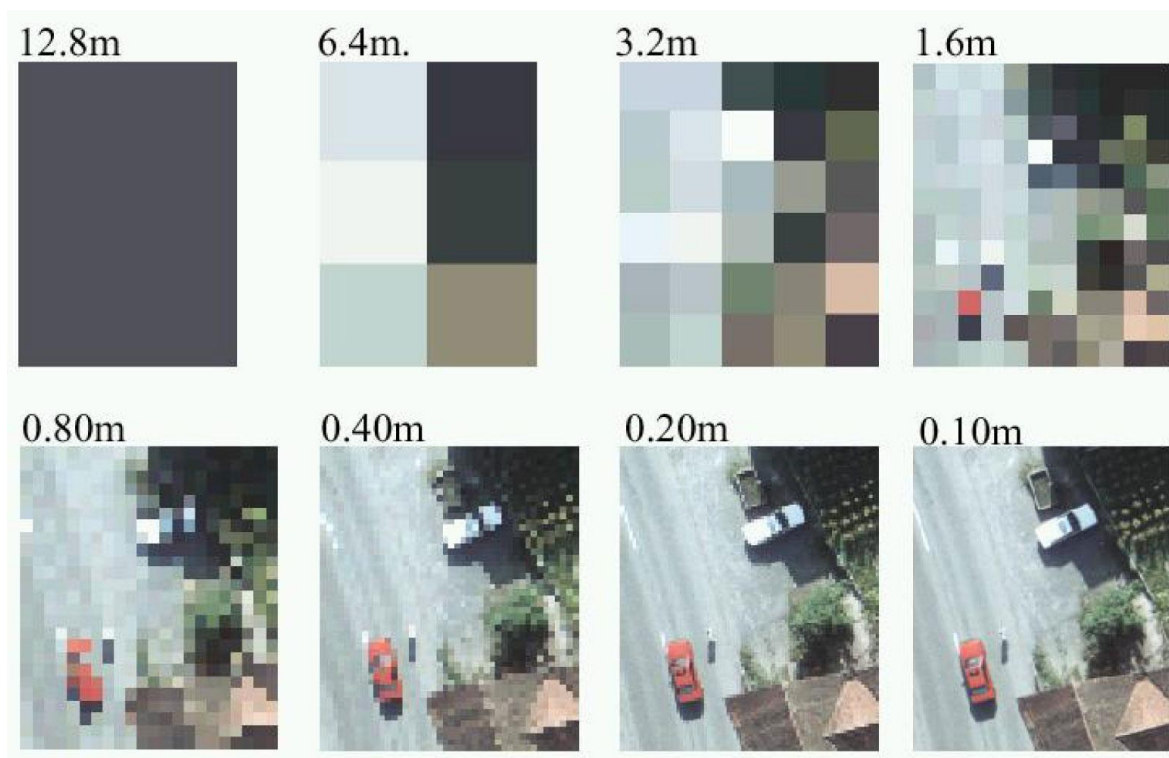


Figura 5. Imagen satelital a diferentes resoluciones espaciales. Recuperado de González y Martínez (2019).

2.4.2 Resolución espectral

Los sensores detectan radiación electromagnética en rangos específicos de longitudes de onda, conocidos como bandas espectrales. La resolución espectral indica el número y la anchura de las bandas que un sensor puede discriminar (ver Figura 6). Cuanto mayor sea el número de bandas, mayor será la resolución espectral del sensor, lo que permite captar detalles más específicos de las características superficiales.

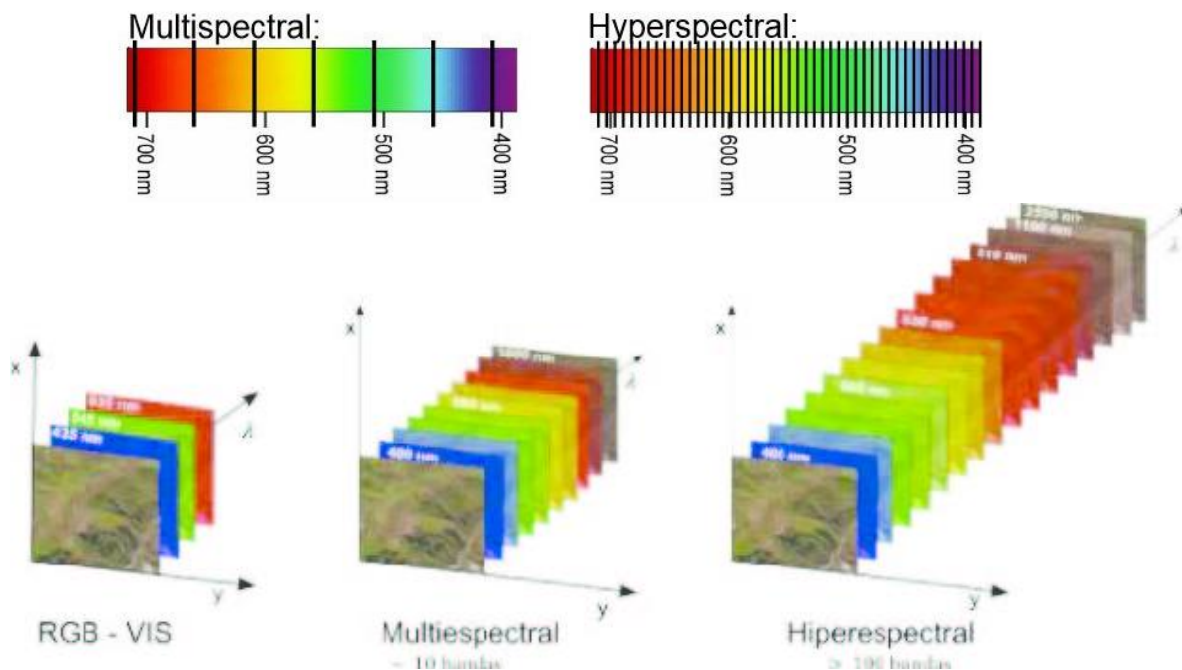


Figura 6. Número y ancho de bandas de imágenes con distinta resolución espectral.

2.4.3 Resolución radiométrica

La resolución radiométrica determina la capacidad del sensor para distinguir diferentes intensidades de radiación electromagnética. Se puede comparar con el número de tonos de gris en una imagen en blanco y negro (ver Figura 7), que determina el nivel de contraste. Cuantos más bits se utilicen para almacenar el valor de reflectividad de un píxel, mayor será la resolución radiométrica. Por ejemplo, el sensor TM de LANDSAT tiene una resolución radiométrica de 8 bits, lo que le permite registrar 256 niveles de energía (Sarría, 2003). Una mayor resolución radiométrica permite capturar más detalles y mejorar la interpretación de las imágenes.

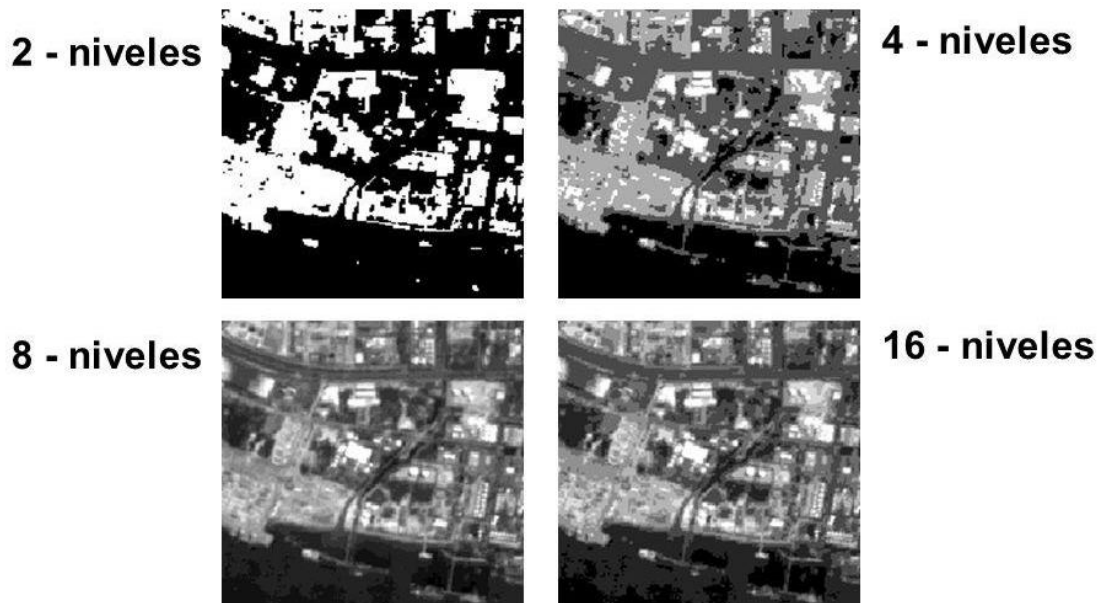


Figura 7. Imagen satelital a distinta resolución radiométrica.

2.4.4 Resolución temporal

La resolución temporal se refiere al intervalo de tiempo entre dos imágenes sucesivas de la misma área de la superficie terrestre, conocido también como periodo de revisita. Este factor es crucial para monitorear cambios en el tiempo, como el crecimiento urbano o cambios en la cobertura vegetal.

2.5 Firmas espectrales

La reflectancia espectral es una propiedad clave de las superficies terrestres en el ámbito de la teledetección. Se define como la proporción de energía electromagnética incidente que es reflejada por una superficie, siendo una magnitud adimensional con valores que oscilan entre 0 y 1, o en términos porcentuales, entre 0% y 100% (Labrador et al., 2012).

Cuando la energía electromagnética interactúa con una superficie, su comportamiento depende de las características del material presente. Cada tipo de superficie refleja la energía de manera distinta según la longitud de onda. Al graficar esta relación entre la reflectancia espectral y la longitud de onda, se obtiene una curva característica conocida como firma espectral. Esta curva es esencial para identificar y diferenciar materiales en la superficie terrestre, ya que cada tipo de material (como agua, vegetación o suelo) tiene una firma espectral única que puede ser detectada y analizada mediante sensores remotos tal como se puede observar en la Figura 8.

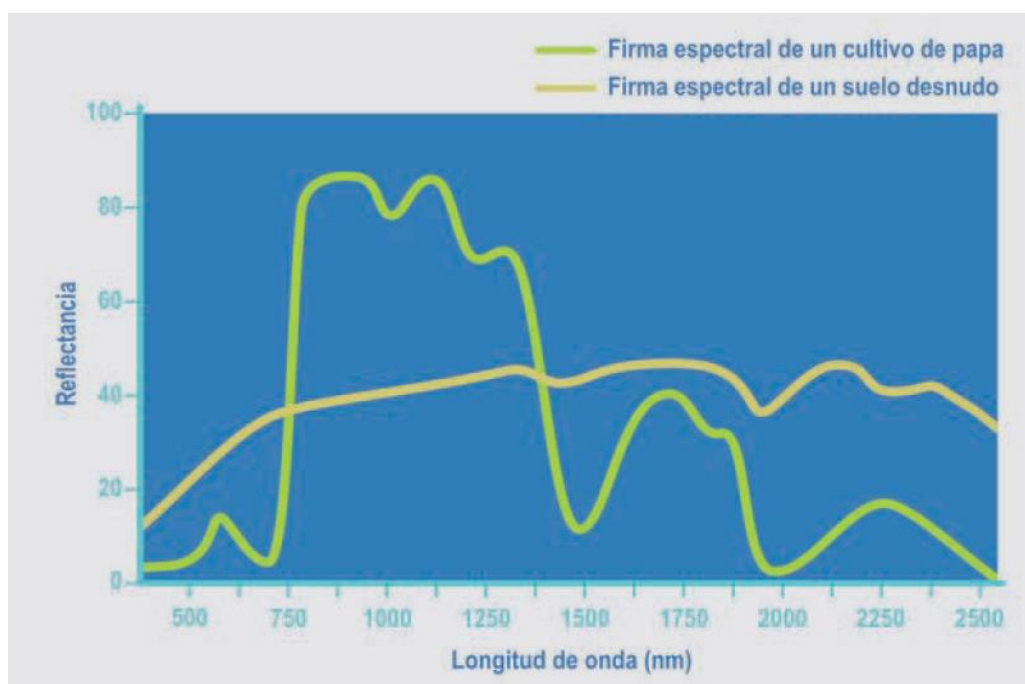


Figura 8. Comparación de las firmas espectrales

2.6 Spectral angle mapper (SAM)

El algoritmo de clasificación Spectral Angle Mapper (SAM) tiene como suposición ideal de que un píxel de la imagen analizada se puede asignar únicamente a una clase de cobertura. El algoritmo SAM se basa principalmente en la similitud espectral entre dos espectros y esa similitud espectral se puede obtener considerando cada espectro como un vector en el espacio n-dimensional, donde n es el número de bandas de la imagen analizada, que forman un ángulo (α) los dos espectros de la imagen y de patrón, puede ser determina la similitud espectral entre dos espectros calculando el ángulo ente los espectros y tratándolos como vectores en un espacio con dimensiones igual al número de bandas (ver Figura 9).

$$\alpha = \left(\frac{\sum_{i=1}^n t_i \cdot r_i}{(\sum_{i=1}^n t_i)^{1/2} \cdot (\sum_{i=1}^n r_i)^{1/2}} \right)$$

Dónde:

α : Ángulo espectral

n : Número de bandas espectrales

t : Espectro de pixel

r : Espectro de referencia

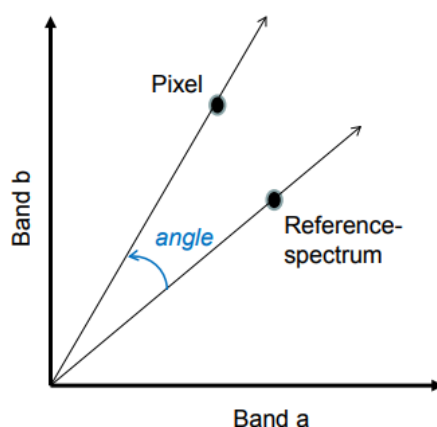


Figura 9. Representación gráfica del algoritmo Spectral Angle Mapper (SAM) para la clasificación espectral

Capítulo III: Metodología para el procesamiento de datos espectrales

3.1 Descripción de la zona de trabajo

La zona de estudio abarca la Avenida Julio C. Tello, desde su inicio en el óvalo de Ancón hasta su intersección con la Avenida Florida, en dirección de sur a norte, en el distrito limeño de Ancón (Ver Figura 10) Esta vía se conecta directamente con la carretera Panamericana Norte, una vía nacional de alto tránsito vehicular en ambos sentidos (norte-sur y sur-norte), compuesta principalmente por pavimento flexible (asfalto).

El área cubierta por las imágenes satelitales obtenidas es de aproximadamente 25 km², permitiendo observar una variedad de coberturas, como el asfalto de las vías, zonas de vegetación, el litoral marino y áreas urbanas en el sector norte de Ancón.

Las imágenes para analizar son del satélite WorldView-3 con número de identificación 014421268010_01 de fecha 21 de marzo del 2021 (Ver Figura 11)

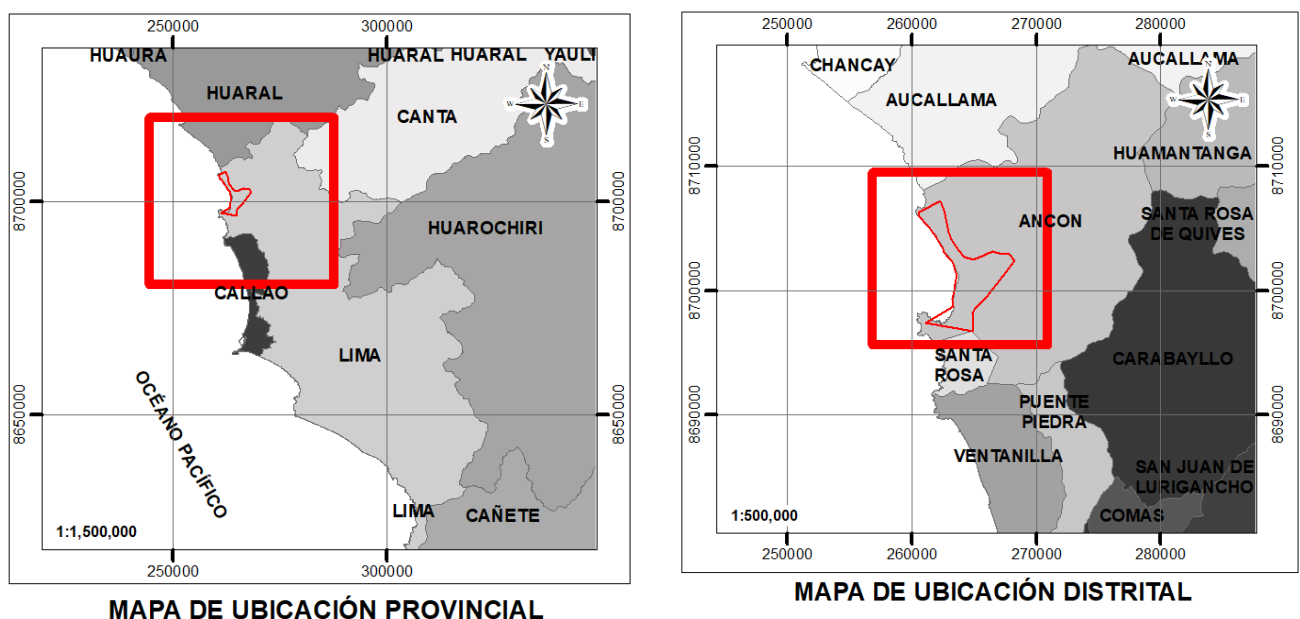


Figura 10. Vista de la ubicación de la zona es estudio

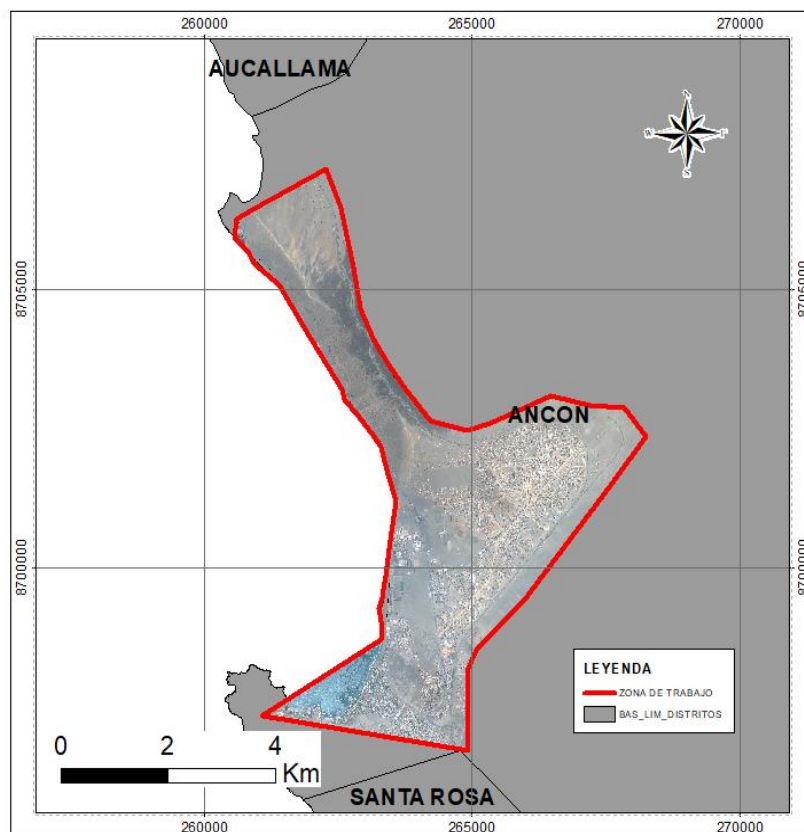


Figura 11. Vista de la imagen satelital WV3 utilizada

Equipos usados:

Imagen Satélite World View-3

WorldView-3 es el tercer satélite de segunda generación de la empresa DigitalGlobe, lanzado en agosto de 2014. Actualmente, ofrece un producto multiespectral de mayor calidad en el mercado, con la capacidad de adquirir imágenes multiespectrales en 16 bandas (8 bandas visibles e infrarrojas cercanas y 8 bandas infrarrojas de onda corta) con la más alta precisión espacial disponible. WorldView-3 permite discriminar detalles muy finos como vehículos, áreas urbanas detalladas, vegetación, y características geológicas. Combinando su alta resolución espacial y espectral, proporciona información detallada para diversas aplicaciones como el monitoreo de la calidad del pavimento, la detección de cambios en ecosistemas, la discriminación de especies vegetales, entre otros. (“DigitalGlobe capacidad”, 2016).



Figura 12. Satélite World View-3 tomado de Digital Globe

Con las siguientes características

WorldView-3 ofrece una mayor confiabilidad para la adquisición de imágenes satelitales. Tiene la capacidad de tomar imágenes de hasta 680,000 km² por día, con una frecuencia promedio de revisita de 1.1 días y capacidades estéreo de grandes áreas. Gracias a su alta resolución y capacidad de actualización rápida, WorldView-3 captura imágenes de alta precisión y actualidad. Su altitud orbital de 617 km y su tecnología avanzada, como los giroscopios de control de momento (CMG), permiten una rápida adquisición de objetivos y maniobras precisas, recolectando imágenes de áreas grandes con una simple pasada. Esto hace que sea una herramienta clave para aplicaciones de monitoreo continuo y análisis detallado (“DigitalGlobe capacidad,” 2016).

Con los siguientes beneficios (“DigitalGlobe datos”,2016)

- Proporciona imágenes altamente detalladas para la creación de mapas precisos, la detección de cambios y el análisis detallado de imágenes. (Nota: las imágenes deben ser remuestreadas a 40 cm para clientes que no sean del gobierno de EE. UU.)

- Localiza geográficamente elementos con un margen de error menor a 3.5 m, mejorando la precisión en mapas de áreas remotas.
- Recolecta, almacena y envía productos de imágenes globales actualizadas con mayor frecuencia que otros sistemas competidores.
- Ofrece una capacidad de detección de cambios y mapeo a resoluciones sin precedentes gracias a sus 8 bandas multiespectrales.

Tabla 2. Especificaciones técnicas de las imágenes del Word View-3 (Digital Glove, 2016)

Informe sobre el lanzamiento	13 de agosto de 2014, desde la Base Vandenberg de la Fuerza Aérea, California.
Órbita	Altitud: 617 km, tipo: sincrónica con el sol, nodo descendente 10:30 am.
Duración de la misión	De 10 a 12 años.
Tamaño, masa y potencia de la nave espacial	5.7 m de alto x 2.5 m de ancho; 2800 kg de peso.
Bandas de sensores	Pancromático: 450 – 800 nm Multiespectral visible/infrarrojo cercano (VNIR): 8 bandas de 400 – 1040 nm Infrarrojo de onda corta (SWIR): 8 bandas de 1195 – 2365 nm CAVIS (Clouds, Aerosols, Vapors, Ice, and Snow): 12 bandas adicionales para la corrección atmosférica
Resolución del sensor	Pancromático: GSD de 0.30 m en el nadir; multiespectral: GSD de 1.24 m en el nadir.
Ancho de barrido	13.1 km en el nadir.
Precisión de dirección y conocimiento	Precisión: <500 m al comenzar y finalizar la imagen. Conocimiento: compatible con la precisión de geolocalización que figura a continuación.

Agilidad para la nueva determinación de objetos	Tiempo de rotación a 200 Km: 10s
Almacenamiento a bordo	2200 Gb.
Frecuencia de la revisita (a 40° latitud N)	A 40° de latitud norte, revisita promedio de menos de 1 día.

Sistema Aéreo Piloteado Remotamente

Para la adquisición de imágenes se usó un Sistema Aéreo Piloteado Remotamente (RPAS, por sus siglas en inglés), que es un drone tipo cuadricóptero. Para el presente estudio se utilizaron un RPAS marca DJI modelo Phantom 4 con cámara 16 MP (ver Figura 13)



Figura 13. RPAS Phantom 4 PRO con sus accesorios

Receptor geodésico Satelital

Se utilizó un receptor geodésico o receptor GNSS (sistema de navegación por satélite global), marca NOVATEL y modelo ProPak-V3 (ver Figura 14), para posicionar puntos de apoyo sobre la superficie terrestre permitiendo determinar sus coordenadas geográficas y altitud como resultado de la recepción de señales provenientes de constelaciones de satélites artificiales (GPS y GLONASS).



Figura 14. Receptor Geodésico NOVATEL ProPak-V3

Espectrorradiómetro

Para el levantamiento de firmas espectrales en campo se usó un espectrorradiómetro de mano ASD HandHeld2, el cual posee un rango de longitud de onda de 325 nm - 1075 nm, una precisión de ± 1 nm y una resolución de 3 nm a 700 nm.

El espectrorradiómetro HandHeld2 (ver Figura 15) posee una pantalla inclinada para visualización inmediata de las firmas espectrales, permitiendo almacenar hasta 2000 espectros, utiliza pilas recargables o desechables AA estándar y además se le puede colocar un accesorio GPS para registrar las coordenadas de los puntos de lectura.



Figura 15. Espectrorradiómetro de mano ASD HandHeld2

Modelo de Elevación Digital ALOS PALSAR 12.5m

En este caso se usó el Modelo de superficie digital global de ALOS "ALOS World 3D - 30m (AW3D30) que tiene 30 m de resolución especial utilizando el modelo geoidal EGM96 y uso de la proyección WGS84 (Ver Figura 16)

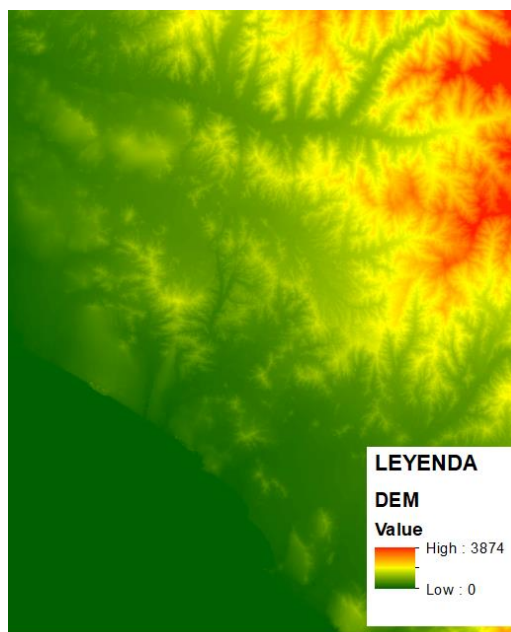


Figura 16. Modelo de superficie digital global de ALOS

Hardware y Software

Para el procesamiento de las imágenes y datos obtenidos, se utilizó una Workstation equipada con un procesador Intel(R) Xeon(R) E5-2650 v3 de 64 bits, 32 GB de memoria RAM y sistema operativo Windows 10.

El preprocesamiento de las imágenes satelitales adquiridas por WorldView-3 incluyó las siguientes fases:

- Corrección geométrica y atmosférica: Utilizando las herramientas RPC Orthorectification Workflow y FLAASH Atmospheric Correction del software ENVI.
- Calibración radiométrica: Para ajustar los valores de reflectancia de las imágenes, se utilizó la herramienta Radiometric Calibration de ENVI.

Para la creación de la librería espectral, se empleó el software View Spec Pro junto con rutinas personalizadas en Python, las cuales facilitaron el análisis estadístico de las firmas espectrales obtenidas en campo. La clasificación final de las imágenes mediante la técnica SAM (Spectral Angle Mapper) se realizó utilizando la herramienta correspondiente de ENVI.

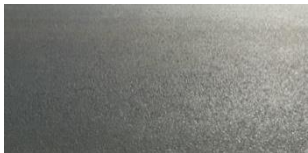
Metodología para creación de una biblioteca espectral

La metodología empleada para la recolección y procesamiento de firmas espectrales del pavimento flexible sigue una secuencia detallada y organizada, como se muestra en el diagrama de flujo correspondiente. El proceso inicia con la selección de los lugares adecuados para la toma de mediciones espectrales en campo, considerando la representatividad de las distintas clases de deterioro superficial del pavimento. Estos lugares se seleccionan teniendo en cuenta factores como el tráfico, las condiciones climáticas y el tipo de daño observado.

Una vez identificados los sitios de medición, se procede a la recolección de las firmas espectrales utilizando un espectrómetro Analytical Spectral Devices (ASD), modelo HandHeld 2, con un rango de longitud de onda de 350-1075 nm y un campo de visión (FOV) de 25°. Junto con la recolección de las firmas, se obtiene información adicional como la georreferenciación de cada punto de medición y un archivo fotográfico que permite una mejor identificación de los daños.

Posteriormente, las firmas espectrales recolectadas son clasificadas y organizadas, vinculándolas con sus coordenadas geográficas para facilitar su análisis. En esta etapa, se identificaron tres clases principales de niveles de daño superficial en la carpeta asfáltica, basadas en la pérdida de aglomerante (Ver Tabla 3) y las diferencias significativas en la respuesta espectral:

Tabla 3. Clases de pavimento según la pérdida de aglomerante

Clase	Descripción	Foto
Bueno (pavimento con poco desgaste superficial)	Pavimento su estado inicial o con pocos signos de desgaste.	
Regular (Pavimento con desgaste superficial)	Pavimento que presenta una pérdida moderada de la capa superficial de asfalto, con deterioro leve pero visible	
Malo	Pavimento con un nivel avanzado de envejecimiento, donde se ha perdido gran parte de la capa asfáltica, dejando expuesta la grava subyacente.	

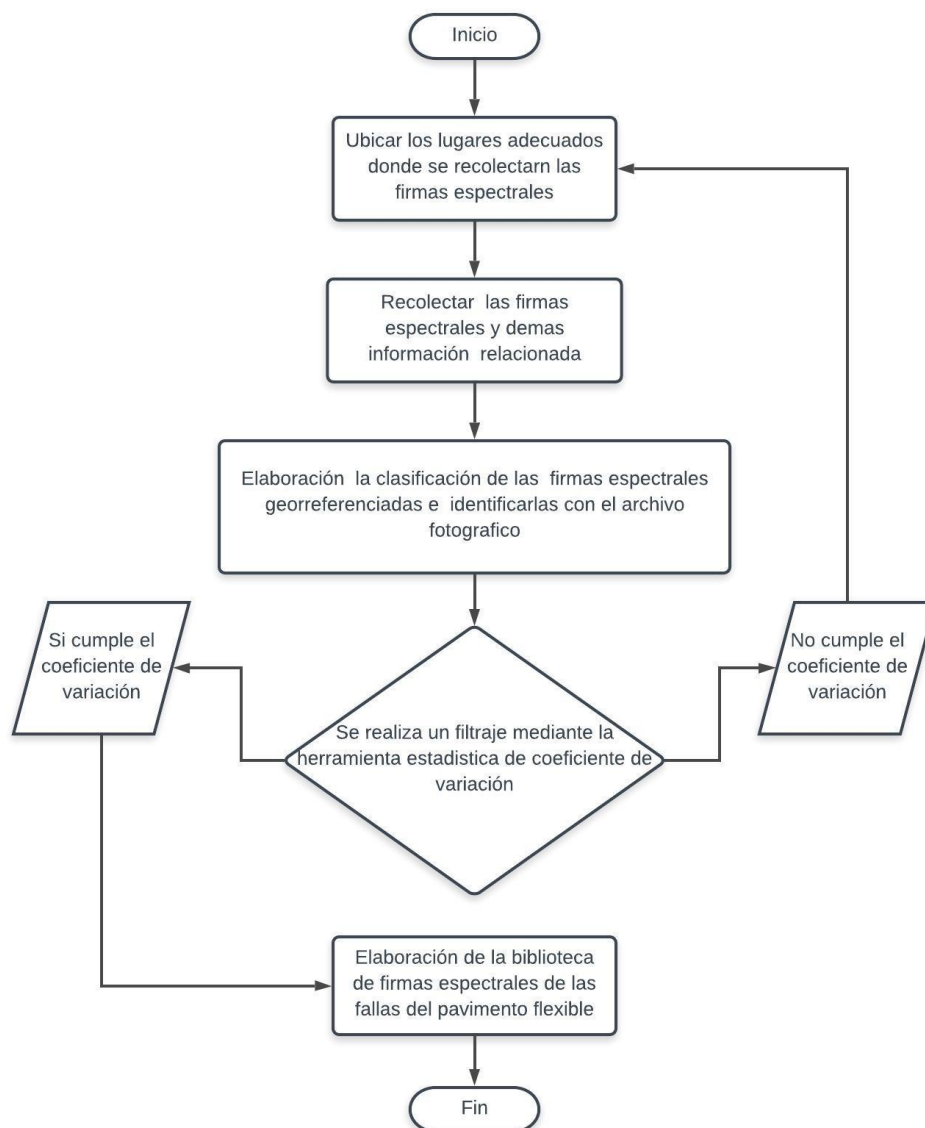
Además, se tomaron muestras de elementos presentes en las vías, como manchas de aceite y veredas, para tener una representación completa de las superficies analizadas.

A continuación, se aplicó un filtro estadístico basado en el coeficiente de variación, el cual permite evaluar la consistencia de las firmas espectrales recolectadas. Se calculó el coeficiente de variación para cada longitud de onda, estableciendo un umbral del 10%. Las firmas espectrales que no superaron este filtro fueron descartadas, mientras que aquellas que cumplieron con los criterios fueron conservadas para los análisis posteriores. Este proceso garantiza que los datos utilizados tengan un nivel adecuado de precisión y fiabilidad.

Finalmente, las firmas espectrales filtradas y clasificadas se integraron en una biblioteca de firmas espectrales representativa de los distintos tipos de deterioro superficial del pavimento flexible. Esta biblioteca es esencial para los siguientes pasos de la investigación, ya que permitirá realizar la clasificación de imágenes satelitales, como las obtenidas del satélite WorldView-3, y compararlas con los datos obtenidos en campo.

En la siguiente parte de este capítulo, se detallarán cada uno de los pasos del proceso, desde la recolección de las firmas espectrales en campo, su filtrado mediante el coeficiente de variación, hasta la creación de la biblioteca espectral y su aplicación en la evaluación del estado del pavimento flexible, asegurando la homogeneización de los datos espectrales entre las imágenes satelitales y las firmas recolectadas.

Diagrama de flujo de la metodología usada:



a) Información general de las firmas espectrales

Con el fin de tener un adecuado registro y posteriormente originar un buen análisis de las firmas analizadas se tomó la siguiente información en la adquisición de las firmas:

- Tipo de daño
- Número de toma
- Fecha
- Hora
- Ubicación (Coordenadas)
- Altura instrumental (Desde el suelo al sensor)
- Fotografía
- Condición climática

b) Altura instrumental para la adquisición de firmas

Dado que el espectrómetro utilizado en este estudio tiene un campo de visión (FOV) de aproximadamente 25° , y considerando que el satélite **WorldView-3** proporciona imágenes con una resolución espacial de 0.3 m en su banda pancromática y de 1.24 m en las bandas multiespectrales, es importante ajustar las mediciones en campo para obtener datos coherentes con las resoluciones espaciales del satélite. Para representar adecuadamente un área efectiva de 0.1 m², la altura instrumental (AI) adecuada para el espectrómetro es de aproximadamente 0.7 m, como se puede observar ver Tabla 4 y Figura 17.

Tabla 4. Alturas de instrumentales

Altura Instrumental (m)	Área barrida por ASD en ángulo nadir FOV 25° (m ²)
0.50	0.04
0.70	0.10
1.00	0.15
1.28	0.25
2.00	0.62

Este ajuste garantiza que los datos de reflectancia adquiridos en campo sean representativos del área cubierta por un píxel de las imágenes satelitales, asegurando una correlación óptima entre las firmas espectrales tomadas en campo y los datos obtenidos por el satélite **WorldView-3**.

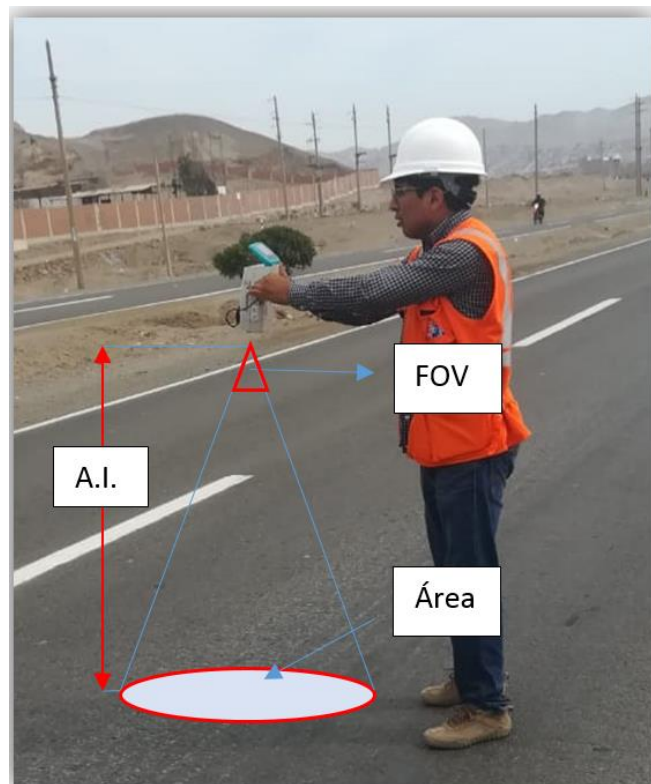


Figura 17. Levantamiento en campo de firmas espectrales

c) Calibración del Espectrómetro

La calibración del espectrómetro es un paso crucial para asegurar la precisión de las firmas espectrales recogidas en campo. Esta calibración se realiza optimizando las condiciones de iluminación, especialmente cuando hay cambios significativos en la intensidad de la luz ambiental. El objetivo principal es encontrar el tiempo de integración ideal, que permita maximizar la relación señal-ruido (SNR) sin que se produzca saturación de los datos.

El primer paso en la calibración consiste en establecer una medida de referencia mediante la medición de la corriente oscura (DC) y la referencia blanca (WR). La corriente oscura se mide con el sensor cubierto, lo que permite identificar y corregir los valores que representan el ruido electrónico inherente del espectrómetro. Posteriormente, la referencia blanca se obtiene utilizando un panel blanco de calibración incluido con el equipo, el cual tiene una reflectancia conocida y estable. Esta medida blanca sirve como base para normalizar las firmas espectrales que se recogerán durante la campaña de medición (ver Figura 18).

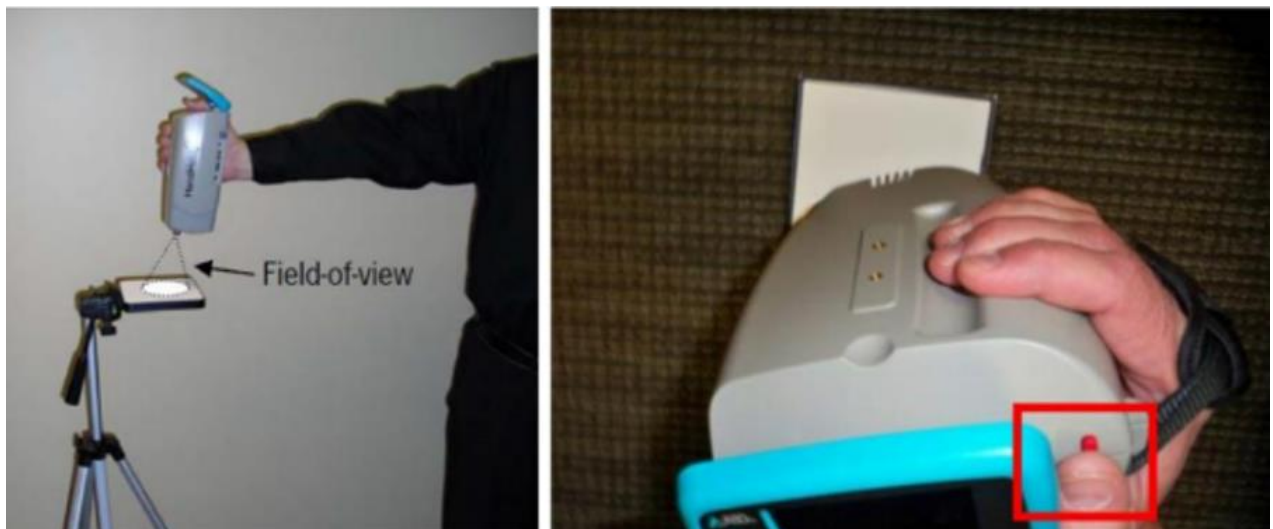


Figura 18. Calibración del espectrómetro

d) Cantidad de muestras

Se recolectaron más de 400 registros de firmas espectrales correspondientes a las clases de fallas identificadas (ver Tabla 5) Cada clase de falla fue muestreada de manera representativa (ver Figura 16) en el área de estudio para garantizar la diversidad de condiciones superficiales del pavimento. En la Tabla 5, se presenta un resumen de las firmas espectrales recolectadas en campo, que proporciona una visión general de los datos obtenidos,

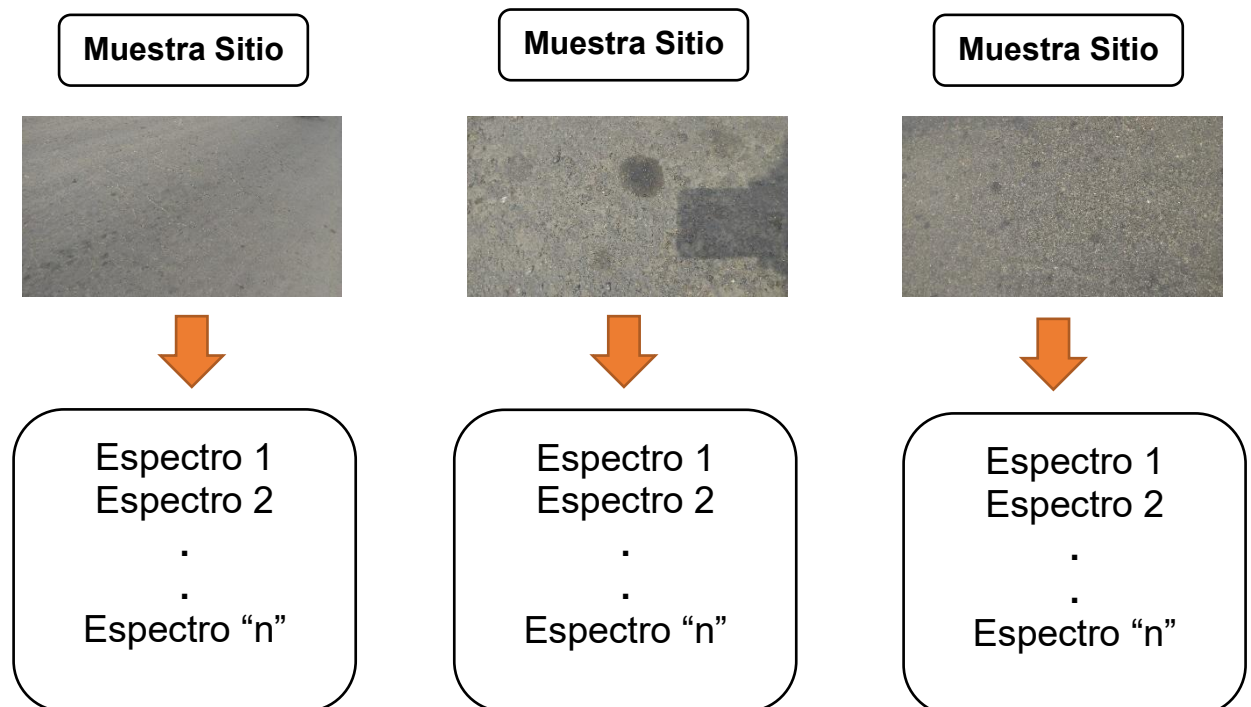


Figura 19. Esquema de muestreo de las firmas espectrales

Tabla 5. Registro de firmas espectrales levantadas en campo

ID	Nombre de la muestra	Número de Firmas
F0001	BORDE DE PISTA	9
F0002	ARENA SUELTA	10
F0003	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DISGREGACION Y DESINTEGRACION	10
F0004	PAVIMENTO EN BUEN ESTADO	20
F0005	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DISGREGACION Y DESINTEGRACION	18
F0006	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DISGREGACION Y DESINTEGRACION	10
F0007	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DISGREGACION Y DESINTEGRACION	20
F0008	PAVIMENTO EN BUEN ESTADO	12
F0009	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE GRIETAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES	15
F0010	MANCHA DE ACEITE	4
F0011	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DEPRESIONES	14
F0012	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DISGREGACION Y DESINTEGRACION	14
F0013	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DISGREGACION Y DESINTEGRACION	19
F0014	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE GRIETAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES	15
F0015	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE GRIETAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES	10
F0016	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE GRIETAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES	9
F0017	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE PIEL DE COCODRILO	19
F0018	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE HUECO	20
F0019	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DESNIVEL DE CALZADA	8
F0020	ARENA SUELTA	9
F0021	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DISGREGACION Y DESINTEGRACION	9
F0022	PAVIMENTO EN BUEN ESTADO	10

- e) Equipo de registro de las firmas espectrales.
El equipo usado es un espectrómetro de marca ASD inc. y modelo HandHenId con las siguientes características

Rango de longitud de onda: 325-1075 nm
 Precisión de longitud de onda ± 1 nm
 Resolución espectral <3.0 nm a 700 nm
 Resplandor de equivalencia de ruido (NEdL):
 Pro: 5×10^{-10} W / cm² / nm / sr a 700 nm
 Tiempo de integración: 8,5 ms mínimo (seleccionable)
 Campo de visión: 25 ° (ópticas opcionales disponibles)
 Almacenamiento en memoria: hasta 2,000 archivos de espectro

- f) Filtraje de las firmas espectrales mediante la herramienta de coeficiente de variación.

Las firmas espectrales fueron extraídas del espectrorradiómetro utilizando el software **HH2 Sync** y posteriormente visualizadas a través del software **ViewSpecPro** (ver Figura 20) que las presenta en unidades de nivel digital (ND) o reflectancia en función de la longitud de onda (nm). Cada archivo fue convertido al formato **ASCII**, lo que permite su procesamiento en cualquier software especializado en el análisis de firmas espectrales. Ambos programas son nativos del equipo utilizado.

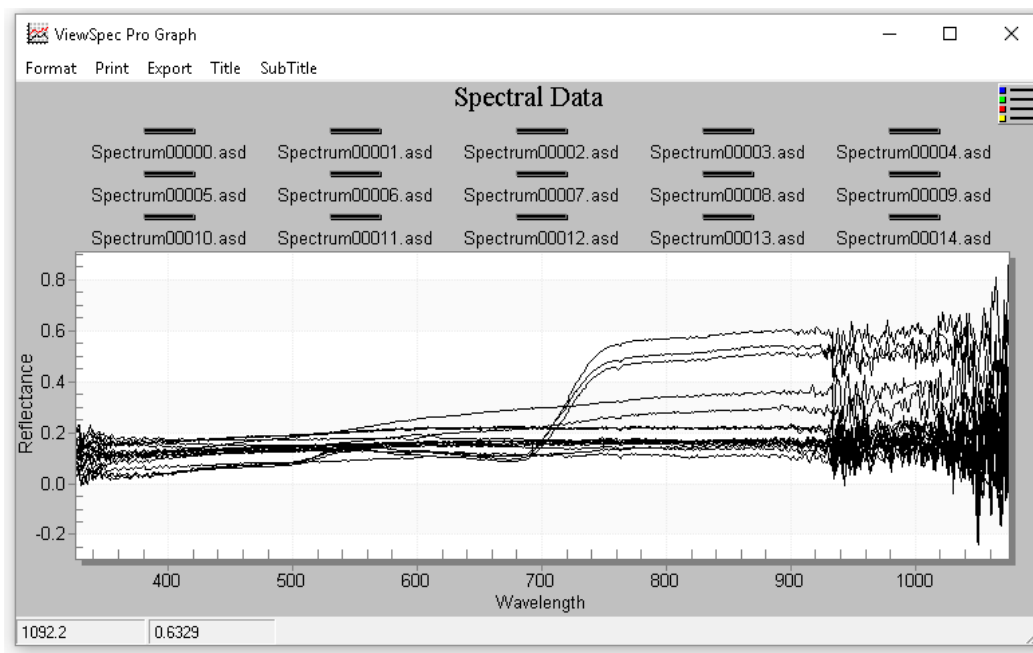


Figura 20. Vista de la interfaz del programa ViewSpecPro

Para cada grupo de firmas espectrales pertenecientes a una misma cobertura, se calculó el promedio y la desviación estándar. Posteriormente, se aplicó el criterio estadístico del **coeficiente de variación** para evaluar la dispersión de los datos tomados en campo mediante un valor porcentual. Para este cálculo, se desarrollaron rutinas personalizadas en el lenguaje de programación **Python**.

El coeficiente de variación se obtuvo dividiendo la desviación estándar de cada valor de nivel digital de las firmas espectrales entre su respectivo promedio. En este estudio, se aceptó un coeficiente de variación del **10%** para cada longitud de onda, y se estableció que el **90%** de las unidades espectrales no debían exceder ese umbral. Este proceso permitió descartar firmas espectrales que no cumplieran con el criterio de homogeneidad establecido, mejorando así la calidad de los datos utilizados en los análisis posteriores.

Una vez filtradas las firmas espectrales, se procedió a crear una biblioteca de firmas (Ver 0) espectrales del deterioro del pavimento utilizando el software **ENVI**. Para este paso, se integraron todas las firmas espectrales seleccionadas, incorporando las características del espectrorradiómetro, especialmente el **ancho a media altura (FWHM)**. Posteriormente, se realizó un remuestreo de las firmas espectrales para

asegurar que tanto las firmas como las imágenes satelitales compartieran la misma cantidad de bandas espectrales, lo que permitió reducir el tiempo computacional en los procesos subsiguientes. Este paso también ayudó a homogeneizar las firmas espectrales con la información espectral contenida en la imagen, mejorando la precisión de los análisis posteriores.

Finalmente se hicieron fichas de cada firma espectral (Ver ANEXO 04 y Tabla 6 como un ejemplo)

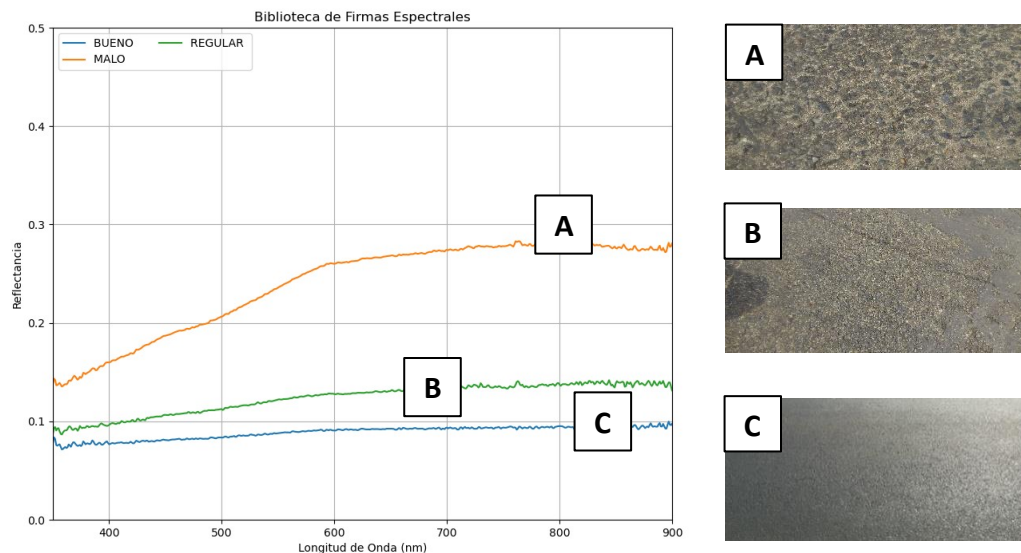
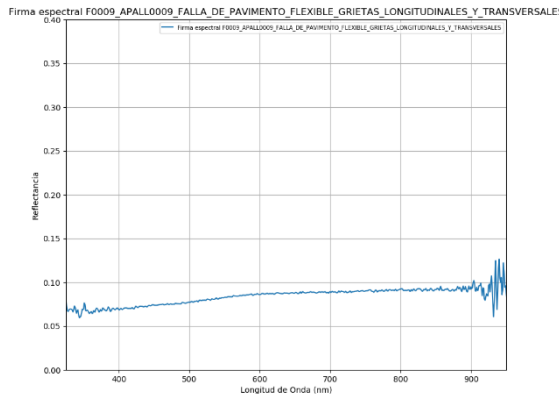


Figura 21. Pavimentos flexibles según el nivel de condición en tres clases: a) Malo PCI 25 b) Regular PCI 60 c) Bueno PCI 80

Tabla 6. Firma de Firmas Espectral

NOMBRE DE LA MUESTRA:		FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE GRIETAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES	
ID DE LA MUESTRA:		F0009 APALL0009	
TIPO DE MATERIAL:		ARTIFICIAL	
CLASE:		PAVIMENTO ASFÁLTICO	
UBICACIÓN DE ORIGEN:		CARRETERA SERPENTIN DE PASAMAYO	
DISTRITO: ANCÓN		PROVINCIA: LIMA	DEPARTAMENTO: LIMA
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:		11°46'32,93" S 77°10'15,99" W	
FECHA DE RECOLECCIÓN:		Martes 3 de abril del 2018	
HORA DE RECOLECCIÓN:		11:06:05 AM	
CONDICIÓN CLIMÁTICA:		SOLEADO	
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:		ESPECTRORADIÓMETRO ASD HANDHELD 2 N° HH 2 325-1075	
ALTURA DE TOMA:		0.70m	
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:			
Pavimento flexible con presencia de grietas longitudinales.			
			
RANGO ESPECTRAL:		325nm a 950nm	
Firma espectral F0009 APALL0009 FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE GRIETAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES 			
NÚMERO DE FIRMAS ANALIZADAS:		15	
Con las firmas tomadas en campo se calcula el coeficiente de variación de cada longitud de onda para determinar la homogeneidad de la muestra. El coeficiente de variación aceptado para este trabajo es de 10 % para cada longitud de onda. Para validar la firma espectral, más del 90% de los coeficientes de variación deben cumplir con este criterio. El 96% de las longitudes de onda de la presente firma espectral no poseen un coeficiente de variación mayor al 10% por lo tanto las firmas espectrales recolectadas en campo cumplen con el criterio de homogeneidad.			

Capítulo IV: procesamiento de imágenes adquiridas remotamente y análisis

Este capítulo describe la metodología utilizada para procesar las imágenes satelitales obtenidas mediante el sensor WorldView-3 y su clasificación mediante el uso de la biblioteca de firmas espectrales vista en el capítulo tres, con el fin de evaluar el estado superficial del pavimento flexible en el área de estudio. El procesamiento de estas imágenes sigue una secuencia de pasos destinados a transformar los datos en crudo en productos geoespaciales precisos, con una georreferenciación adecuada y la obtención de valores exactos de reflectancia a nivel de superficie y poder integrarlos con la biblioteca de firmas espectrales.

Entre los procedimientos se incluyen:

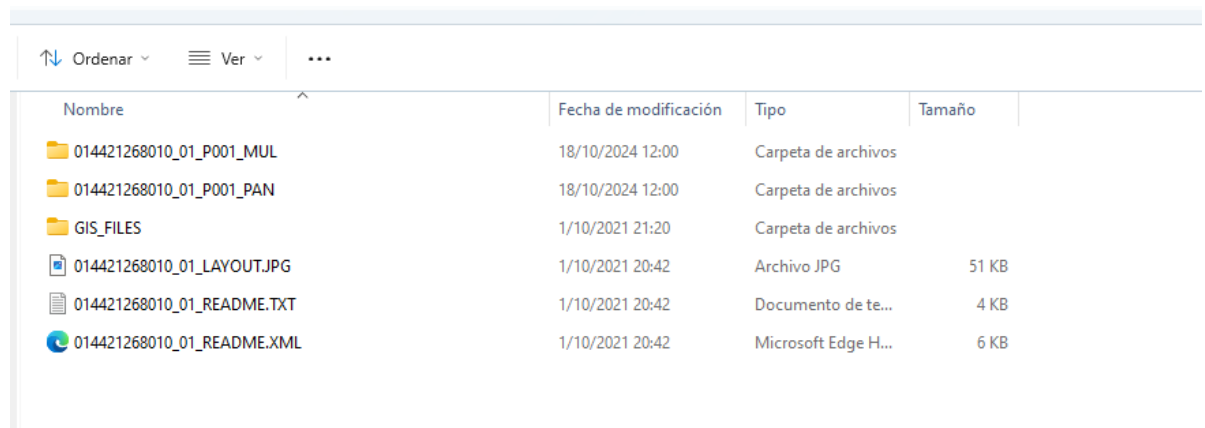
- Corrección atmosférica
- Fusión de imágenes (pansharpening)
- Calibración de la reflectancia
- Corrección geométrica
- Clasificación Espectral

Cada uno de estos procedimientos es esencial para garantizar una clasificación precisa y confiable del estado superficial del pavimento flexible, que constituye el objetivo principal de este capítulo. A continuación, se expone detalladamente la metodología aplicada para el procesamiento de la imagen satelital cruda adquirida.

4.1 Adquisición de imagen satelital worldview-3

La imagen satelital WorldView-3 adquirida se entrega en dos conjuntos principales: una imagen multiespectral y una pancromática. La imagen multiespectral contiene 8 bandas con una resolución espacial de 1.2 metros, mientras que la pancromática tiene una resolución espacial mucho mayor, de 0.3 metros. Ambas imágenes cubren la misma zona geográfica, la entrega de la imagen satelital incluye (ver Figura 22) los siguientes archivos principales:

- Archivos TIF para las imágenes en alta resolución tanto multiespectrales como pancromáticas.
- Archivos auxiliares en formato XML y RPB, que contienen metadatos de calibración y georreferenciación.
- Archivos README con información adicional sobre los parámetros de adquisición, como la cobertura de nubes (0.000%), la ubicación geográfica (desde la latitud -11.71798900 hasta -11.78461100, y desde la longitud -77.17742600 hasta -77.12612500), y el intervalo de captura (del 2 de marzo de 2021 a las 15:23:26 hasta las 15:23:37 UTC).



Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
014421268010_01_P001_MUL	18/10/2024 12:00	Carpeta de archivos	
014421268010_01_P001_PAN	18/10/2024 12:00	Carpeta de archivos	
GIS_FILES	1/10/2021 21:20	Carpeta de archivos	
014421268010_01_LAYOUT.JPG	1/10/2021 20:42	Archivo JPG	51 KB
014421268010_01_README.TXT	1/10/2021 20:42	Documento de te...	4 KB
014421268010_01_README.XML	1/10/2021 20:42	Microsoft Edge H...	6 KB

Figura 22. Vista de la estructura de archivos de la imagen WV3

4.2 Corrección atmosférica

El proceso de corrección atmosférica comienza con la calibración radiométrica de la imagen en crudo. En esta etapa, utilizamos la herramienta Radiometric Calibration de ENVI para convertir los valores digitales (DN) de los píxeles de la imagen a valores de radiancia (L), que representan la cantidad de energía electromagnética captada por el sensor. La fórmula general para realizar esta conversión es:

$$L = \frac{(DN - offset) \cdot gain}{\Delta t}$$

Donde:

- L: radiancia en $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$
- DN : valor digital del píxel
- offset: valor de corrección del sensor
- gain : coeficiente de ganancia del sensor
- Δt es el tiempo de exposición del sensor

Este proceso asegura que los valores de la imagen estén en formato de radiancia y que el archivo tenga un formato intercalado BSQ (Band Sequential), que es compatible con el módulo de corrección atmosférica FLAASH. Una vez que la imagen está calibrada radiométricamente, pasamos a la corrección atmosférica utilizando el módulo FLAASH Atmospheric Correction Model en ENVI (Harris Geospatial, 2020). El objetivo de este paso es corregir los efectos de la atmósfera sobre la señal que captó el satélite, eliminando influencias como la dispersión y absorción de la luz. Para ello, utilizamos el siguiente modelo de corrección:

$$R = \frac{L - L_{atm}}{T_s \cdot T_v} - \frac{\rho_{path}}{1 - S \cdot \rho_{surt}}$$

Donde:

- R: reflectancia de la superficie
- L: radiancia calibrada
- L_{atm} : radiancia atmosférica
- T_s y T_v : transmitancias atmosféricas para las trayectorias solar y de visión respectivamente
- ρ_{path} :reflectancia debida a la radiancia de la trayectoria atmosférica
- S: factor de retrodispersión múltiple
- ρ_{surt} :es la reflectancia de la superficie

Dentro del módulo FLAASH, se configuran varios parámetros específicos del área de estudio, como la altitud sobre el nivel del mar (msnm), el tipo de aerosol presente (urbano, rural, etc.), la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, y las condiciones estacionales del lugar, como la selección de modelos atmosféricos para verano o invierno (por ejemplo, 'Mid-Latitude Summer') ver Figura 23.

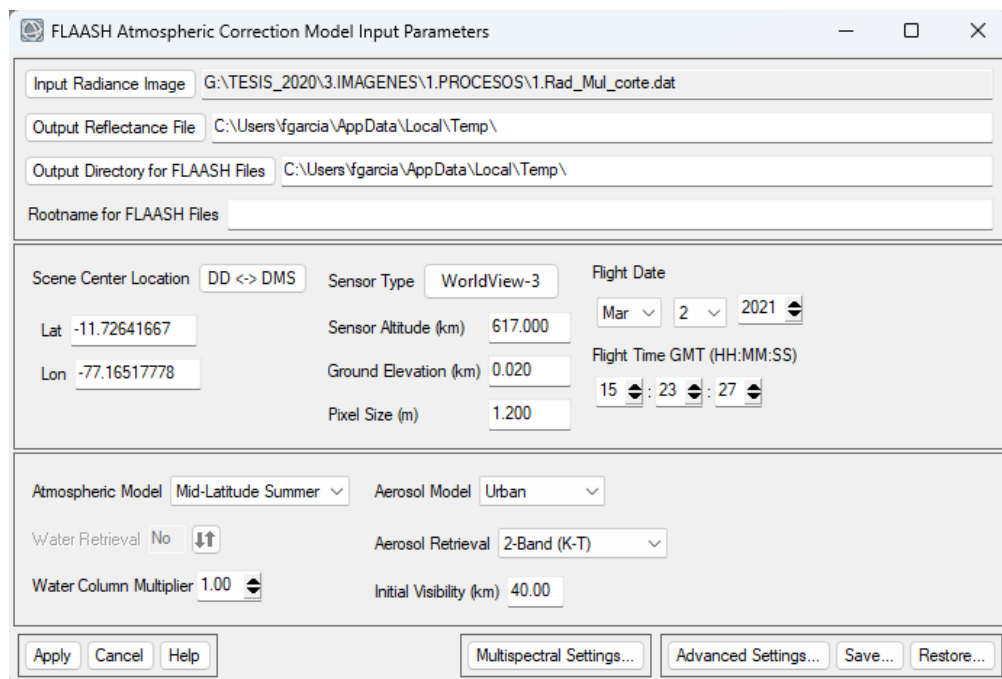


Figura 23. Interfaz del programa para la entrada de parámetros atmosféricos.

4.3 Pansharpening

En este proceso utilizamos el método de fusión de imágenes Gram-Schmidt, que se basa en el algoritmo de ortogonalización de Gram-Schmidt, comúnmente utilizado para transformar un conjunto de vectores no ortogonales en un conjunto de vectores ortogonales. En el contexto de

imágenes satelitales, cada banda (pancromática, roja, verde, azul e infrarroja) se considera un vector de alta dimensión, donde el número de dimensiones corresponde al número de píxeles de la imagen.

El objetivo del pansharpening es fusionar la alta resolución espacial de la imagen pancromática con la información espectral de las bandas multiespectrales (MS) de baja resolución, resultando en una imagen de alta resolución tanto espacial como espectral. El procedimiento en el método Gram-Schmidt incluye los siguientes pasos:

4.3.1 Creación de una banda simulada de baja resolución

El primer paso consiste en generar una imagen pancromática simulada de baja resolución a partir de un promedio ponderado de las bandas multiespectrales (MS). Esta imagen simulada se utiliza como una aproximación para relacionar la imagen pancromática con las bandas MS.

$$P_{sim} = \omega_1 \cdot B_1 + \omega_2 \cdot B_2 + \dots + \omega_n \cdot B_n$$

Donde:

- P_{sim} es la banda pancromática simulada de baja resolución,
- $B_1, B_2, \dots, B_n$ son las bandas multiespectrales,
- $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ son los pesos asociados a cada banda.

4.3.2 Ortogonalización mediante gram-schmidt

Cada banda multiespectral se trata como un vector en un espacio de alta dimensión (donde el número de dimensiones corresponde al número de píxeles de la imagen). El algoritmo de Gram-Schmidt toma estos vectores (bandas) y los transforma en un conjunto de vectores ortogonales.

$$\begin{aligned} U_1 &= V_1 \\ U_2 &= V_2 - \text{proy}_{U_1}(V_2) \\ U_3 &= V_3 - \text{proy}_{U_1}(V_3) - \text{proy}_{U_2}(V_3) \end{aligned}$$

Donde U_i son los vectores ortogonales resultantes y proy es la proyección de un vector sobre otro.

4.3.3 Reemplazo y ajuste

Después de la orthogonalización, la banda pancromática simulada de baja resolución se reemplaza por la imagen pancromática de alta resolución real. Esto permite integrar la alta resolución espacial (ver Figura 24) de la banda pancromática en las bandas multiespectrales, manteniendo la integridad espectral de estas últimas.

Finalmente, las bandas multispectrales transformadas se regresan a su espacio original de alta resolución utilizando las transformaciones inversas del proceso Gram-Schmidt



Figura 24. Las imagines antes (derecha y centro) y el producto final (izquierda).

4.4 Calibración de la reflectancia

Este procedo consiste en ajustar todas las bandas a una misma escala de reflectancia, asegurando que los valores de las ocho bandas (la banda costera abarca de 400 a 450 nm, la azul de 450 a 510 nm, la verde de 510 a 580 nm, la amarilla de 585 a 625 nm y la roja de 630 a 690 nm. En el infrarrojo cercano, la banda NIR1 va de 705 a 745 nm y la NIR2 de 770 a 895 nm) de la imagen fusionada mediante **pansharpening** queden en el rango adecuado de reflectancia. Esto se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$R = \left\{ 0, si B \leq 0 \ 1, si B \geq 10000 \ \frac{B}{10000}, si 0 < B < 10000 \right\}$$

Donde:

- R es la reflectancia normalizada,
- B es el valor de la banda a convertir.

Esta fórmula asegura que:

- Los valores de la banda que son menores o iguales a 0 se asignan a 0, lo que representa la reflectancia mínima.
- Los valores mayores o iguales a 10000 se ajustan a 1, que es el valor máximo de reflectancia.
- Los valores entre 0 y 10000 se escalan proporcionalmente dividiéndolos por 10000 para obtener valores entre 0 y 1.

Este procedimiento estandariza la reflectancia de todas las bandas de la imagen (Ver Figura 25), lo que permite una interpretación más precisa de los datos espectrales en análisis posteriores.

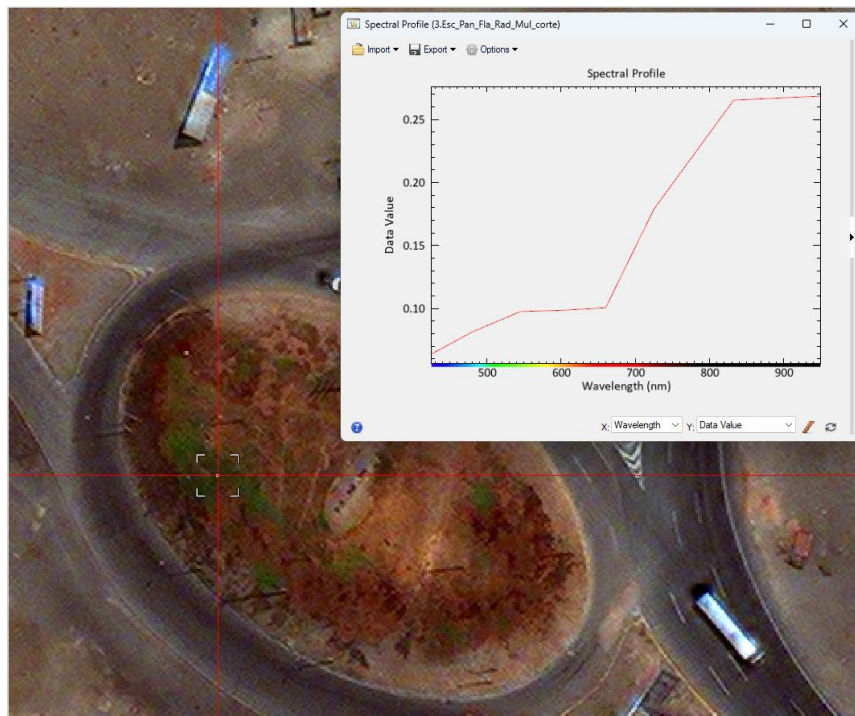


Figura 25. Reflectancia de un píxel de la imagen

4.5 Corrección geométrica

Las imágenes satelitales pueden presentar distorsiones debido a movimientos de la plataforma de captura, como cabeceo, aleteo o cambios de rumbo. Para corregir estas distorsiones y ajustar la información espacial a un sistema de referencia determinado, se realizó una corrección geométrica utilizando el Modelo de Superficie Digital Global de ALOS, conocido como "ALOS World 3D - 30m (AW3D30)", el cual ofrece una resolución espacial de 30 metros y se basa en el modelo geoidal EGM96 y el sistema de proyección WGS84.

Además, se emplearon puntos de control para refinar el ajuste geométrico. Estos puntos (ver Figura 26) fueron recolectados con un receptor geodésico satelital de doble frecuencia, logrando una precisión no mayor a 10 mm en las coordenadas calculadas. Los puntos utilizados fueron (Ver Anexo 02 Puntos de control GNSS):

Esta corrección garantiza que las imágenes se alineen correctamente con la topografía y los sistemas de coordenadas definidos, mejorando su precisión para análisis posteriores.

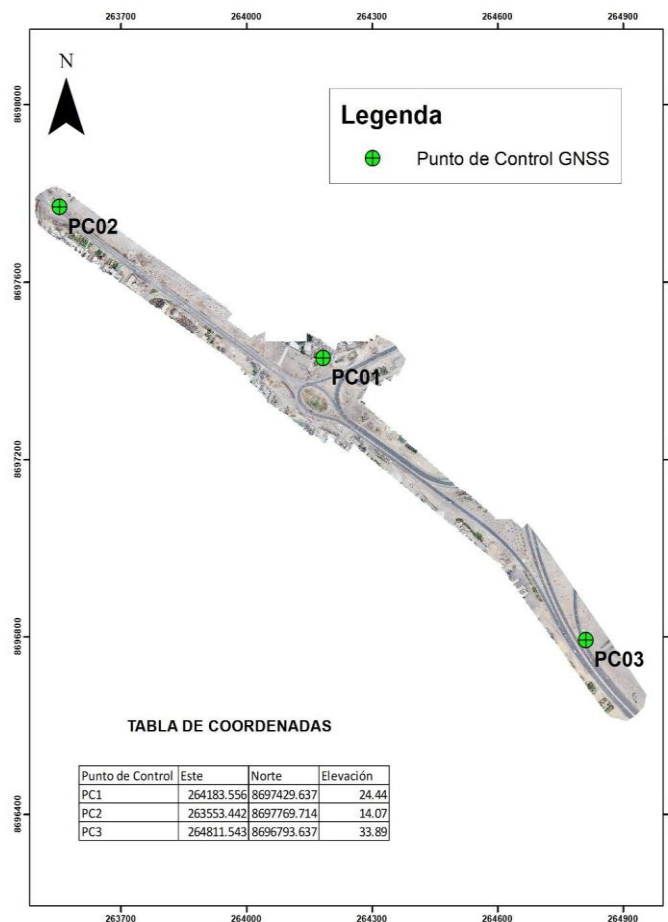


Figura 26. Ubicación de puntos de control GNSS

4.6 Clasificación espectral

En esta sección se delimita y enmascara la zona de interés, correspondiente a la Av. Julio C. Tello, ubicada en el distrito de Ancón, según lo descrito previamente en el apartado 3.1 "Descripción de la zona de estudio". Utilizando la imagen satelital WV3 ya procesada y la biblioteca de firmas espectrales elaborada en el apartado 3 "Metodología para creación de una biblioteca espectral", se emplea la herramienta de clasificación SAM (Spectral Angle Mapper) en el software ENVI.

La clasificación se realiza en tres grupos: Bueno, Regular y Malo, los cuales se representan mediante un esquema de colores tipo semáforo para facilitar su identificación visual. Como se puede observar en la Figura 27, esta clasificación permite una interpretación clara del estado superficial de la vía en la zona estudiada.



Figura 27. Clasificación del pavimento de la zona de estudio

Capítulo V: Comparación de resultados y calibración del sistema automatizado

En este capítulo se presentan los resultados de la comparación y validación obtenidos a través del sistema automatizado de clasificación espectral SAM (Spectral Angle Mapper), utilizando como principales métricas de evaluación la matriz de confusión y el índice Kappa (Ver Tabla 7). Para la validación, se emplearon 46 muestras representativas tomadas en la zona de estudio, las cuales fueron evaluadas también mediante el Índice de Condición del Pavimento (PCI) en cada uno de los puntos seleccionados (ver Anexo 5). La selección de estas muestras de validación se basó en una inspección directa de los pavimentos flexibles, considerando diferentes niveles de deterioro observados en campo (Ver Figura 28). Durante la calibración del sistema automatizado, se utilizó un coeficiente angular (α) en el rango de 0.7 a 0.8 en el algoritmo SAM, acorde a la bibliografía y las condiciones específicas de la zona de estudio. Este ajuste permitió afinar los parámetros de clasificación, adaptándolos a las características espectrales de los pavimentos flexibles presentes en la región analizada y mejorando la precisión de la clasificación.

Esta calibración contribuyó significativamente a la fiabilidad de los resultados obtenidos en el proceso de clasificación, facilitando un análisis más detallado del estado de deterioro superficial de los pavimentos y asegurando la concordancia entre los resultados del sistema y las condiciones reales observadas en campo

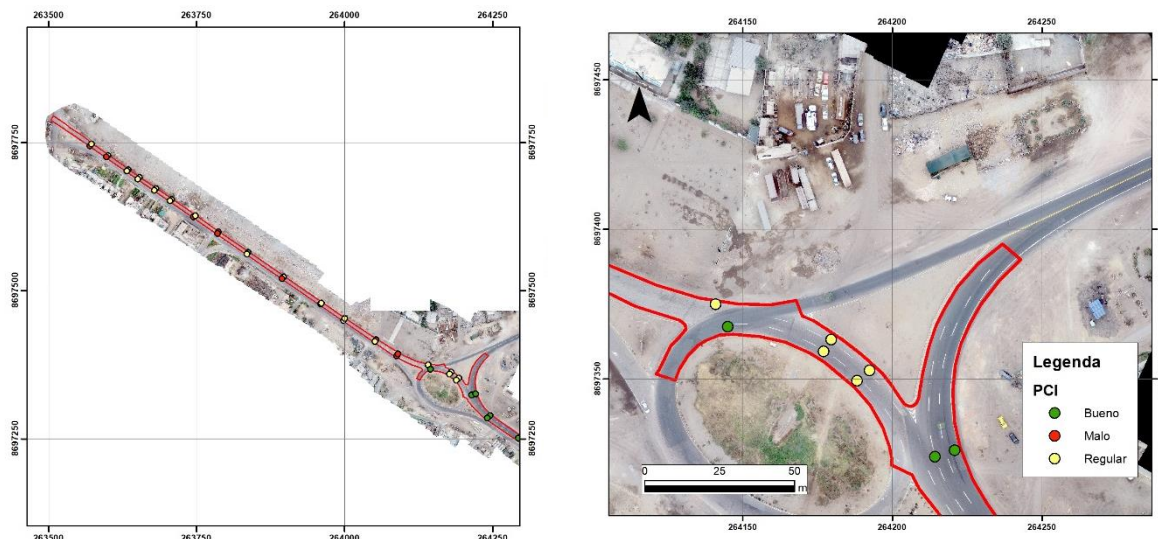


Figura 28. Distribución de las muestras levantadas en campo

Tabla 7. Matriz de Confusión

		Datos de referencia (muestras de campo)				Exactitud Usuario	Error Comisión
		Bueno	Regular	Malo	Total		
Datos de clasificación (WV3)	Bueno	15	3	0	18	0.83	0.17
	Regular	4	15	0	19	0.79	0.21
	Malo	0	3	6	9	0.67	0.33
	Total	19	21	6	46		
	Exactitud productora	0.79	0.71	1			
	Error Omisión	0.21	0.29	0			
	Fiabilidad Global	0.78					
	Índice Kappa	0.65					

5.1 Resultados de la comparación

La matriz de confusión muestra que la clase "Bueno" alcanzó una exactitud de usuario de 83% y un error de comisión de 17%, lo que indica que la mayoría de los píxeles clasificados como "Bueno" corresponden correctamente a esta categoría en el terreno.

Por su parte, la clase "Regular" obtuvo una exactitud de usuario de 79% y un error de comisión de 21%, lo que significa que la mayor parte de los píxeles clasificados como "Regular" se asignan adecuadamente, aunque todavía existe un porcentaje de asignaciones incorrectas.

En contraste, la clase "Malo" registró una exactitud de usuario de 67% y un error de comisión de 33%, evidenciando que un tercio de los píxeles clasificados como "Malo" en realidad pertenecen a otras categorías.

En cuanto a la exactitud del productor, la clase "Bueno" alcanzó un 79%, mientras que "Regular" llegó a 71% y "Malo" se clasificó correctamente en su totalidad (100%). De manera coherente, los errores de omisión fueron de 21% para "Bueno", 29% para "Regular" y 0% para "Malo".

Finalmente, el índice Kappa obtenido es 0.65, lo que indica un acuerdo moderado entre la clasificación automatizada y los datos de referencia, mientras que la

fiabilidad global, de 0.78, refleja un nivel razonable de precisión en la clasificación general del estado del pavimento. No obstante, persisten áreas de mejora, particularmente en la identificación de la clase “Malo” y en la diferenciación de la clase “Regular”

5.2 Interpretación de resultados

Desde un punto de vista práctico, la metodología desarrollada ha demostrado ser efectiva para la estimación del estado superficial del pavimento flexible, con una concordancia superior al 78% en términos de fiabilidad global. Esto indica que el sistema automatizado es una herramienta viable para realizar estimaciones a gran escala en la red vial, con una cobertura de análisis aproximada de 1 km por tramo de carretera evaluado. Ver Figura 29. y Tabla 8.

A pesar de los resultados positivos, se han identificado oportunidades de mejora en la clasificación de la clase "Regular", Ver Tabla 7, donde se han observado algunos errores de omisión y comisión. Esto resalta la posibilidad de mejora del sistema mediante el uso de insumos satelitales de mayor calidad, tanto en capacidad espectral como espacial, especialmente para la diferenciación en las firmas espectrales asociadas a los niveles más moderados y graves de deterioro. En conjunto, la metodología propuesta proporciona una base sólida para futuras investigaciones y mejoras en la clasificación espectral del pavimento flexible, con el potencial de convertirse en una herramienta fundamental para la gestión y mantenimiento de la infraestructura vial.

Tabla 8. Clasificación del Pavimento

N	Clasificación	Color	Observación
1	Bueno	Verde	Pavimento su estado inicial o con pocos signos de desgaste.
2	Regular	Amarillo	Pavimento que presenta una pérdida moderada de la capa superficial de asfalto, con deterioro leve pero visible
3	Malo	Rojo	Pavimento con un nivel avanzado de envejecimiento, donde se ha perdido gran parte de la capa asfáltica, dejando expuesta la grava subyacente.



Figura 29. En la imagen de la izquierda esta la clasificación propuesta y en la derecha las muestras recolectadas en campo para su comparación.

Conclusiones

Se logró con éxito la integración entre la espectrometría del pavimento flexible y la espectrometría de las imágenes satelitales, lo que permitió desarrollar una herramienta preliminar de evaluación remota y automatizada para identificar y analizar el deterioro superficial en pavimentos flexibles. Este avance ofrece una alternativa eficiente y de bajo costo frente a los métodos tradicionales de inspección. Se generó una biblioteca de firmas espectrales representativa de los diferentes estados superficiales del pavimento flexible. Las mediciones se realizaron en campo utilizando un espectrómetro portátil lo que permitió capturar y documentar las variaciones espectrales asociadas a las distintas condiciones de deterioro, como la pérdida de asfalto.

La clasificación de las firmas espectrales de los daños superficiales se realizó de manera exitosa, permitiendo diferenciar claramente los distintos niveles de deterioro en el pavimento. Se logró identificar y discriminar el nivel pérdida de material asfáltico, proporcionando una herramienta precisa para la toma de decisiones en el mantenimiento vial.

Para el procesamiento y clasificación de las imágenes satelitales se empleó el algoritmo Spectral Angle Mapper (SAM) orientado a la clasificación por píxeles. La matriz de confusión revela que la clasificación es precisa para la categoría "Bueno" (exactitud de usuario de 83%), "Regular" (exactitud de usuario de 79%), mientras que "Malo" (exactitud de usuario de 67%) presenta limitaciones. Se obtuvieron clasificaciones precisas, relacionadas con los niveles de deterioro superficial del pavimento flexible, alcanzando una exactitud temática global al 78% comparado con una evaluación tradicional. Esta precisión confirma la viabilidad de utilizar esta metodología como soporte en la gestión y conservación de infraestructuras viales.

Recomendaciones

Mejorar la biblioteca de firmas espectrales se sugiere continuar ampliando la biblioteca de firmas espectrales, incorporando más tipos de daños y niveles de deterioro del pavimento flexible con un mayor rango espectral. Además, incluir diferentes tipos de superficies de pavimento, como pavimentos rígidos y otros tipos de asfalto.

Desde un punto de vista práctico, la metodología desarrollada ha demostrado ser efectiva para la estimación del estado superficial del pavimento flexible, con una concordancia superior al 78% en términos de fiabilidad global. Esto indica que el sistema automatizado es una herramienta viable para realizar estimaciones a gran escala en la red vial, con una cobertura de análisis aproximada de 1 km por tramo de carretera evaluado. Ver Figura 28 y Tabla 8.

A pesar de los resultados positivos, se identificaron ciertas limitaciones en la clasificación de la clase "Malo", ver Tabla 7, la cual presentó tantos errores de comisión considerables. Esto sugiere la necesidad de seguir mejorando la calibración del sistema, especialmente en las firmas espectrales asociadas a los niveles más moderados y graves de deterioro. Sin embargo, la metodología propuesta proporciona una base sólida para futuras investigaciones y mejoras en la clasificación espectral del pavimento flexible, con el potencial de convertirse en una herramienta fundamental para la gestión y mantenimiento de la infraestructura vial.

Se recomienda implementar tecnologías de sensores más avanzados, como imágenes hiperespectrales, para complementar los resultados actuales y mejorar la precisión en la clasificación. Con el avance de la tecnología satelital se prevé un notable incremento en la capacidad espacial y espectral, lo que permitirá optimizar la clasificación general, especialmente en la identificación de la clase "Regular". Se aconseja continuar utilizando y actualizando los insumos satelitales,

Se recomienda investigar el uso de técnicas de inteligencia artificial, como el aprendizaje automático (machine learning), para mejorar el proceso de clasificación y análisis de las imágenes satelitales.

Adoptar la herramienta a nivel institucional se recomienda promover la adopción de esta tecnología por parte de organismos encargados de la gestión vial, como el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), gobiernos regionales y entidades privadas encargadas del mantenimiento vial. La implementación de esta herramienta contribuiría significativamente a optimizar los recursos destinados a la conservación de carreteras, reduciendo costos y tiempos de intervención.

Se sugiere desarrollar protocolos de monitoreo continuo de carreteras, utilizando imágenes satelitales de alta resolución y espectrometría como parte del mantenimiento periódico de las vías. Esto permitiría detectar el deterioro en sus primeras etapas, facilitando intervenciones preventivas y mejorando la vida útil del pavimento flexible.

Referencias bibliográficas

- Alonso-Sarría, F. (2013). *Fundamentos de la teledetección*. Universidad de Murcia. https://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node69_ct.html
- ASTM International. (2016). *ASTM D6433-16. Standard practice for roads and parking lots pavement condition index surveys*. ASTM International.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial*. Ediciones Rialp.
- Chuvieco, E. (2010). *Fundamentos de teledetección espacial* (4ª ed.). Ariel.
- González, J., Y Martínez, A. (2019). Evaluación de algoritmos de machine learning en la clasificación de imágenes satelitales multiespectrales, caso: Amazonia peruana. *Archivos*, 6(1). https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i1.1843.
- Harris Geospatial. (2020). *FLAASH Atmospheric Correction Module. NV5 Geospatial Software*. <https://www.nv5geospatialsoftware.com/docs/FLAASH.html>
- Hernández, J., y Montaner, D. (2009). *Patrones de respuesta espectral [Monografía]. Lab. Geomática y Ecología del Paisaje (GEP) – Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile*.
- Labrador, V., García, M., y Pastor, M. (2012). *Satélites de teledetección para la gestión del territorio*. Editorial Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias
- Leguía Loarte, P. B., Y Pacheco Risco, H. F. (2016). *Evaluación superficial del pavimento flexible por el método pavement condition index (PCI) en las vías arteriales: Cincuentenario, Colón y Miguel Grau (Huacho-Huaura-Lima)* [Tesis de Pregrado, Universidad de San Martín de Porres]. Repositorio de tesis USMP. <https://repositorio.usmp.edu.pe/handle/20.500.12727/2311>
- Miranda, F. (2010). *Diseño de pavimentos asfálticos en vías urbanas*. Editorial Técnica.
- Morales, D., y Orozco, Y. (2015). *Colección de firmas espectrales de los deterioros superficiales en estructuras de pavimento rígido en la ciudad de Bogotá* [Monografía, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio de Tesis UDISTRITA. <http://hdl.handle.net/11349/3690>
- Ndehedehe, C. E., & James, E. E. (2013). Assessment of spectral angle mapper and binary encoding in the quantification of the built environment from multi-spectral Landsat imagery. *New York Science Journal*, 6(12), 107-109.

- Pérez, R. (2007). *Comportamiento resiliente de materiales granulares en pavimentos flexibles: Estado del conocimiento*. *Revista Ingenierías, Universidad de Medellín*, 6(11), 65–90.
- Rashmi, S., Addamani, S., Venkat, & Ravikiran. (2014). Spectral angle mapper algorithm for remote sensing image classification. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology (IJSET)*, 1(8), 201.
- Reyes, F., y Rondón, H. (2022). *Pavimentos: materiales, construcción y diseño* (2.a ed.). ECOE Ediciones.
- Shahim, M. Y., y Khon, S. D. (1978). *PCI: Método de evaluación de pavimentos*. Editorial Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos.
- Suárez, J. (2012). *Metodología para el diseño y rehabilitación de pavimentos*. Editorial Científica.
- Suárez, R. (2012). *Tecnología de pavimentos asfálticos*. Editorial Universitaria.

ANEXOS

Anexo 01 Ficha técnica Espectroradiómetro



NO. DM-01400-001
REV. 03

8°/Hemispherical Reflectance Calibration CERTIFICATE

SERIAL NUMBER: 7A21H-2228
DATE OF REPORT: June 27, 2011
PAGE 1 OF 3

CALIBRATION LABORATORY: Labsphere, Inc., Reflectance Calibration Laboratory
231 Shaker Street
North Sutton, NH 03260
Tel 603-927-4266 Fax 603-927-4694

CALIBRATED REFLECTANCE COMPONENT
SRT-99-020 Reflectance Target

CALIBRATION REQUESTED
8°/Hemispherical Spectral Reflectance Calibration over the range 250 – 2500 nm, reported at 50 nm intervals

APPLICABLE DOCUMENTS
DM-13001-000 Product Appearance and Mechanical-fit Requirements
DM-01100-000 General Reflectance Calibration Requirements
DM-01400-000 8°/Hemispherical Reflectance Calibration of Targets and Reflectance Standards

TEST AND TEST METHOD
The 8°/Hemispherical Spectral Reflectance was measured for the sample listed above. The calibration was performed with standards traceable to the U.S. National Institute of Standards and Technology (NIST). The reflectance was determined by using a Perkin-Elmer double beam ratio recording spectrophotometer equipped with a Labsphere integrating sphere reflectance accessory. Incident flux at 8° from normal was reflected from the above sample then radiated onto the internal surface of the integrating sphere. The sphere's internal surface radiance was proportional to that of a laboratory working standard used to determine the spectral reflectance.

NATIONAL LABORATORY TRACEABLE STANDARD(S):

	Lambda 900A	Lambda 900B	Lambda 950C
		X	
Instrument	Serial No. 101N 3060902	Serial No. 70038	Serial No. 950N9031801
Accessory	PELA-1000 Serial No. 05220314341	PELA-1000 Serial No. 08220625262	PELA-1000 Serial No. 1203088776
Primary Standard	M12-7880 NIST Report No. 844/279034-10 Calibrated April 15, 2010	M12-7880 NIST Report No. 844/279034-10 Calibrated April 15, 2010	M12-7880 NIST Report No. 844/279034-10 Calibrated April 15, 2010

CALIBRATION RESULTS MEETS SPECIFICATIONS
See Table 1 "8°/Hemispherical Spectral Reflectance Factor"
See Graph 1 "8°/Hemispherical Spectral Reflectance Factor"

LABORATORY ENVIRONMENT
Temperature: 23 ± 3°C.

ESTIMATE CALIBRATION UNCERTAINTY
The random uncertainty, expressed by standard deviation, of reflectance measurements performed by Labsphere, Inc. is less than 0.005 for the spectral range 300-2200 nm, and is less than or equal to 0.020 over the spectral range 250-2500 nm.

CALIBRATION INTERVAL
If the product is handled with care, recalibration is recommended after one year of use at the discretion of the user.

This certificate shall not be reproduced except in full, without the written approval of Labsphere, Inc.

Calibrated by:
Title: Optical Calibration Technician
Date: June 27, 2011

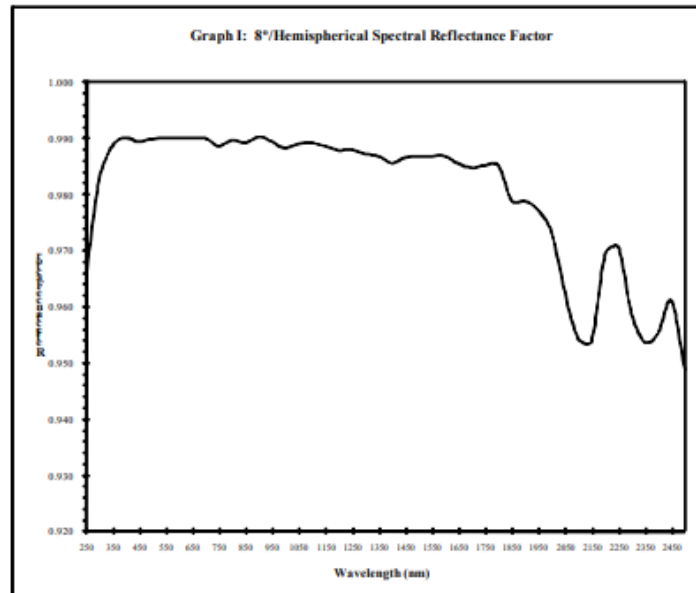




NO. DM-01400-001
REV. 03

8°/Hemispherical Reflectance Calibration CERTIFICATE

SERIAL NUMBER: 7A21H-2228
DATE OF REPORT: June 27, 2011
PAGE 3 OF 3





NO. DM-01400-001
REV. 03

8°/Hemispherical Reflectance Calibration CERTIFICATE

SERIAL NUMBER: 7A21H-2228
DATE OF REPORT: June 27, 2011
PAGE 2 OF 3

Table 1
8°/Hemispherical Spectral Reflectance Factor for SRT-99-020 Reflectance Target

Wavelength (nm)	Reflectance Factor		Wavelength (nm)	Reflectance Factor
250	0.965	*	1400	0.986
300	0.982		1450	0.986
350	0.989		1500	0.987
400	0.990		1550	0.987
450	0.989		1600	0.987
500	0.990		1650	0.985
550	0.990		1700	0.985
600	0.990		1750	0.985
650	0.990		1800	0.985
700	0.990		1850	0.979
750	0.989		1900	0.979
800	0.990		1950	0.977
850	0.989		2000	0.973
900	0.990		2050	0.962
950	0.989		2100	0.954
1000	0.988		2150	0.954
1050	0.989		2200	0.969
1100	0.989		2250	0.971
1150	0.989		2300	0.959
1200	0.988		2350	0.954
1250	0.988		2400	0.955
1300	0.987		2450	0.961
1350	0.987		2500	0.949

*Not Certified at 250 nm

Standard Tolerances		
WAVELENGTH	MIN	MAX
250	0.925	
300	0.925	
350	0.975	0.995
400-700	0.985	0.995
750-1600	0.975	0.995
1650-2500	0.925	



Anexo 02 Especificaciones técnicas de worldview-3



WORLDVIEW-3

 DATA SHEET

WorldView-3

WorldView-3 is the industry's first multi-payload, super-spectral, high-resolution commercial satellite. Operating at an altitude of 617 km, WorldView-3 provides 31 cm panchromatic resolution, 1.24 m multispectral resolution, 3.7 m short-wave infrared resolution, and 30 m CAVIS resolution. WorldView-3 has an average revisit time of less than one day and is capable of collecting up to 680,000 sq km per day, further enhancing the Maxar collection capacity for more rapid and reliable collection.

Features

- Very high resolution
- Panchromatic 31 cm
- Visible & near-infrared 1.24 m
- Short-wave infrared 3.7 m
- CAVIS 30 m
- The most spectral diversity commercially available:
 - Panchromatic band
 - 4 standard VNIR colors: blue, green, red, near-IR1
 - 4 added VNIR colors: coastal, yellow, red edge, and near-IR2
 - 8 SWIR bands: penetrates haze, fog, smog, dust and smoke
 - 12 CAVIS bands: maps clouds, ice and snow, corrects for aerosol and water vapor
- Industry-leading geolocation accuracy
- High capacity in various collection modes
- Bi-directional scanning
- Rapid retargeting using Control Moment Gyros (two times faster than any competitor)
- Direct Access tasking from and image transmission to customer sites

Benefits

- Daily revisits
- Simultaneous, high-resolution
- Super-spectral imagery
- Large area mono and stereoscopic collection eliminates temporal variations
- Precision geolocation possible without ground control points
- Global capacity of 680,000 sq km per day
- New and enhanced applications including:
 - Mapping
 - Land classifications
 - Disaster preparedness/response
 - Feature extraction/change detection
 - Soil/vegetative analysis
 - Geology: Oil & gas, mining
 - Environmental monitoring
 - Bathymetry/coastal applications
- Superior haze penetration




WorldView-3 artist rendering

MAXAR

Specifications

Orbit	Altitude: 617 km Type: Sun synchronous, 10:30 am descending node Period: 97 min
Life	Spec mission life: 7.25 years Estimated service life: 10 to 12 years
Spacecraft size, mass and power	Size: 5.7 m (18.7 ft) tall x 2.5 m (8 ft) across 7.1 m (23 ft) across deployed solar arrays Mass: 2800 kg (6200 lbs) Power: 3.1 kW solar array, 100 Ahr battery
Sensor bands	Panchromatic: 450-800 nm 8 Multispectral: Coastal: 397-454 nm Red: 626-696 nm Blue: 445-517 nm Red Edge: 698-749 nm Green: 507-586 nm Near-IR1: 765-899 nm Yellow: 580-629 nm Near-IR2: 857-1039 nm 8 SWIR Bands: SWIR-1: 1184-1235 nm SWIR-5: 2137-2191 nm SWIR-2: 1546-1598 nm SWIR-6: 2174-2232 nm SWIR-3: 1636-1686 nm SWIR-7: 2228-2292 nm SWIR-4: 1702-1759 nm SWIR-8: 2285-2373 nm 12 CAVIS Bands: Desert Clouds: 405-420 nm Water-3: 930-965 nm Aerosol-1: 459-509 nm NDVI-SWIR: 1220-1252 nm Green: 525-585 nm Cirrus: 1365-1405 nm Aerosol-2: 635-685 nm Snow: 1620-1680 nm Water-1: 845-885 nm Aerosol-3: 2105-2245 nm Water-2: 897-927 nm Aerosol-3 P: 2105-2245 nm
Sensor resolution (or GSD, Ground Sample Distance; off-nadir is geometric mean)	Panchromatic nadir: 0.31 m 20 degrees off-nadir: 0.34 m Multispectral nadir: 1.24 m 20 degrees off-nadir: 1.38 m SWIR nadir: 3.70 m 20 degrees off-nadir: 4.10 m CAVIS nadir: 30.00 m
Dynamic range	11-bits per pixel pan and MS; 14-bits per pixel SWIR
Swath width	At nadir: 13.1 km
Attitude determination and control	Type: 3-axis Stabilized Actuators: Control Moment Gyros (CMGs) Sensors: Star trackers, precision IRU, GPS
Pointing accuracy and knowledge	Accuracy: <500 m at image start/stop Knowledge: Supports geolocation accuracy below
Retargeting agility	Time to slew 200 km: 12 sec
Onboard storage	2199 GB solid state with EDAC
Communications	Image & ancillary data: 800 and 1200 mbps X-band Housekeeping: 4, 16, 32, or 64 kbps real time, 524 kbps stored, X-band Command: 2 or 64 kbps S-band
Max Contiguous Area Collected in a Single Pass (30 degrees off-nadir angle)	Mono: 66.5 km x 112 km (5 strips) Stereo: 26.6 km x 112 km (2 pairs)
Revisit frequency (at 40 degrees North latitude)	1 m GSD: <1.0 day 4.5 days at 20 degrees off-nadir or less
Geolocation accuracy (CE90)	Predicted <3.5 m CE90 without ground control
Capacity	680,000 sq km per day

COLLECTION SCENARIOS

(30 degrees off-nadir angle)



SENSOR BANDS

-  Panchromatic
-  Multispectral
-  4 additional multispectral bands
-  8 SWIR bands
-  12 CAVIS bands

MAXAR

MXR-DS-WV3 08/20

Anexo 03 Fichas de puntos de control GNSS

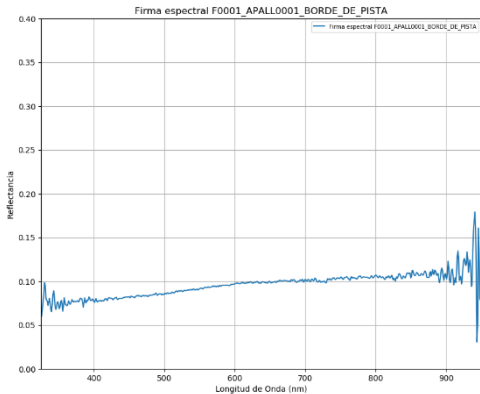
DESCRIPCIÓN DE PUNTOS DE FOTOCONTROL TERRESTRE	
NOMBRE DEL PUNTO: PC-1	UBICACIÓN: Distrito: Ancón / Provincia: Lima / Departamento: Lima
UTM ESTE WGS 84 - ZONA 18 SUR: 263553.442 m	UTM NORTE WGS 84 - ZONA 18 SUR: 8697769.714 m
LATITUD WGS 84 - ZONA 18 SUR: -11.771769744°	LONGITUD WGS 84 - ZONA 18 SUR: -77.169754979°
ALTITUD ELIPSOIDAL: 38.7692m	OBSERVACIONES: Hay acceso vehicular
MAPA DE LA UBICACIÓN DEL PUNTO: 	

DESCRIPCIÓN DE PUNTOS DE FOTOCONTROL TERRESTRE	
NOMBRE DEL PUNTO: PC-2	UBICACIÓN: Distrito: Ancón / Provincia: Lima / Departamento: Lima
UTM ESTE WGS 84 - ZONA 18 SUR: 264811.543 m	UTM NORTE WGS 84 - ZONA 18 SUR: 8696793.637 m
LATITUD WGS 84 - ZONA 18 SUR: -11.780678271°	LONGITUD WGS 84 - ZONA 18 SUR: -77.158284601°
ALTITUD ELIPSOIDAL: 59.8024 m	OBSERVACIONES: Hay acceso vehicular
MAPA DE LA UBICACIÓN DEL PUNTO:	
The map is an aerial photograph with a grid overlay. The horizontal axis (UTM Easting) ranges from 263400 to 263700. The vertical axis (UTM Northing) ranges from 8697600 to 8698000. A red crosshair marks the location of point PC-2 at approximately 263550 Easting and 8697800 Northing. The map shows a residential area on the left and a large open field on the right. A scale bar at the bottom left indicates distances from 0 to 100 meters. A north arrow is located in the upper right quadrant.	

DESCRIPCIÓN DE PUNTOS DE FOTOCONTROL TERRESTRE			
NOMBRE DEL PUNTO: PC-3		UBICACIÓN: Distrito: Ancón / Provincia: Lima / Departamento: Lima	
UTM ESTE WGS 84 - ZONA 18 SUR: 265613.331 m		UTM NORTE WGS 84 - ZONA 18 SUR: 8699503.997 m	
LATITUD WGS 84 - ZONA 18 SUR: -11.756240070°		LONGITUD WGS 84 - ZONA 18 SUR: -77.150739927°	
ALTITUD ELIPSOIDAL: 71.8455 m		OBSERVACIONES: Hay acceso vehicular	
MAPA DE LA UBICACIÓN DEL PUNTO:			
			

Anexo 04 Fichas técnicas de firmas espectrales

FICHA TÉCNICA: FIRMA ESPECTRAL

NOMBRE DE LA MUESTRA:	BORDE DE PISTA	
ID DE LA MUESTRA:	F0001_APALL0001	
TIPO DE MATERIAL:	ARTIFICIAL	
CLASE:	PAVIMENTO ASFÁLTICO	
UBICACIÓN DE ORIGEN:	CARRETERA SERPENTIN DE PASAMAYO	
DISTRITO: ANCÓN	PROVINCIA: LIMA	DEPARTAMENTO: LIMA
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:	11°46'50,56" S 77°09'80,62" W	
FECHA DE RECOLECCIÓN:	Martes 3 de abril del 2018	
HORA DE RECOLECCIÓN:	10:08:34 AM	
CONDICIÓN CLIMÁTICA:	SOLEADO	
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:	ESPECTRORADIÓMETRO ASD HANDHELD 2 N° HH 2 325-1075	
ALTURA DE TOMA:	0.70m	
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:	Pavimento flexible ubicado en la berma de la carretera que presenta moderada desintegración de la superficie de la carpeta asfáltica.	
		
RANGO ESPECTRAL:	325nm a 950nm	
		
NÚMERO DE FIRMAS ANALIZADAS:	9	
Con las firmas tomadas en campo se calcula el coeficiente de variación de cada longitud de onda para determinar la homogeneidad de la muestra. El coeficiente de variación aceptado para este trabajo es de 10 % para cada longitud de onda. Para validar la firma espectral, más del 90% de los coeficientes de variación deben cumplir con este criterio. (Morales Cepeda y Orozco Arcilla, 2015). El 92% de las longitudes de onda de la presente firma espectral no poseen un coeficiente de variación mayor al 10% por lo tanto las firmas espectrales recolectadas en campo cumplen con el criterio de homogeneidad.		

FICHA TÉCNICA: FIRMA ESPECTRAL

NOMBRE DE LA MUESTRA:	ARENA SUELTA	
ID DE LA MUESTRA:	F0002 SAALL0002	
TIPO DE MATERIAL:	SUELO	
CLASE:	AGREGADO FINO	
UBICACIÓN DE ORIGEN:	CARRETERA SERPENTIN DE PASAMAYO	
DISTRITO: ANCÓN	PROVINCIA: LIMA	DEPARTAMENTO: LIMA
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:	11°46'50,28" S 77°09'80,51" W	
FECHA DE RECOLECCIÓN:	Martes 3 de abril del 2018	
HORA DE RECOLECCIÓN:	10:10:53 AM	
CONDICIÓN CLIMÁTICA:	SOLEADO	
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:	ESPECTRORADIÓMETRO ASD HANDHELD 2 N° HH 2 325-1075	
ALTURA DE TOMA:	0.70m	

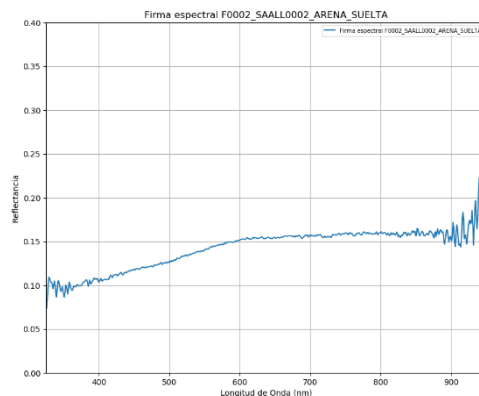
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:

Arena suelta que se encuentra al lado de las bermas de la carretera.



RANGO ESPECTRAL:

325nm a 950nm



NÚMERO DE FIRMAS ANALIZADAS:

10

Con las firmas tomadas en campo se calcula el coeficiente de variación de cada longitud de onda para determinar la homogeneidad de la muestra. El coeficiente de variación aceptado para este trabajo es de 10 % para cada longitud de onda. Para validar la firma espectral, más del 90% de los coeficientes de variación deben cumplir con este criterio. (Morales Cepeda y Orozco Arcilla, 2015).

El **95%** de las longitudes de onda de la presente firma espectral no poseen un coeficiente de variación mayor al 10% por lo tanto las firmas espectrales recolectadas en campo cumplen con el criterio de homogeneidad.

FICHA TÉCNICA: FIRMA ESPECTRAL

NOMBRE DE LA MUESTRA:	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DISGREGACION Y DESINTEGRACION		
ID DE LA MUESTRA:	F0003 APALL0003		
TIPO DE MATERIAL:	ARTIFICIAL		
CLASE:	PAVIMENTO ASFÁLTICO		
UBICACIÓN DE ORIGEN:	CARRETERA SERPENTIN DE PASAMAYO		
DISTRITO: ANCÓN	PROVINCIA: LIMA	DEPARTAMENTO: LIMA	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:	11°46'51,84" S 77°09'84,04" W		
FECHA DE RECOLECCIÓN:	Martes 3 de abril del 2018		
HORA DE RECOLECCIÓN:	10:15:43 AM		
CONDICIÓN CLIMÁTICA:	SOLEADO		
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:	ESPECTRORADIÓMETRO ASD HANDHELD 2 N° HH 2 325-1075		
ALTURA DE TOMA:	0.70m		

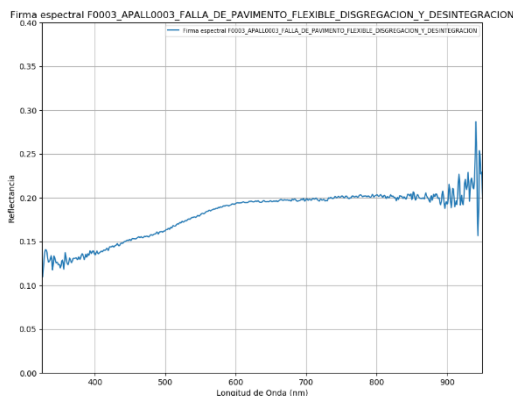
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:

Pavimento flexible que presenta moderada desintegración de la superficie de la carpeta asfáltica.



RANGO ESPECTRAL:

325nm a 950nm



NÚMERO DE FIRMAS ANALIZADAS:

10

Con las firmas tomadas en campo se calcula el coeficiente de variación de cada longitud de onda para determinar la homogeneidad de la muestra. El coeficiente de variación aceptado para este trabajo es de 10 % para cada longitud de onda. Para validar la firma espectral, más del 90% de los coeficientes de variación deben cumplir con este criterio. (Morales Cepeda y Orozco Arcilla, 2015).

El **96%** de las longitudes de onda de la presente firma espectral no poseen un coeficiente de variación mayor al 10% por lo tanto las firmas espectrales recolectadas en campo cumplen con el criterio de homogeneidad.

FICHA TÉCNICA: FIRMA ESPECTRAL

NOMBRE DE LA MUESTRA:	PAVIMENTO EN BUEN ESTADO	
ID DE LA MUESTRA:	F0004 APALL0004	
TIPO DE MATERIAL:	ARTIFICIAL	
CLASE:	PAVIMENTO ASFÁLTICO	
UBICACIÓN DE ORIGEN:	CARRETERA SERPENTIN DE PASAMAYO	
DISTRITO: ANCÓN	PROVINCIA: LIMA	DEPARTAMENTO: LIMA
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:	11°46'54,17" S 77°09'82,49" W	
FECHA DE RECOLECCIÓN:	Martes 3 de abril del 2018	
HORA DE RECOLECCIÓN:	10:23:36 AM	
CONDICIÓN CLIMÁTICA:	SOLEADO	
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:	ESPECTRORADIÓMETRO ASD HANDHELD 2 N° HH 2 325-1075	
ALTURA DE TOMA:	0.70m	

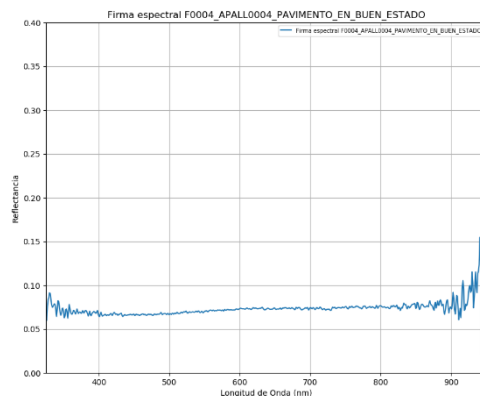
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:

Pavimento flexible en buen estado.



RANGO ESPECTRAL:

325nm a 950nm



NÚMERO DE FIRMAS ANALIZADAS:

20

Con las firmas tomadas en campo se calcula el coeficiente de variación de cada longitud de onda para determinar la homogeneidad de la muestra. El coeficiente de variación aceptado para este trabajo es de 10 % para cada longitud de onda. Para validar la firma espectral, más del 90% de los coeficientes de variación deben cumplir con este criterio. (Morales Cepeda y Orozco Arcilla, 2015).

El 91% de las longitudes de onda de la presente firma espectral no poseen un coeficiente de variación mayor al 10% por lo tanto las firmas espectrales recolectadas en campo cumplen con el criterio de homogeneidad.

FICHA TÉCNICA: FIRMA ESPECTRAL

NOMBRE DE LA MUESTRA:	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DISGREGACION Y DESINTEGRACION		
ID DE LA MUESTRA:	F0005 APALL0005		
TIPO DE MATERIAL:	ARTIFICIAL		
CLASE:	PAVIMENTO ASFÁLTICO		
UBICACIÓN DE ORIGEN:	CARRETERA SERPENTIN DE PASAMAYO		
DISTRITO: ANCÓN	PROVINCIA: LIMA	DEPARTAMENTO: LIMA	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:	11°46'52,30" S 77°09'84,54" W		
FECHA DE RECOLECCIÓN:	Martes 3 de abril del 2018		
HORA DE RECOLECCIÓN:	10:32:00 AM		
CONDICIÓN CLIMÁTICA:	SOLEADO		
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:	ESPECTRORADIÓMETRO ASD HANDHELD 2 N° HH 2 325-1075		
ALTURA DE TOMA:	0.70m		

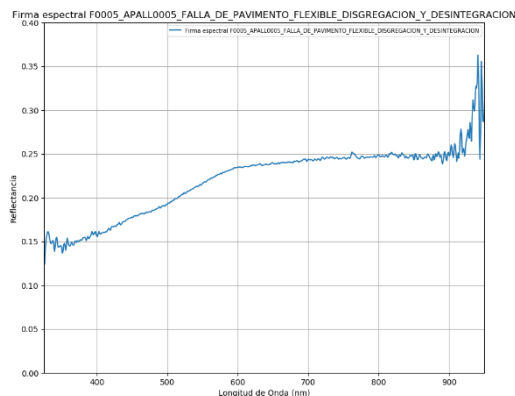
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:

Pavimento flexible que presenta moderada desintegración de la superficie de la carpeta asfáltica.



RANGO ESPECTRAL:

325nm a 950nm



NÚMERO DE FIRMAS ANALIZADAS:

18

Con las firmas tomadas en campo se calcula el coeficiente de variación de cada longitud de onda para determinar la homogeneidad de la muestra. El coeficiente de variación aceptado para este trabajo es de 10 % para cada longitud de onda. Para validar la firma espectral, más del 90% de los coeficientes de variación deben cumplir con este criterio. (Morales Cepeda y Orozco Arcilla, 2015).

El 97% de las longitudes de onda de la presente firma espectral no poseen un coeficiente de variación mayor al 10% por lo tanto las firmas espectrales recolectadas en campo cumplen con el criterio de homogeneidad.

FICHA TÉCNICA: FIRMA ESPECTRAL

NOMBRE DE LA MUESTRA:	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DISGREGACION Y DESINTEGRACION		
ID DE LA MUESTRA:	F0006 APALL0006		
TIPO DE MATERIAL:	ARTIFICIAL		
CLASE:	PAVIMENTO ASFÁLTICO		
UBICACIÓN DE ORIGEN:	CARRETERA SERPENTIN DE PASAMAYO		
DISTRITO: ANCÓN	PROVINCIA: LIMA	DEPARTAMENTO: LIMA	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:	11°46'52,29" S 77°09'84,40" W		
FECHA DE RECOLECCIÓN:	Martes 3 de abril del 2018		
HORA DE RECOLECCIÓN:	10:33:47 AM		
CONDICIÓN CLIMÁTICA:	SOLEADO		
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:	ESPECTRORADIÓMETRO ASD HANDHELD 2 N° HH 2 325-1075		
ALTURA DE TOMA:	0.70m		

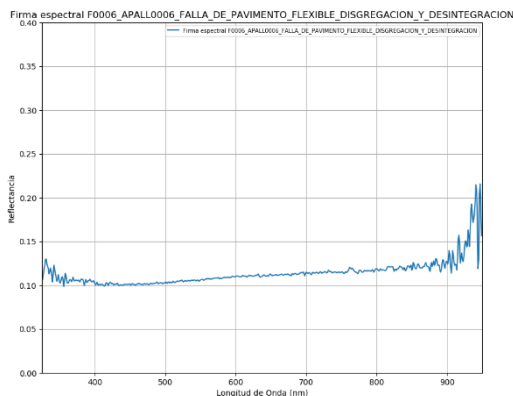
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:

Pavimento flexible que presenta una leve desintegración de la superficie de la carpeta asfáltica.



RANGO ESPECTRAL:

325nm a 950nm



NÚMERO DE FIRMAS ANALIZADAS:

10

Con las firmas tomadas en campo se calcula el coeficiente de variación de cada longitud de onda para determinar la homogeneidad de la muestra. El coeficiente de variación aceptado para este trabajo es de 10 % para cada longitud de onda. Para validar la firma espectral, más del 90% de los coeficientes de variación deben cumplir con este criterio. (Morales Cepeda y Orozco Arcilla, 2015).

El **94%** de las longitudes de onda de la presente firma espectral no poseen un coeficiente de variación mayor al 10% por lo tanto las firmas espectrales recolectadas en campo cumplen con el criterio de homogeneidad.

FICHA TÉCNICA: FIRMA ESPECTRAL

NOMBRE DE LA MUESTRA:	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DISGREGACION Y DESINTEGRACION		
ID DE LA MUESTRA:	F0007 APALL0007		
TIPO DE MATERIAL:	ARTIFICIAL		
CLASE:	PAVIMENTO ASFÁLTICO		
UBICACIÓN DE ORIGEN:	CARRETERA SERPENTIN DE PASAMAYO		
DISTRITO: ANCÓN	PROVINCIA: LIMA	DEPARTAMENTO: LIMA	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:	11°46'52,04" S 77°09'84,35" W		
FECHA DE RECOLECCIÓN:	Martes 3 de abril del 2018		
HORA DE RECOLECCIÓN:	10:35:43 AM		
CONDICIÓN CLIMÁTICA:	SOLEADO		
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:	ESPECTRORADIÓMETRO ASD HANDHELD 2 N° HH 2 325-1075		
ALTURA DE TOMA:	0.70m		

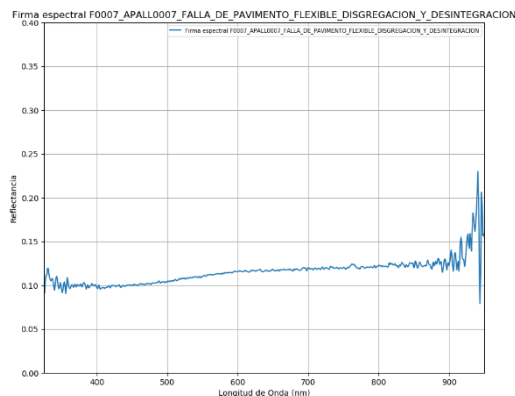
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:

Pavimento flexible que presenta moderada desintegración de la superficie de la carpeta asfáltica.



RANGO ESPECTRAL:

325nm a 950nm



NÚMERO DE FIRMAS ANALIZADAS:

20

Con las firmas tomadas en campo se calcula el coeficiente de variación de cada longitud de onda para determinar la homogeneidad de la muestra. El coeficiente de variación aceptado para este trabajo es de 10 % para cada longitud de onda. Para validar la firma espectral, más del 90% de los coeficientes de variación deben cumplir con este criterio. (Morales Cepeda y Orozco Arcilla, 2015).

El **95%** de las longitudes de onda de la presente firma espectral no poseen un coeficiente de variación mayor al 10% por lo tanto las firmas espectrales recolectadas en campo cumplen con el criterio de homogeneidad.

FICHA TÉCNICA: FIRMA ESPECTRAL

NOMBRE DE LA MUESTRA:	PAVIMENTO EN BUEN ESTADO	
ID DE LA MUESTRA:	F0008 APALL0008	
TIPO DE MATERIAL:	ARTIFICIAL	
CLASE:	PAVIMENTO ASFÁLTICO	
UBICACIÓN DE ORIGEN:	CARRETERA SERPENTIN DE PASAMAYO	
DISTRITO: ANCÓN	PROVINCIA: LIMA	DEPARTAMENTO: LIMA
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:	11°46'33,06" S 79°54'17,70" W	
FECHA DE RECOLECCIÓN:	Martes 3 de abril del 2018	
HORA DE RECOLECCIÓN:	11:02:01 AM	
CONDICIÓN CLIMÁTICA:	SOLEADO	
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:	ESPECTRORADIÓMETRO ASD HANDHELD 2 N° HH 2 325-1075	
ALTURA DE TOMA:	0.70m	

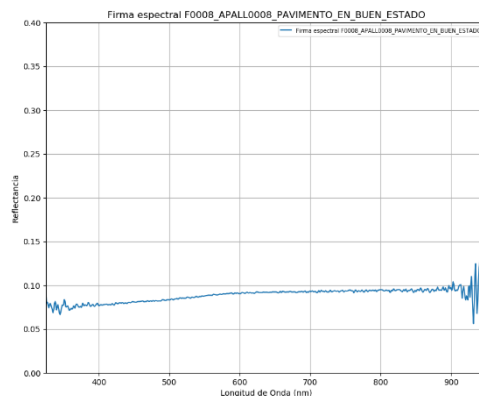
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:

Pavimento flexible en buen estado.



RANGO ESPECTRAL:

325nm a 950nm



NÚMERO DE FIRMAS ANALIZADAS:

12

Con las firmas tomadas en campo se calcula el coeficiente de variación de cada longitud de onda para determinar la homogeneidad de la muestra. El coeficiente de variación aceptado para este trabajo es de 10 % para cada longitud de onda. Para validar la firma espectral, más del 90% de los coeficientes de variación deben cumplir con este criterio. (Morales Cepeda y Orozco Arcilla, 2015).

El **95%** de las longitudes de onda de la presente firma espectral no poseen un coeficiente de variación mayor al 10% por lo tanto las firmas espectrales recolectadas en campo cumplen con el criterio de homogeneidad.

FICHA TÉCNICA: FIRMA ESPECTRAL

NOMBRE DE LA MUESTRA:	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE GRIETAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES	
ID DE LA MUESTRA:	F0009 APALL0009	
TIPO DE MATERIAL:	ARTIFICIAL	
CLASE:	PAVIMENTO ASFÁLTICO	
UBICACIÓN DE ORIGEN:	CARRETERA SERPENTIN DE PASAMAYO	
DISTRITO: ANCÓN	PROVINCIA: LIMA	DEPARTAMENTO: LIMA
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:	11°46'32,93" S 77°10'15,99" W	
FECHA DE RECOLECCIÓN:	Martes 3 de abril del 2018	
HORA DE RECOLECCIÓN:	11:06:05 AM	
CONDICIÓN CLIMÁTICA:	SOLEADO	
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:	ESPECTRORADIÓMETRO ASD HANDHELD 2 N° HH 2 325-1075	
ALTURA DE TOMA:	0.70m	

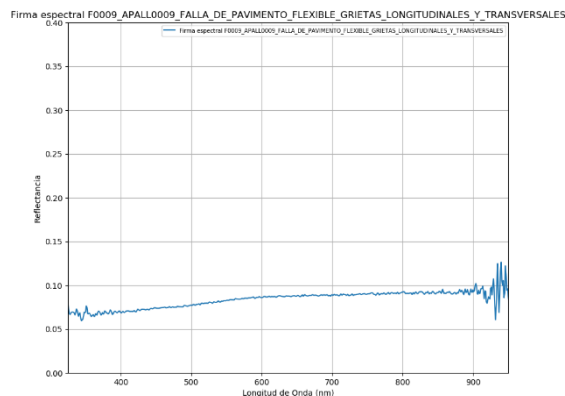
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:

Pavimento flexible con presencia de grietas longitudinales.



RANGO ESPECTRAL:

325nm a 950nm



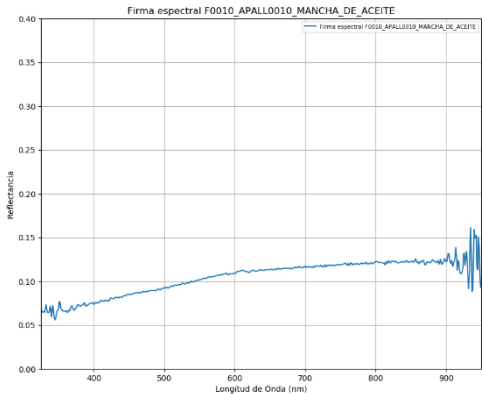
NÚMERO DE FIRMAS ANALIZADAS:

15

Con las firmas tomadas en campo se calcula el coeficiente de variación de cada longitud de onda para determinar la homogeneidad de la muestra. El coeficiente de variación aceptado para este trabajo es de 10 % para cada longitud de onda. Para validar la firma espectral, más del 90% de los coeficientes de variación deben cumplir con este criterio. (Morales Cepeda y Orozco Arcilla, 2015).

El **96%** de las longitudes de onda de la presente firma espectral no poseen un coeficiente de variación mayor al 10% por lo tanto las firmas espectrales recolectadas en campo cumplen con el criterio de homogeneidad.

FICHA TÉCNICA: FIRMA ESPECTRAL

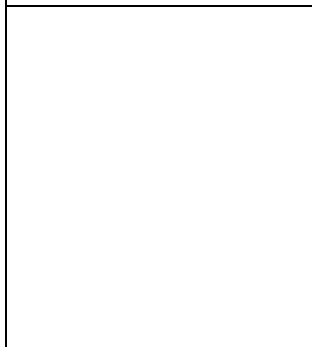
NOMBRE DE LA MUESTRA:	MANCHA DE ACEITE	
ID DE LA MUESTRA:	F0010 APALL0010	
TIPO DE MATERIAL:	ARTIFICIAL	
CLASE:	PAVIMENTO ASFÁLTICO	
UBICACIÓN DE ORIGEN:	CARRETERA SERPENTIN DE PASAMAYO	
DISTRITO: ANCÓN	PROVINCIA: LIMA	DEPARTAMENTO: LIMA
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:	11°46'33,00" S 77°10'15,56" W	
FECHA DE RECOLECCIÓN:	Martes 3 de abril del 2018	
HORA DE RECOLECCIÓN:	11:08:53 AM	
CONDICIÓN CLIMÁTICA:	SOLEADO	
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:	ESPECTRORADIÓMETRO ASD HANDHELD 2 N° HH 2 325-1075	
ALTURA DE TOMA:	0.70m	
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:		
Pavimento flexible con presencia de manchas de aceite sobre su superficie.		
		
RANGO ESPECTRAL:	325nm a 950nm	
		
NÚMERO DE FIRMAS ANALIZADAS:	4	
Con las firmas tomadas en campo se calcula el coeficiente de variación de cada longitud de onda para determinar la homogeneidad de la muestra. El coeficiente de variación aceptado para este trabajo es de 10 % para cada longitud de onda. Para validar la firma espectral, más del 90% de los coeficientes de variación deben cumplir con este criterio. (Morales Cepeda y Orozco Arcilla, 2015). El 97% de las longitudes de onda de la presente firma espectral no poseen un coeficiente de variación mayor al 10% por lo tanto las firmas espectrales recolectadas en campo cumplen con el criterio de homogeneidad.		

FICHA TÉCNICA: FIRMA ESPECTRAL

NOMBRE DE LA MUESTRA:	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DEPRESIONES	
ID DE LA MUESTRA:	F0011 APALL0011	
TIPO DE MATERIAL:	ARTIFICIAL	
CLASE:	PAVIMENTO ASFÁLTICO	
UBICACIÓN DE ORIGEN:	CARRETERA SERPENTIN DE PASAMAYO	
DISTRITO: ANCÓN	PROVINCIA: LIMA	DEPARTAMENTO: LIMA
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:	11°46'33,20" S 77°10'16,09" W	
FECHA DE RECOLECCIÓN:	Martes 3 de abril del 2018	
HORA DE RECOLECCIÓN:	11:12:28 AM	
CONDICIÓN CLIMÁTICA:	SOLEADO	
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:	ESPECTRORADIÓMETRO ASD HANDHELD 2 N° HH 2 325-1075	
ALTURA DE TOMA:	0.70m	

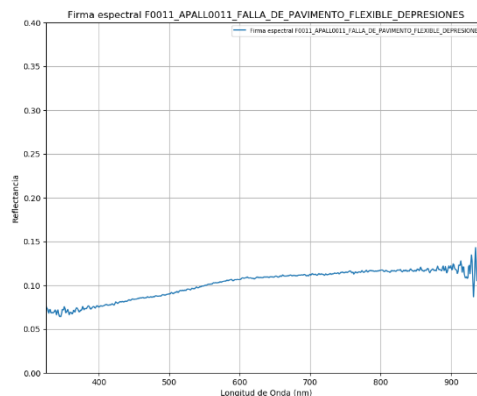
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:

Pavimento flexible con zonas de menor elevación que el pavimento a su alrededor.



RANGO ESPECTRAL:

325nm a 950nm



NÚMERO DE FIRMAS ANALIZADAS:

14

Con las firmas tomadas en campo se calcula el coeficiente de variación de cada longitud de onda para determinar la homogeneidad de la muestra. El coeficiente de variación aceptado para este trabajo es de 10 % para cada longitud de onda. Para validar la firma espectral, más del 90% de los coeficientes de variación deben cumplir con este criterio. (Morales Cepeda y Orozco Arcilla, 2015).

El **94%** de las longitudes de onda de la presente firma espectral no poseen un coeficiente de variación mayor al 10% por lo tanto las firmas espectrales recolectadas en campo cumplen con el criterio de homogeneidad.

FICHA TÉCNICA: FIRMA ESPECTRAL

NOMBRE DE LA MUESTRA:	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DISGREGACION Y DESINTEGRACION		
ID DE LA MUESTRA:	F0012 APALL0012		
TIPO DE MATERIAL:	ARTIFICIAL		
CLASE:	PAVIMENTO ASFÁLTICO		
UBICACIÓN DE ORIGEN:	CARRETERA SERPENTIN DE PASAMAYO		
DISTRITO: ANCÓN	PROVINCIA: LIMA	DEPARTAMENTO: LIMA	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:	11°46'33,24" S 77°10'16,53" W		
FECHA DE RECOLECCIÓN:	Martes 3 de abril del 2018		
HORA DE RECOLECCIÓN:	11:16:35 AM		
CONDICIÓN CLIMÁTICA:	SOLEADO		
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:	ESPECTRORADIÓMETRO ASD HANDHELD 2 N° HH 2 325-1075		
ALTURA DE TOMA:	0.70m		

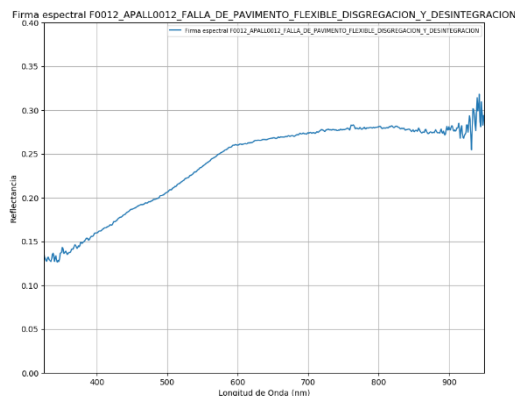
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:

Pavimento flexible que presenta severa desintegración de la superficie de la carpeta asfáltica.



RANGO ESPECTRAL:

325nm a 950nm



NÚMERO DE FIRMAS ANALIZADAS:

14

Con las firmas tomadas en campo se calcula el coeficiente de variación de cada longitud de onda para determinar la homogeneidad de la muestra. El coeficiente de variación aceptado para este trabajo es de 10 % para cada longitud de onda. Para validar la firma espectral, más del 90% de los coeficientes de variación deben cumplir con este criterio. (Morales Cepeda y Orozco Arcilla, 2015).

El **99%** de las longitudes de onda de la presente firma espectral no poseen un coeficiente de variación mayor al 10% por lo tanto las firmas espectrales recolectadas en campo cumplen con el criterio de homogeneidad.

FICHA TÉCNICA: FIRMA ESPECTRAL

NOMBRE DE LA MUESTRA:	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DISGREGACION Y DESINTEGRACION		
ID DE LA MUESTRA:	F0013 APALL0013		
TIPO DE MATERIAL:	ARTIFICIAL		
CLASE:	PAVIMENTO ASFÁLTICO		
UBICACIÓN DE ORIGEN:	CARRETERA SERPENTIN DE PASAMAYO		
DISTRITO: ANCÓN	PROVINCIA: LIMA	DEPARTAMENTO: LIMA	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:	11°46'29,61" S 77°10'21,27" W		
FECHA DE RECOLECCIÓN:	Martes 3 de abril del 2018		
HORA DE RECOLECCIÓN:	11:21:40 AM		
CONDICIÓN CLIMÁTICA:	SOLEADO		
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:	ESPECTRORADIÓMETRO ASD HANDHELD 2 N° HH 2 325-1075		
ALTURA DE TOMA:	0.70m		

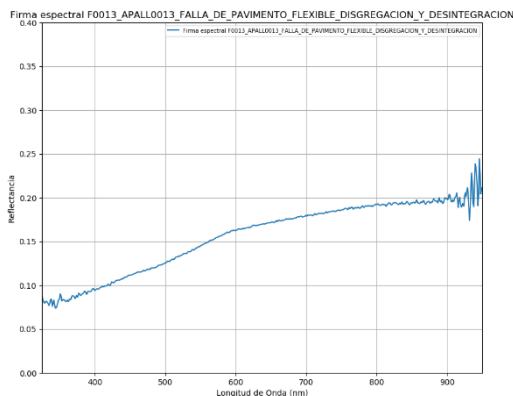
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:

Pavimento flexible que presenta severa desintegración de la superficie de la carpeta asfáltica.



RANGO ESPECTRAL:

325nm a 950nm



NÚMERO DE FIRMAS ANALIZADAS:

19

Con las firmas tomadas en campo se calcula el coeficiente de variación de cada longitud de onda para determinar la homogeneidad de la muestra. El coeficiente de variación aceptado para este trabajo es de 10 % para cada longitud de onda. Para validar la firma espectral, más del 90% de los coeficientes de variación deben cumplir con este criterio. (Morales Cepeda y Orozco Arcilla, 2015).

El **97%** de las longitudes de onda de la presente firma espectral no poseen un coeficiente de variación mayor al 10% por lo tanto las firmas espectrales recolectadas en campo cumplen con el criterio de homogeneidad.

FICHA TÉCNICA: FIRMA ESPECTRAL

NOMBRE DE LA MUESTRA:	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE GRIETAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES	
ID DE LA MUESTRA:	F0014 APALL0014	
TIPO DE MATERIAL:	ARTIFICIAL	
CLASE:	PAVIMENTO ASFÁLTICO	
UBICACIÓN DE ORIGEN:	CARRETERA SERPENTIN DE PASAMAYO	
DISTRITO: ANCÓN	PROVINCIA: LIMA	DEPARTAMENTO: LIMA
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:	11°46'27,22" S 77°10'20,58" W	
FECHA DE RECOLECCIÓN:	Martes 3 de abril del 2018	
HORA DE RECOLECCIÓN:	11:26:16 AM	
CONDICIÓN CLIMÁTICA:	SOLEADO	
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:	ESPECTRORADIÓMETRO ASD HANDHELD 2 N° HH 2 325-1075	
ALTURA DE TOMA:	0.70m	

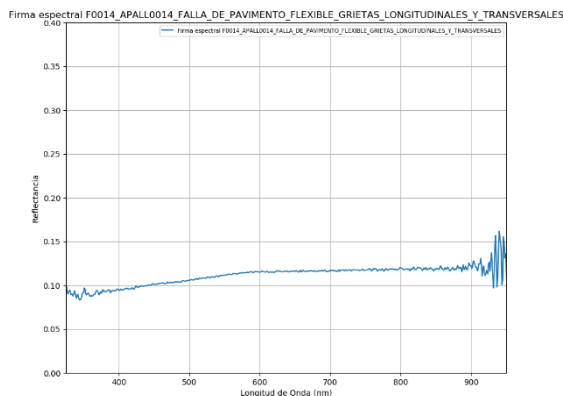
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:

Pavimento flexible con presencia de grietas longitudinales.



RANGO ESPECTRAL:

325nm a 950nm



NÚMERO DE FIRMAS ANALIZADAS:

15

Con las firmas tomadas en campo se calcula el coeficiente de variación de cada longitud de onda para determinar la homogeneidad de la muestra. El coeficiente de variación aceptado para este trabajo es de 10 % para cada longitud de onda. Para validar la firma espectral, más del 90% de los coeficientes de variación deben cumplir con este criterio. (Morales Cepeda y Orozco Arcilla, 2015).

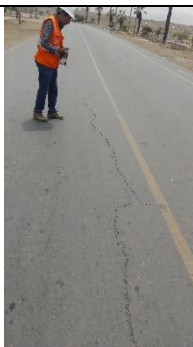
El 97% de las longitudes de onda de la presente firma espectral no poseen un coeficiente de variación mayor al 10% por lo tanto las firmas espectrales recolectadas en campo cumplen con el criterio de homogeneidad.

FICHA TÉCNICA: FIRMA ESPECTRAL

NOMBRE DE LA MUESTRA:	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE GRIETAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES	
ID DE LA MUESTRA:	F0015 APALL0015	
TIPO DE MATERIAL:	ARTIFICIAL	
CLASE:	PAVIMENTO ASFÁLTICO	
UBICACIÓN DE ORIGEN:	CARRETERA SERPENTIN DE PASAMAYO	
DISTRITO: ANCÓN	PROVINCIA: LIMA	DEPARTAMENTO: LIMA
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:	11°46'26,43" S 77°10'20,35" W	
FECHA DE RECOLECCIÓN:	Martes 3 de abril del 2018	
HORA DE RECOLECCIÓN:	11:28:17 AM	
CONDICIÓN CLIMÁTICA:	SOLEADO	
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:	ESPECTRORADIÓMETRO ASD HANDHELD 2 N° HH 2 325-1075	
ALTURA DE TOMA:	0.70m	

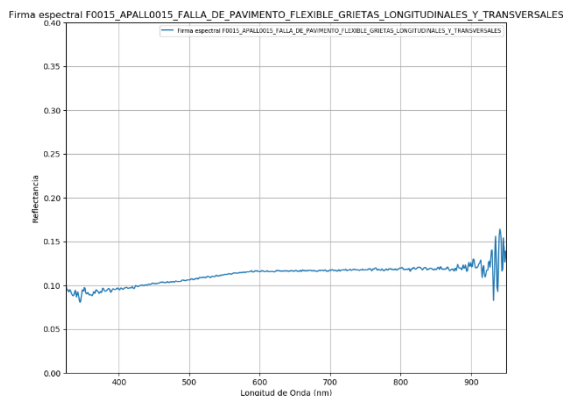
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:

Pavimento flexible con presencia de grieta longitudinal.



RANGO ESPECTRAL:

325nm a 950nm



NÚMERO DE FIRMAS ANALIZADAS:

10

Con las firmas tomadas en campo se calcula el coeficiente de variación de cada longitud de onda para determinar la homogeneidad de la muestra. El coeficiente de variación aceptado para este trabajo es de 10 % para cada longitud de onda. Para validar la firma espectral, más del 90% de los coeficientes de variación deben cumplir con este criterio. (Morales Cepeda y Orozco Arcilla, 2015).

El 97% de las longitudes de onda de la presente firma espectral no poseen un coeficiente de variación mayor al 10% por lo tanto las firmas espectrales recolectadas en campo cumplen con el criterio de homogeneidad.

FICHA TÉCNICA: FIRMA ESPECTRAL

NOMBRE DE LA MUESTRA:	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE GRIETAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES	
ID DE LA MUESTRA:	F0016 APALL0016	
TIPO DE MATERIAL:	ARTIFICIAL	
CLASE:	PAVIMENTO ASFÁLTICO	
UBICACIÓN DE ORIGEN:	CARRETERA SERPENTIN DE PASAMAYO	
DISTRITO: ANCÓN	PROVINCIA: LIMA	DEPARTAMENTO: LIMA
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:	11°46'21,76" S 77°10'20,13" W	
FECHA DE RECOLECCIÓN:	Martes 3 de abril del 2018	
HORA DE RECOLECCIÓN:	11:31:26 AM	
CONDICIÓN CLIMÁTICA:	SOLEADO	
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:	ESPECTRORADIÓMETRO ASD HANDHELD 2 N° HH 2 325-1075	
ALTURA DE TOMA:	0.70m	

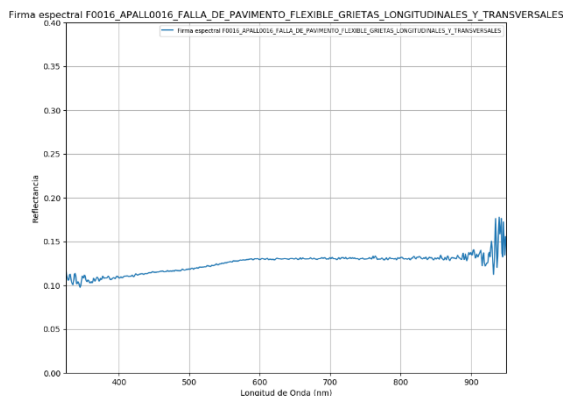
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:

Pavimento flexible con presencia de grieta longitudinal.



RANGO ESPECTRAL:

325nm a 950nm



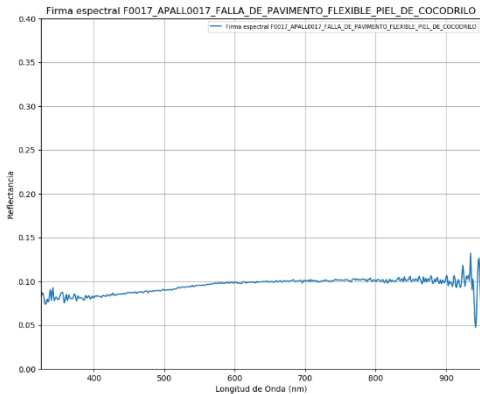
NÚMERO DE FIRMAS ANALIZADAS:

9

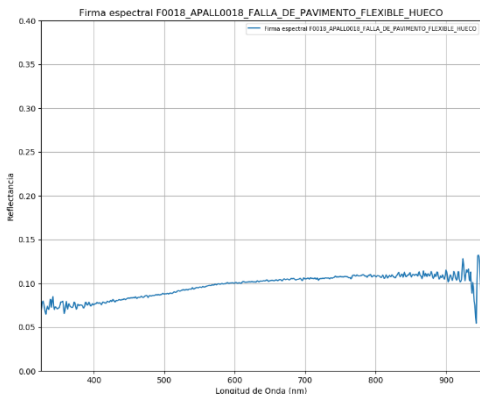
Con las firmas tomadas en campo se calcula el coeficiente de variación de cada longitud de onda para determinar la homogeneidad de la muestra. El coeficiente de variación aceptado para este trabajo es de 10 % para cada longitud de onda. Para validar la firma espectral, más del 90% de los coeficientes de variación deben cumplir con este criterio. (Morales Cepeda y Orozco Arcilla, 2015).

El 97% de las longitudes de onda de la presente firma espectral no poseen un coeficiente de variación mayor al 10% por lo tanto las firmas espectrales recolectadas en campo cumplen con el criterio de homogeneidad.

FICHA TÉCNICA: FIRMA ESPECTRAL

NOMBRE DE LA MUESTRA:	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE PIEL DE COCODRILO	
ID DE LA MUESTRA:	F0017 APALL0017	
TIPO DE MATERIAL:	ARTIFICIAL	
CLASE:	PAVIMENTO ASFÁLTICO	
UBICACIÓN DE ORIGEN:	CARRETERA SERPENTIN DE PASAMAYO	
DISTRITO: ANCÓN	PROVINCIA: LIMA	DEPARTAMENTO: LIMA
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:	- - - -	
FECHA DE RECOLECCIÓN:	Martes 3 de abril del 2018	
HORA DE RECOLECCIÓN:	12:05:38 PM	
CONDICIÓN CLIMÁTICA:	SOLEADO	
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:	ESPECTRORADIÓMETRO ASD HANDHELD 2 N° HH 2 325-1075	
ALTURA DE TOMA:	0.70m	
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:		
Pavimento flexible que presenta fisuras interconectadas.		
		
RANGO ESPECTRAL:	325nm a 950nm	
		
NÚMERO DE FIRMAS ANALIZADAS:	19	
Con las firmas tomadas en campo se calcula el coeficiente de variación de cada longitud de onda para determinar la homogeneidad de la muestra. El coeficiente de variación aceptado para este trabajo es de 10 % para cada longitud de onda. Para validar la firma espectral, más del 90% de los coeficientes de variación deben cumplir con este criterio. (Morales Cepeda y Orozco Arcilla, 2015). El 91% de las longitudes de onda de la presente firma espectral no poseen un coeficiente de variación mayor al 10% por lo tanto las firmas espectrales recolectadas en campo cumplen con el criterio de homogeneidad.		

FICHA TÉCNICA: FIRMA ESPECTRAL

NOMBRE DE LA MUESTRA:	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE HUECO	
ID DE LA MUESTRA:	F0018 APALL0018	
TIPO DE MATERIAL:	ARTIFICIAL	
CLASE:	PAVIMENTO ASFÁLTICO	
UBICACIÓN DE ORIGEN:	CARRETERA SERPENTIN DE PASAMAYO	
DISTRITO: ANCÓN	PROVINCIA: LIMA	DEPARTAMENTO: LIMA
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:	- - - -	
FECHA DE RECOLECCIÓN:	Martes 3 de abril del 2018	
HORA DE RECOLECCIÓN:	12:07:16 PM	
CONDICIÓN CLIMÁTICA:	SOLEADO	
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:	ESPECTRORADIÓMETRO ASD HANDHELD 2 N° HH 2 325-1075	
ALTURA DE TOMA:	0.70m	
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:		
Pavimento flexible que presenta desintegración total y remoción de parte de su superficie.		
		
RANGO ESPECTRAL:	325nm a 950nm	
		
NÚMERO DE FIRMAS ANALIZADAS:	20	
Con las firmas tomadas en campo se calcula el coeficiente de variación de cada longitud de onda para determinar la homogeneidad de la muestra. El coeficiente de variación aceptado para este trabajo es de 10 % para cada longitud de onda. Para validar la firma espectral, más del 90% de los coeficientes de variación deben cumplir con este criterio. (Morales Cepeda y Orozco Arcilla, 2015). El 90% de las longitudes de onda de la presente firma espectral no poseen un coeficiente de variación mayor al 10% por lo tanto las firmas espectrales recolectadas en campo cumplen con el criterio de homogeneidad.		

FICHA TÉCNICA: FIRMA ESPECTRAL

NOMBRE DE LA MUESTRA:	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DESNIVEL DE CALZADA	
ID DE LA MUESTRA:	F0019 APALL0019	
TIPO DE MATERIAL:	ARTIFICIAL	
CLASE:	PAVIMENTO ASFÁLTICO	
UBICACIÓN DE ORIGEN:	CARRETERA SERPENTIN DE PASAMAYO	
DISTRITO: ANCÓN	PROVINCIA: LIMA	DEPARTAMENTO: LIMA
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:	11°46'81,06" S 77°09'50,83" W	
FECHA DE RECOLECCIÓN:	Martes 3 de abril del 2018	
HORA DE RECOLECCIÓN:	12:59:37 PM	
CONDICIÓN CLIMÁTICA:	SOLEADO	
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:	ESPECTRORADIÓMETRO ASD HANDHELD 2 N° HH 2 325-1075	
ALTURA DE TOMA:	0.70m	

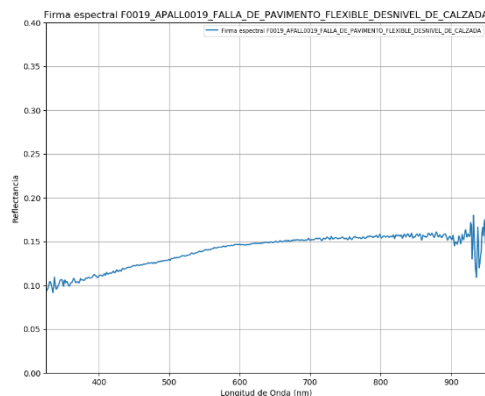
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:

Pavimento flexible con notorio desnivel en parte de su superficie.



RANGO ESPECTRAL:

325nm a 950nm



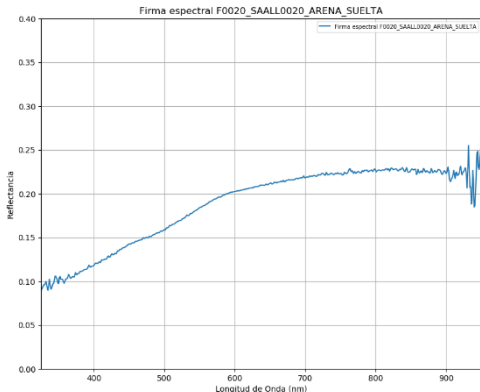
NÚMERO DE FIRMAS ANALIZADAS:

8

Con las firmas tomadas en campo se calcula el coeficiente de variación de cada longitud de onda para determinar la homogeneidad de la muestra. El coeficiente de variación aceptado para este trabajo es de 10 % para cada longitud de onda. Para validar la firma espectral, más del 90% de los coeficientes de variación deben cumplir con este criterio. (Morales Cepeda y Orozco Arcilla, 2015).

El **96%** de las longitudes de onda de la presente firma espectral no poseen un coeficiente de variación mayor al 10% por lo tanto las firmas espectrales recolectadas en campo cumplen con el criterio de homogeneidad.

FICHA TÉCNICA: FIRMA ESPECTRAL

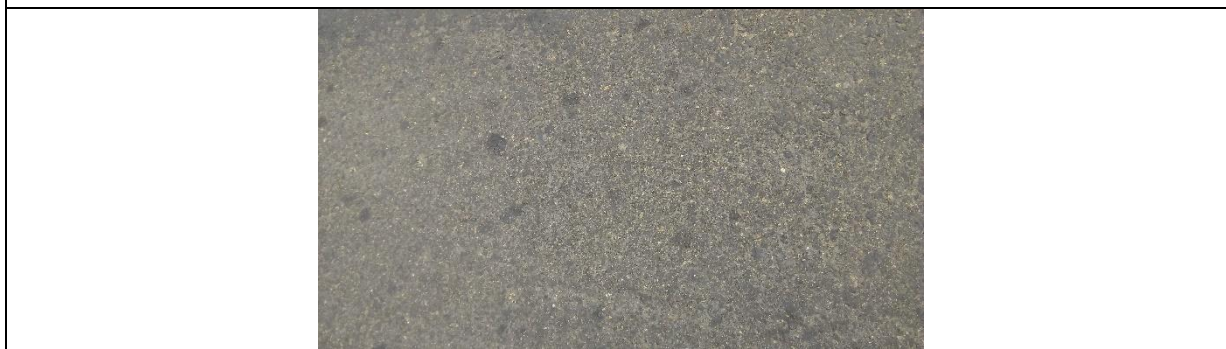
NOMBRE DE LA MUESTRA:	ARENA SUELTA	
ID DE LA MUESTRA:	F0020_SAALL0020	
TIPO DE MATERIAL:	SUELO	
CLASE:	AGREGADO FINO	
UBICACIÓN DE ORIGEN:	CARRETERA SERPENTIN DE PASAMAYO	
DISTRITO: ANCÓN	PROVINCIA: LIMA	DEPARTAMENTO: LIMA
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:	11°46'81,18" S 77°09'50,61" W	
FECHA DE RECOLECCIÓN:	Martes 3 de abril del 2018	
HORA DE RECOLECCIÓN:	1:00:35 PM	
CONDICIÓN CLIMÁTICA:	SOLEADO	
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:	ESPECTRORADIÓMETRO ASD HANDHELD 2 N° HH 2 325-1075	
ALTURA DE TOMA:	0.70m	
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:	Arena suelta que se encuentra al lado de las bermas de la carretera.	
		
RANGO ESPECTRAL:	325nm a 950nm	
		
NÚMERO DE FIRMAS ANALIZADAS:	9	
Con las firmas tomadas en campo se calcula el coeficiente de variación de cada longitud de onda para determinar la homogeneidad de la muestra. El coeficiente de variación aceptado para este trabajo es de 10 % para cada longitud de onda. Para validar la firma espectral, más del 90% de los coeficientes de variación deben cumplir con este criterio. (Morales Cepeda y Orozco Arcilla, 2015). El 97% de las longitudes de onda de la presente firma espectral no poseen un coeficiente de variación mayor al 10% por lo tanto las firmas espectrales recolectadas en campo cumplen con el criterio de homogeneidad.		

FICHA TÉCNICA: FIRMA ESPECTRAL

NOMBRE DE LA MUESTRA:	FALLA DE PAVIMENTO FLEXIBLE DISGREGACION Y DESINTEGRACION		
ID DE LA MUESTRA:	F0021 APALL0021		
TIPO DE MATERIAL:	ARTIFICIAL		
CLASE:	PAVIMENTO ASFÁLTICO		
UBICACIÓN DE ORIGEN:	CARRETERA SERPENTIN DE PASAMAYO		
DISTRITO: ANCÓN	PROVINCIA: LIMA	DEPARTAMENTO: LIMA	
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:	11°46'84,94" S 77°09'49,56" W		
FECHA DE RECOLECCIÓN:	Martes 3 de abril del 2018		
HORA DE RECOLECCIÓN:	1:02:38 PM		
CONDICIÓN CLIMÁTICA:	SOLEADO		
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:	ESPECTRORADIÓMETRO ASD HANDHELD 2 N° HH 2 325-1075		
ALTURA DE TOMA:	0.70m		

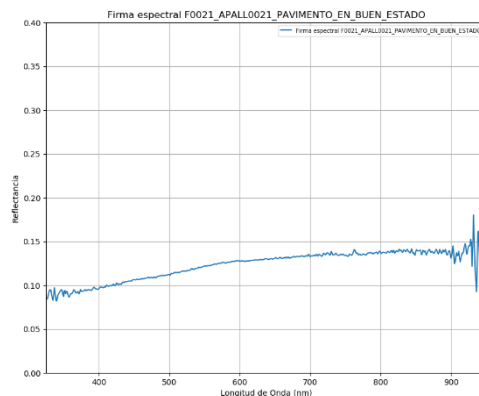
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:

Pavimento flexible en buen estado.



RANGO ESPECTRAL:

325nm a 950nm



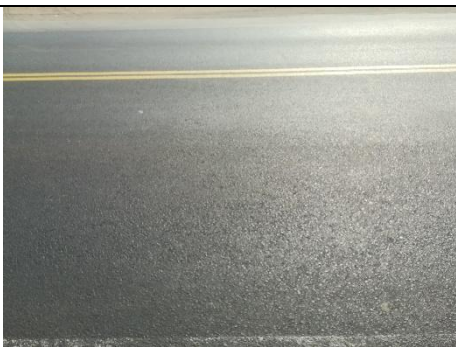
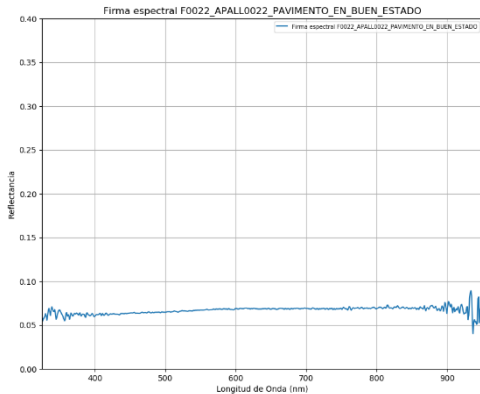
NÚMERO DE FIRMAS ANALIZADAS:

9

Con las firmas tomadas en campo se calcula el coeficiente de variación de cada longitud de onda para determinar la homogeneidad de la muestra. El coeficiente de variación aceptado para este trabajo es de 10 % para cada longitud de onda. Para validar la firma espectral, más del 90% de los coeficientes de variación deben cumplir con este criterio. (Morales Cepeda y Orozco Arcilla, 2015).

El **96%** de las longitudes de onda de la presente firma espectral no poseen un coeficiente de variación mayor al 10% por lo tanto las firmas espectrales recolectadas en campo cumplen con el criterio de homogeneidad.

FICHA TÉCNICA: FIRMA ESPECTRAL

NOMBRE DE LA MUESTRA:	PAVIMENTO EN BUEN ESTADO	
ID DE LA MUESTRA:	F0022 APALL0022	
TIPO DE MATERIAL:	ARTIFICIAL	
CLASE:	PAVIMENTO ASFÁLTICO	
UBICACIÓN DE ORIGEN:	CARRETERA SERPENTIN DE PASAMAYO	
DISTRITO: ANCÓN	PROVINCIA: LIMA	DEPARTAMENTO: LIMA
COORDENADAS GEOGRÁFICAS:	11°46'20,05" S 77°09'65,02" W	
FECHA DE RECOLECCIÓN:	Martes 3 de abril del 2018	
HORA DE RECOLECCIÓN:	3:51:28 PM	
CONDICIÓN CLIMÁTICA:	SOLEADO	
INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:	ESPECTRORADIÓMETRO ASD HANDHELD 2 N° HH 2 325-1075	
ALTURA DE TOMA:	0.70m	
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:	Pavimento flexible en buen estado.	
		
RANGO ESPECTRAL:	325nm a 950nm	
		
NÚMERO DE FIRMAS ANALIZADAS:	10	
Con las firmas tomadas en campo se calcula el coeficiente de variación de cada longitud de onda para determinar la homogeneidad de la muestra. El coeficiente de variación aceptado para este trabajo es de 10 % para cada longitud de onda. Para validar la firma espectral, más del 90% de los coeficientes de variación deben cumplir con este criterio. (Morales Cepeda y Orozco Arcilla, 2015). El 94% de las longitudes de onda de la presente firma espectral no poseen un coeficiente de variación mayor al 10% por lo tanto las firmas espectrales recolectadas en campo cumplen con el criterio de homogeneidad.		

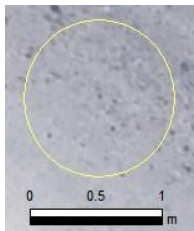
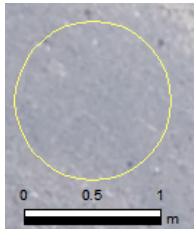
Anexo 05 Levantamiento de campo PCI

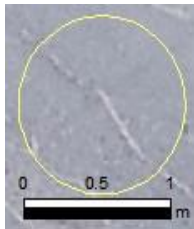
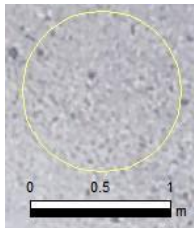
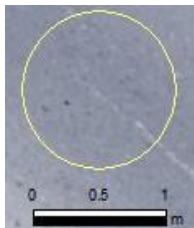
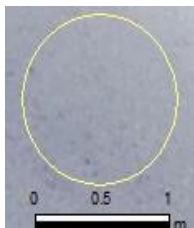
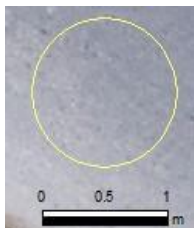
En este anexo se presenta el levantamiento de campo realizado sobre cuarenta y seis (46) muestras evaluadas mediante el Índice de Condición del Pavimento (PCI) siguiendo la norma ASTM D6433. Este estudio se apoyó en un vuelo fotogramétrico con un RPAS (drone), empleando la metodología propuesta por Jorge Cruz en su tesis titulada “Cálculo del Índice de Condición del Pavimento con Imágenes de Vehículo Aéreo No Tripulado” y a través de un ortomosaico generado, se determinó el PCI de cada muestra, las cuales serán evaluadas y clasificadas de acuerdo con su tipo de mantenimiento requerido, como sigue: **Bueno** (mantenimiento, PCI de 100 a 71), **Regular** (rehabilitación, PCI de 70 a 31) y **Malo** (reconstrucción, PCI de 30 a 0), conforme a la norma ASTM D6433-07 (Ver Tabla 9 y Tabla 10).

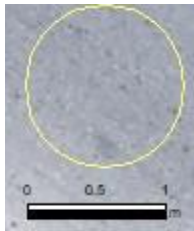
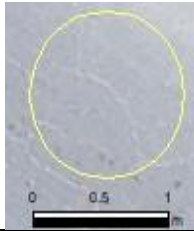
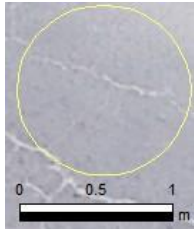
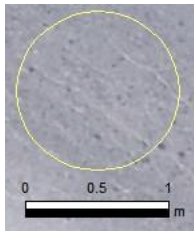
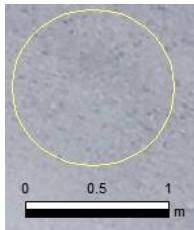
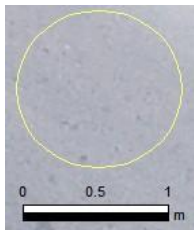
Tabla 9. Clasificación del pavimento

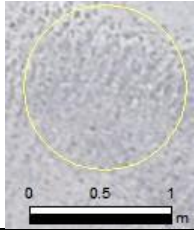
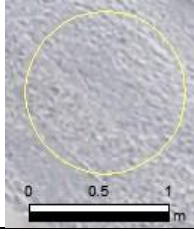
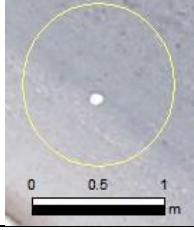
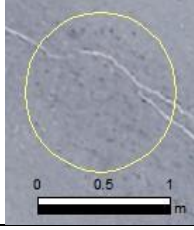
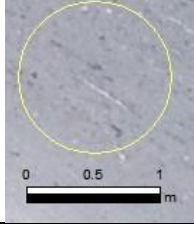
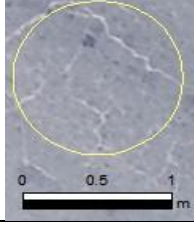
Rango del PCI	Clasificación	Tipo de mantenimiento
71-100	Bueno	Mantenimiento
31-70	Regular	Rehabilitación
0-30	Malo	Reconstrucción

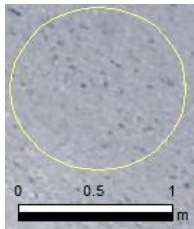
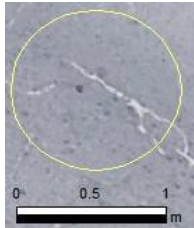
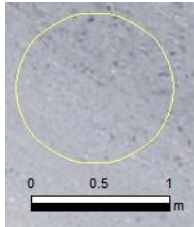
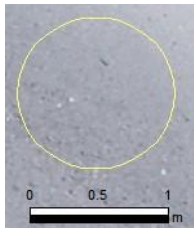
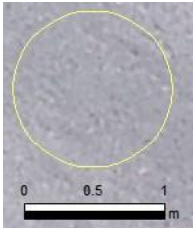
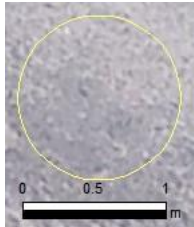
Tabla 10. Muestras levantadas en campo

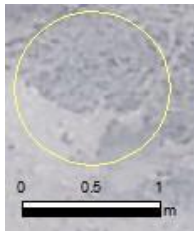
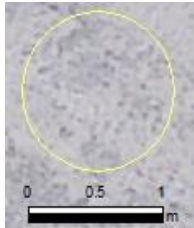
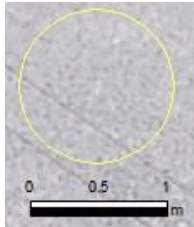
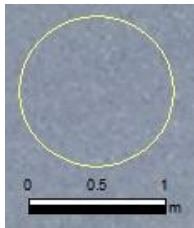
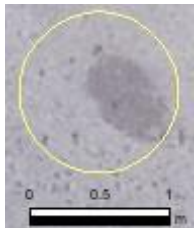
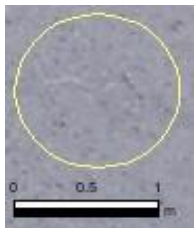
N°	ORTOFOTO	LATITUD (m)	LONGITUD (m)	CLASIFICACIÓN
1		8697740	263570	Malo
2		8697750	263572	Regular

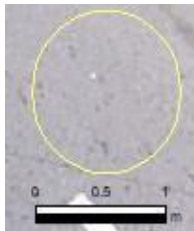
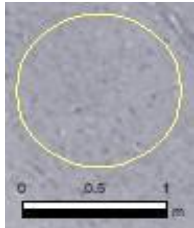
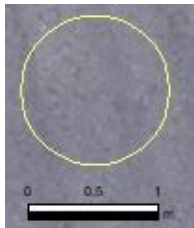
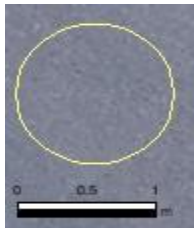
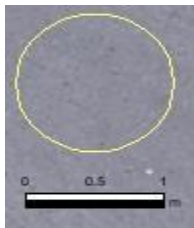
3		8697730	263600	Regular
4		8697730	263597	Malo
5		8697700	263631	Regular
6		8697700	263633	Regular
7		8697690	263651	Regular
8		8697690	263653	Regular

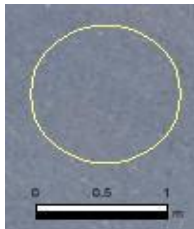
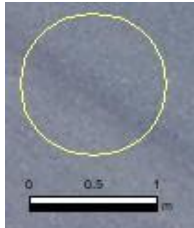
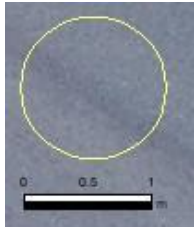
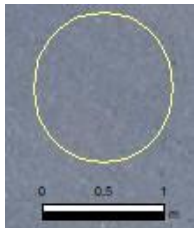
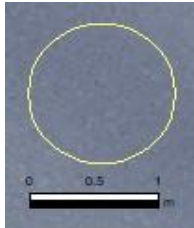
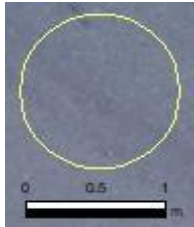
9		8697670	263678	Regular
10		8697670	263681	Regular
11		8697650	263707	Regular
12		8697650	263705	Regular
13		8697620	263744	Malo
14		8697630	263746	Regular

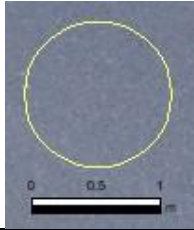
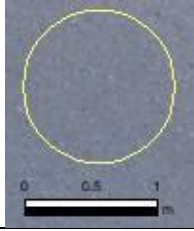
15		8697600	263785	Malo
16		8697600	263787	Malo
17		8697560	263834	Regular
18		8697560	263837	Bueno
19		8697520	263895	Malo
20		8697520	263896	Regular

21		8697480	263959	Regular
22		8697480	263960	Regular
23		8697450	263998	Regular
24		8697450	264000	Regular
25		8697410	264051	Regular
26		8697420	264053	Malo

27		8697390	264090	Malo
28		8697390	264088	Malo
29		8697380	264141	Regular
30		8697370	264145	Bueno
31		8697360	264179	Regular
32		8697360	264177	Regular

33		8697350	264192	Regular
34		8697350	264188	Regular
35		8697330	264219	Bueno
36		8697320	264214	Bueno
37		8697290	264245	Bueno
38		8697290	264241	Bueno

39		8697250	264295	Bueno
40		8697250	264293	Bueno
41		8697230	264330	Bueno
42		8697230	264328	Bueno
43		8697180	264392	Bueno
44		8697190	264395	Bueno

45		8697160	264429	Bueno
46		8697170	264431	Bueno