



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica

Metodología para identificar asbesto en techos mediante técnicas de teledetección, en el área industrial y urbana. Caso: margen izquierda del río Rímac, distrito de Lima

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingenieros Geógrafos

AUTORES

Gloria Ximena Jhoanna NONGRADOS CORDOVA

Oscar VERA ROSALES

ASESOR

Mg. Luis Alberto HUAMÁN AMASIFUEN

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Nongrados, G. & Vera O. (2026). *Metodología para identificar asbesto en techos mediante técnicas de teledetección, en el área industrial y urbana. Caso: margen izquierda del río Rímac, distrito de Lima*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor 1	
Nombres y apellidos	Gloria Ximena Jhoanna Nongrados Cordova
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	75658471
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0000-6058-4413
Datos de autor 2	
Nombres y apellidos	Oscar Vera Rosales
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	47289109
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-9484-4279
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Mg. Luis Alberto Huamán Amasifuen
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	43322204
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-0834-3860
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Mg. Emilia Isabel Bejar Melgar
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	41331753
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	José Luis Quispe Vilchez

Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08119070
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	José Antonio Sandoval Casas
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08800785
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.3.25. Tecnología de información y aplicaciones de sistemas
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Latitud: -12.043689 Longitud: -77.065559
Año o rango de años en que se realizó la investigación	octubre 2018 – diciembre 2025
URL de disciplinas OCDE	Sensores remotos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.04 Geociencias, Multidisciplinar https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.01

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIEROS GEÓGRAFOS

En el Salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el día 23 de abril del 2026, siendo las 16:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Mg. Emilia Isabel Bejar Melgar	Presidenta
Ing. José Antonio Sandoval Casas	Miembro
Ing. José Luis Quispe Vilchez	Miembro

Reunidos en Acto Académico Público de Sustentación de la Tesis titulada «**METODOLOGÍA PARA IDENTIFICAR ASBESTO EN TECHOS MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN, EN EL ÁREA INDUSTRIAL Y URBANA. CASO: MARGEN IZQUIERDA DEL RÍO RÍMAC, DISTRITO DE LIMA**», presentada por los bachilleres **NONGRADOS CORDOVA, GLORIA XIMENA JHOANNA** y **VERA ROSALES, OSCAR** para optar el Título Profesional de Ingenieros Geógrafos, asesorados por el Mg. Luis Alberto Huamán Amasifuen.

Expuesta la Tesis; los miembros del Jurado plantearon a los bachilleres las preguntas pertinentes, que fueron absueltas a:

Satisfacción

Concluida la Sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar la calidad y sustentación en secreto, cuyo calificativo fue:

17 (diecisiete) Aprobado con mención honrosa

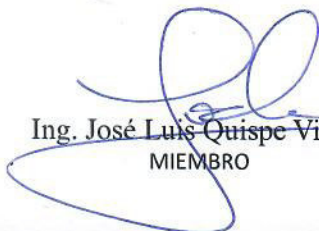
Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, la Presidente del Jurado recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIEROS GEÓGRAFOS** a los bachilleres **NONGRADOS CORDOVA, GLORIA XIMENA JHOANNA** y **VERA ROSALES, OSCAR**.

Siendo las horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose seis (06) Actas Originales de la Sustentación de Tesis, firmadas por el Jurado Calificador.

Lima, 23 de abril del 2026


Mg. Emilia Isabel Bejar Melgar
PRESIDENTA


Ing. José Antonio Sandoval Casas
MIEMBRO


Ing. José Luis Quispe Vilchez
MIEMBRO


Mg. Luis Alberto Huamán Amasifuen
ASESOR



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Mg Luis Alberto HUAMÁN Amasifuen en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen de la EP INGENIERIA GEOGRAFICA N°001-EPIG-FIGMMG/UNMSM de la tesis mancomunada, cuyo título es “Metodología para identificar Asbesto en techos mediante técnicas de teledetección, en el área industrial y urbana. Caso: Margen izquierda del Río Rímac, distrito de Lima” presentado por los bachilleres Oscar VERA Rosales y Gloria Ximena Jhoanna NONGRADOS Córdova para optar el título profesional de Ingenieros Geógrafos.

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 20 % de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título profesional de Ingenieros Geógrafos.

Lima, 16 de abril de 2026

Mg. Luis Alberto HUAMÁN Amasifuen
DNI: 43322204

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

DEDICATORIA

Investigación dedicada

A mi hermano, Yasser Harry Vera Rosales,

cuyo sacrificio y apoyo incondicional

es una fuente constante de fortaleza e inspiración en mi vida.

A mis padres Julia Rosales de Vera y Félix Vera Guillén,

por inculcarme valores sólidos y por su esfuerzo dedicado a mi desarrollo.

Y a mi Esposa Ximena Nongrados Córdova,

por su amor, su constante impulso

y por inspirarme cada día a ser una mejor persona

Oscar Vera Rosales

DEDICATORIA

Dedico la presente investigación a Dios

por ser mi fortaleza, por ser el guía y apoyo incondicional en cada paso que doy.

A mis amados padres, César Nongrados Córdova y Gloria Córdova Aranda.

A mis hermanas por su apoyo y sabios consejos

Y a mi esposo, Oscar Vera Rosales por ser mi compañero, apoyo y motivación para seguir adelante.

Gloria Ximena Jhoanna Nongrados Córdova

AGRADECIMIENTO

A Dios, fuente infinita de sabiduría, por sus bendiciones y por guiarnos en cada paso en este camino. A Él, nuestro eterno agradecimiento por ser nuestro refugio y darnos la energía para alcanzar este logro.

Expresamos también nuestra gratitud a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por permitir formarnos como excelentes profesionales. Además, a nuestra Escuela Profesional Ingeniería Geográfica, y los excelentes catedráticos que siguen formando profesionales necesarios para el desarrollo del país con una amplia base de conocimientos teóricos y prácticos, las cuales son aplicados a nuestra realidad nacional.

Agradecemos de manera especial a nuestro asesor de tesis, el Magíster Ingeniero Luis Huamán Amasifuén, por su confianza, paciencia y constante apoyo durante todo el desarrollo de esta investigación.

Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento al Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET, especialmente al Laboratorio de Teledetección y al Especialista en Procesamiento e Interpretación de Imágenes Satelitales Ópticas, Juan Ramón Casas Malpartida, por compartir sus conocimientos, experiencia, uso de equipos y software en el ámbito de la Teledetección, lo cual hizo posible el desarrollo de la Tesis.

Finalmente, agradecemos a la Empresa Klepel Consulting S.A.C., empresa consultora en medio ambiente y energías renovables, por facilitarnos una muestra de techo de fibrocemento con contenido de asbesto, así como por compartir sus conocimientos sobre la identificación y manejo del asbesto. Su orientación en la metodología adecuada para su retiro e identificación fue crucial para la realización de esta investigación.

CONTENIDO

CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del Problema.....	3
1.2.1. Descripción de la problemática.....	3
1.2.2. Formulación del problema	4
1.2.2.1 Problema General.....	4
1.2.2.2 Problemas Específicos	4
1.3 Objetivos de la Investigación	5
1.3.1. Objetivo General.....	5
1.3.2. Objetivo Específico.....	5
1.4 Importancia y alcance de la investigación	5
1.5 Limitaciones de la Investigación.....	6
1.6 Justificación de la Investigación	6
1.6.1. Justificación Teórica	6
1.6.2. Justificación Práctica	7
1.6.3. Justificación Socioeconómica	7
CAPÍTULO II	8
2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 Antecedentes de la investigación	8
2.1.1. Antecedentes Nacionales	8
2.1.2. Antecedentes Internacionales.....	9
2.2 Bases Teóricas.....	12
2.2.1. Teledetección	12
2.2.1.1 Sistema de Teledetección.....	13
2.2.1.2 Plataforma Satelital	15
2.2.1.3 Misión Satelital WorldView-3	17
2.2.1.4 Misión del Satélite Sentinel-2	21
2.2.1.5 Misión del Satélite Alos Palsar	22

2.2.1.6 Tratamiento Digital de Imágenes.....	23
2.2.1.7 Bandas Espectrales.....	25
2.2.1.8 Correcciones de la imagen satelital.....	26
2.2.1.9 Máscaras	27
2.2.1.10 Índices espectrales	28
2.2.1.11 Índice de Vegetación Ajustado al Suelo	28
2.2.1.12 Análisis de Componentes Principales PCA	29
2.2.1.13 Firmas Espectrales	30
2.2.1.14 Espectrometría de imágenes y mezcla espectral	30
2.2.1.15 Métodos de Clasificación.....	31
2.2.1.16 El Método Reloj de Arena (Hourglass)	34
2.2.2. Características del Asbesto	37
2.2.2.1 Historia del Asbesto.....	37
2.2.2.2 Mineralogía del Asbesto	39
2.2.2.3 Toxicología del Asbesto	41
2.2.2.4 El Carácter Cancerígeno del Asbesto	42
2.2.2.5 Industria de Asbesto en Sudamérica	45
2.2.2.6 El Asbesto en el Perú	46
2.3 Definición de Términos.....	49
2.4 Marco Normativo	51
2.4.1. Normas Nacionales	51
2.4.2. Acuerdos Internacionales.....	54
CAPÍTULO III	56
3. HIPÓTESIS Y VARIABLES	56
3.1 Hipótesis General	56
3.2 Hipótesis Específica	56
3.3 Identificación de Variables	56
3.3.1. Variable Independiente	56
3.3.2. Variable Dependiente.....	56
3.4 Operacionalización de variables.....	58
3.5 Matriz de consistencia.....	59

CAPÍTULO IV	60
4. MATERIALES Y MÉTODOS	60
4.1 Área de estudio.....	60
4.1.1. Consideraciones Cartográficas	60
4.1.1.1 Sistema de Referencia Espacial	60
4.1.1.2 Escala Cartográfica	61
4.1.2. Ubicación	62
4.1.3. Zonificación y Sector Catastral.....	63
4.1.4. Manzanas, Lotes y vías Urbanas.....	65
4.2 Diseño de investigación	67
4.2.1. Tipo de investigación.....	67
4.2.2. Nivel de Investigación	67
4.2.3. Diseño de Investigación.....	67
4.2.4. Enfoque de investigación.....	68
4.3 Población y Muestra.....	68
4.4 Procedimiento, técnicas e instrumentos de recolección de información.....	71
4.4.1. Materiales.....	71
4.4.1.1 Muestra de techo con Asbesto	71
4.4.1.2 Materiales de Seguridad.....	72
4.4.1.3 Equipo de Medición Espectral	72
4.4.2. Software y Hardware	73
4.4.3. Inversión de la investigación	73
4.4.4. Datos Geográficos.....	74
4.4.4.1 Datos Vectoriales	74
4.4.4.2 Datos Ráster	74
4.4.5. Metodología en Teledetección.....	79
4.4.6. Desarrollo de la Metodología	80
4.4.6.1 Obtención de la firma espectral del techo con Asbesto	84
4.4.6.2 Librería Espectral de las Firmas	85
4.4.6.3 Corrección Geométrica	87
4.4.6.4 Corrección Radiométrica	91

4.4.6.5 Corrección Atmosférica	93
4.4.6.6 Compilación de Bandas Sentinel-2 y WorldView-3.....	96
4.4.6.7 Remuestreo de Firmas espectrales	98
4.4.6.8 Firma Espectral del techo de fibrocemento con asbesto	100
4.4.6.9 Elaboración de Máscaras	101
4.4.6.10 Aplicación de Máscara Total	103
4.4.6.11 Reducción de Dimensionalidad de los Datos con MNF	104
4.4.6.12 Transformación MNF de la firma espectral fibrocemento con asbesto.....	107
4.4.6.13 Clasificación MTMF para identificar la abundancia del Asbesto	108
4.4.7. Análisis estadístico	109
4.4.7.1 Identificación de Asbesto.....	111
4.4.7.2 Matriz de Confusión	115
CAPÍTULO V	118
5. RESULTADOS.....	118
6. DISCUSIONES.....	128
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	131
7.1 Conclusiones	131
7.2 Recomendaciones.....	133
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	135

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 WorldView-3 bandas VNIR	19
Tabla 2 WorldView-3 bandas SWIR	20
Tabla 3 Características generales de la imagen Sentinel-2	22
Tabla 4 Composición de Asbestos Anfíboles utilizados comercialmente	40
Tabla 5 Importación del asbesto en el Perú 1950 - 2007	47
Tabla 6 Parámetros Cartográficos.....	61
Tabla 7 Población y Muestra	69
Tabla 8 FieldSpec 4 Hi-Res	72
Tabla 9 Datos Vectoriales utilizados para la elaboración de la Tesis	74
Tabla 10 Datos Ráster utilizados	75
Tabla 11 Imágenes Satelitales utilizadas	75
Tabla 12 Imágenes Satelitales utilizadas	77
Tabla 13 Modelo Digital de Elevación utilizado	77
Tabla 14 Imagen Ortorrectificada del distrito de Lima.....	78
Tabla 15 Nivel de Producto WorldView-3	87
Tabla 16 Coordenadas de los puntos de control	88
Tabla 17 Datos de entrada para el cálculo de la Radiancia WorldView-3	92
Tabla 18 Algoritmo para el cálculo de la Radiancia WorldView-3.....	92
Tabla 19 Comparativo entre Niveles Digitales y Radiancia	93
Tabla 20 Parámetros FLAASH.....	94
Tabla 21 Comparativo entre Niveles Digitales y Radiancia	95
Tabla 22 Compilación de bandas Sentinel-2 y WorldView-3	96

Tabla 23 Medidas y términos fundamentales estadísticos	110
Tabla 24 Clasificación de Fibrocemento con Asbesto	113
Tabla 25 Matriz de Confusión	117
Tabla 26 Píxeles con Asbesto identificados en la muestra	123
Tabla 27 Lotes con Asbesto identificados en la muestra	124
Tabla 28 Píxeles clasificados con Asbesto en la muestra	125
Tabla 29 Clasificación de Asbesto en la muestra	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Operaciones de un Satélite Geoestacionario	16
Figura 2 Operación de un Satélite Heliosíncrona	17
Figura 3 Respuesta de radiación espectral relativa (nm) WorldView-3 VNIR	19
Figura 4 Respuesta de radiación espectral relativa (nm) WorldView-3 SWIR	20
Figura 5 Espectro electromagnético (arriba longitudes de onda λ en metros)	25
Figura 6 Mezcla espectral lineal de tres materiales	31
Figura 7 Consumo de asbesto en el mundo por región	39
Figura 8 Importación del asbesto en el Perú 1950 – 2007	48
Figura 9 Área de estudio vista satelital	62
Figura 10 Área de estudio vista Ortofoto Lima 2012.	63
Figura 11 Zonificación	64
Figura 12 Sectores Catastrales Lima	64
Figura 13 Manzanas y Lotes Catastrales Lima	65
Figura 14 Vías Urbanas	66
Figura 15 Mapa de Población y Muestra	70
Figura 16 Escena WorldView-3 Niveles Digitales (Inicial)	76
Figura 17 Metodología para Identificar El Asbesto	83
Figura 18 Firmas espectrales FieldSpec 4, formato ENVI	86
Figura 19 Puntos de Control ubicados en la Escena WorldView-3	89
Figura 20 Reporte de resultados de los residuales	90
Figura 21 WorldView-3: adquirida inicial (izquierda), corregida(derecha)	90
Figura 22 Resultado de la corrección atmosférica FLAASH	94

Figura 23 Comparación de la firma espectral del Grass	97
Figura 24 Firma FieldSpec 4 (superior) vs Remuestreo (inferior)	99
Figura 25 Firma del Asbesto 15 Bandas	100
Figura 26 Máscara Total	103
Figura 27 Imagen Enmascarada.....	104
Figura 28 Distribución de los datos MNF de la imagen S2 y WV-3	105
Figura 29 Banda 1 MNF	106
Figura 30 Banda 15 MNF	106
Figura 31 Firma espectral de Fibrocemento con Asbesto al espacio MNF	107
Figura 32 Clasificación MTMF, con 5 bandas MNF	109
Figura 33 Histograma MTMF.....	110
Figura 34 Regla Práctica para valores significativos	111
Figura 35 Mapa Identificación con Asbesto	112
Figura 36 Histograma: Clasificación de Fibrocemento con Asbesto	113
Figura 37 Mapa de clasificación de Fibrocemento con Asbesto	114
Figura 38 Metodología para Identificar Asbesto Comparativo	121
Figura 39 Píxeles con Asbesto identificados en la muestra.....	123
Figura 40 Lotes con Asbesto identificados en la muestra	124
Figura 41 Lotes con Asbesto en la muestra	125
Figura 42 Lotes con Asbesto en la muestra	127

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1 Muestra de Techo con Asbesto	71
Foto 2 Medición de muestras método Pasivo	84
Foto 3 Techo de Fibrocemento 1	116
Foto 4 Techo de Fibrocemento 2	116
Foto 5 Techo de Fibrocemento 3	116
Foto 6 Techo de Fibrocemento 4	116

GLOSARIO DE TÉRMINOS

ATSDR	Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades
Asbesto	El asbesto o amianto es el nombre de un grupo de minerales fibrosos que están presentes en la naturaleza y son resistentes al calor y la corrosión
Asbestosis	Forma de fibrosis pulmonar intersticial causada por la exposición al asbesto
ESA	Agencia Espacial Europea
ICL	Instituto Catastral de Lima
IGN	Instituto Geográfico Nacional
IPCS	Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas
INGEMMET	Instituto Geológico Minero y Metalúrgico
MINAM	Ministerio del Ambiente
MINSA	Ministerio de Salud
MSAVI	Índice de Vegetación Ajustado al Suelo
OMS	Organización Mundial de la Salud
OIT	Organización Internacional del Trabajo
PCM	Presidencia de Consejo de ministros
SIG	Sistema de Información Geográfica
Senamhi	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
UTM	Universal Transverse Mercator

RESUMEN

La presente tesis estudia la problemática relacionada con la detección de asbesto en techos en el área industrial y urbana del distrito de Lima, específicamente en la margen izquierda del río Rímac. El interés por este tema surge del reconocimiento del grave daño que la inhalación de asbesto puede causar en la salud de la población, a pesar de la regulación existente y la normativa actual, ya que no prohíbe el uso del asbesto crisótilo, ampliamente reconocido como un agente cancerígeno por la Organización Mundial de la Salud.

El área de estudio ha experimentado una transformación significativa en su zonificación en los últimos años, desde los datos proporcionados por el Instituto Catastral de Lima y el Instituto Metropolitano de Planificación en 2007 hasta la fecha actual. Se ha observado un cambio en la predominante zonificación industrial y comercial hacia la construcción de proyectos de viviendas multifamiliares y modificaciones en el uso del suelo. Estas dinámicas han desencadenado demoliciones, traslados y, en algunos casos, el reciclaje de techos de fibrocemento. Este proceso conlleva riesgos para la salud humana, así como para las viviendas circundantes y el entorno ambiental debido a la posible liberación de fibras de asbesto en el proceso.

Por ello esta investigación tiene como objetivo principal identificar de manera indirecta de la distribución geográfica del asbesto en techos ubicados en el área industrial y urbana del distrito de Lima, mediante una metodología fundamentada en técnicas de teledetección

En este contexto, hemos definido el tipo de imagen satelital más adecuada para la identificación, resultando en un alto contenido de techos de fibrocemento con presencia de asbesto.

En resumen, la presente investigación contribuye de manera significativa a la identificación del asbesto en techos del área industrial y urbana de Lima mediante técnicas de teledetección y ofrece un marco sólido para futuras investigaciones en este campo.

Palabras clave: asbesto, crisótilo, cancerígeno, metodología, técnicas de teledetección, firma espectral.

ABSTRACT

The present research topic addresses the problem related to the detection of asbestos in roofs in the industrial and urban área of the district of Lima, specifically on the left bank of the Rímac River. The interest in this topic arises from the recognition of the serious damage that inhalation of asbestos can cause to the health of the population, despite the existing regulation and current regulations, since it does not prohibit the use of chrysotile asbestos, widely recognized as a carcinogenic agent by the World Health Organization.

The study área has undergone a significant transformation in its zoning in recent years, from the data provided by the Cadastral Institute of Lima and the Metropolitan Planning Institute in 2007 to the current date in 2025. A change has been observed in the predominant industrial and commercial zoning towards the construction of multi-family housing projects and land use modifications. These dynamics have triggered demolitions, transfers and, in some cases, the recycling of fiber cement roofs. This process carries risks to human health as well as surrounding homes and the environmental environment due to the possible release of asbestos fibers in the process.

That is why the central objective of this research is the indirect identification of the geographical distribution of asbestos in roofs located in the industrial and urban área of the district of Lima, through a methodology based on remote sensing techniques.

In this context, we have defined the type of satellite image most suitable for the identification of asbestos in roofs, resulting in a high concentration of fiber cement roofs with the presence of asbestos.

In summary, the present research contributes significantly to the identification of asbestos in roofs in the industrial and urban area of Lima using remote sensing techniques and offers a solid framework for future research in this field.

Keywords: asbestos, chrysotile, carcinogen, methodology, remote sensing techniques, spectral signature.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El asbesto, es un mineral altamente peligroso, utilizado en la construcción como componente principal de los techos o cubiertas de fibrocemento debido a sus propiedades resistentes y aislantes. Su peligrosidad radica en las diminutas fibras que se desprenden por erosión y pueden ser inhaladas. Estas partículas en suspensión viajan por el aire y afectan el sistema respiratorio, causando graves enfermedades, entre ellas el cáncer de mesotelioma, que afecta los pulmones.

En este contexto, tras una revisión de la literatura y la identificación del problema, la presente tesis propone una metodología innovadora destinada a la identificación del asbesto a través de imágenes satelitales caracterizadas por su alta resolución espectral y espacial. Se tomó como fundamento la metodología Hourglass o Reloj de Arena, la cual se aplica con éxito en el Laboratorio de Teledetección del INGEMMET. La colaboración y respaldo de este laboratorio resultaron fundamentales para la elaboración de la metodología propuesta. Además, para llevar a cabo las mediciones espectrales necesarias, se contó con la valiosa contribución de una muestra de fibrocemento con asbesto proporcionada por la empresa Klepel Consulting, la cual brinda servicios de identificación y remoción de asbesto, facilitándonos una muestra de techo de fibrocemento con contenido de asbesto.

De esta manera se identificó como área de estudio los sectores con una zonificación predominante industrial y urbana, ubicadas al margen izquierdo del río Rímac, en el distrito de Lima, seleccionada estratégicamente por tener lotes de gran tamaño y con contenido de techos de

fibrocemento de uso industrial, lo que facilita estructuras homogéneas al momento de identificarlas espacial y espectralmente.

Para la clasificación, se han empleado técnicas avanzadas, entre las que destacan la Transformación Mínima de Fracción de Ruido (MNF) y el Filtro de Coincidencia Ajustado por Mezcla (MTMF). Estas herramientas permiten un análisis detallado y preciso de las firmas espectrales, para la identificación de asbesto en techos a partir del análisis de los datos provenientes de imágenes satelitales.

Esta tesis está organizada en cinco capítulos. El primero capítulo denominado Introducción, expone el planteamiento del problema, los objetivos de la investigación, la importancia y el alcance del estudio, se presentan las limitaciones identificadas y se justifica la relevancia de la investigación. Este segmento establece las bases necesarias para comprender la naturaleza y el propósito del trabajo de investigación.

El segundo capítulo, denominado Marco Teórico, presenta los antecedentes relevantes de la investigación. Además, de las bases teóricas que respaldan y sustentan la tesis, entre las que resaltan los fundamentos físicos de la teledetección, una descripción de los satélites empleados y un análisis detallado del asbesto. Además, se proporciona una definición de términos y se presenta un marco normativo que incluye normas nacionales y acuerdos internacionales. Este capítulo sienta las bases conceptuales esenciales para comprender el contexto y los fundamentos que respaldan la metodología de la investigación.

En el tercer capítulo, denominado Hipótesis y Variables, expone la hipótesis general y las específicas, detallando las variables independientes y dependientes. Además, se exploran las operacionalizaciones de estas variables, proporcionando una matriz de consistencia que contribuye a la claridad y coherencia de la investigación. Este capítulo constituye un marco estructurado para

la formulación y comprensión de las suposiciones planteadas, así como la identificación y medición de las variables involucradas en el estudio.

En el cuarto capítulo, titulado Materiales y Métodos, se detalla minuciosamente el área de estudio, el diseño de investigación, la población y muestra seleccionada. Además, se presenta la descripción de los procedimientos, instrumentos utilizados para la recolección de información y el enfoque del análisis estadístico, proporcionando así una base sólida y detallada para la ejecución y evaluación de la investigación.

En el quinto capítulo, se expone de manera detallada los resultados obtenidos, se profundiza en su discusión, se formulan conclusiones sustentadas y se ofrecen recomendaciones derivadas de los hallazgos. Además, se incluyen las referencias bibliográficas y los anexos que contienen mapas relevantes para enriquecer la comprensión del trabajo realizado. Este capítulo constituye la culminación integral de la investigación, proporcionando una visión integral y fundamentada de los logros alcanzados.

1.2 Planteamiento del Problema

1.2.1. Descripción de la problemática

El asbesto es un mineral que ha sido clasificado como cancerígeno desde 1977 de acuerdo con la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC por sus siglas en inglés), organismo dependiente de la Organización Mundial de la Salud (OMS), además, de causar otras enfermedades relacionadas al sistema respiratorio.

Sus fibras son de tamaño microscópica y se desprenden con facilidad, no se disuelven en agua ni se evaporan. Se transportan por el aire y, al ser inhaladas en ambientes contaminados, llegan directamente a los pulmones. Por esta razón, el Banco Mundial (1991) estableció la prohibición de financiar la producción o uso de materiales que contengan este mineral.

El crecimiento urbano de las ciudades durante las décadas de 1960 y 1970 sobre todo en Latinoamérica se desarrolló de manera acelerada, desordenada e informal, ocasionando el uso de materiales de bajo costo en los techos como las calaminas de fibrocemento (Eternit), cuya estructura está compuesta por fibras de asbesto.

En el Perú en el año 2011 se promulgó la Ley N.º 29662 que prohíbe el uso de asbesto anfíboles por considerarse cancerígeno y la regulación de asbesto crisótilo, siendo su reglamento aprobado en el año 2014 por el D.S N.º 028-2014-SA. Sin embargo; el asbesto crisótilo ha sido el más utilizado en la construcción y no existe un plan de retiro y/o disposición final de este material, dejando así en total vulnerabilidad a las personas que viven estos entornos. Aunado a ello, la dinámica urbana, y cambios en la zonificación y uso de suelo, acrecienta la renovación, demolición y reciclaje en la construcción. Es por ello la necesidad de identificar y planificar su tratamiento. En ese sentido es importante tener un método que identifique este tipo de material en particular por sus características cancerígenas y la distribución geográfica para estimar la incidencia de fibras de asbesto en los techos cercanas en la zona de estudio y así poder advertir el riesgo de contaminación.

1.2.2. Formulación del problema

1.2.2.1 Problema General

¿Se podrá desarrollar una metodología para identificar la distribución geográfica de asbesto en techos mediante técnicas de teledetección, en el área industrial y urbana del distrito de Lima?

1.2.2.2 Problemas Específicos

¿Qué tipo de imágenes satelitales, nos permitirán identificar asbesto en techos en el área industrial y urbana del distrito de Lima?

¿Cómo se relacionan las técnicas de teledetección con la identificación del asbesto en techos en el área industrial y urbana del distrito de Lima?

¿Cómo se distribuye espacialmente el asbesto en el área industrial y urbana del distrito de Lima?

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar una metodología mediante técnicas de teledetección que permita identificar la distribución geográfica del asbesto en techos, en el área industrial y urbana del distrito de Lima.

1.3.2. Objetivo Específico

Determinar el tipo de imagen satelital que nos permita identificar asbesto en techos en el área industrial y urbana del distrito de Lima.

Demostrar la relación de las técnicas de teledetección con la identificación del asbesto en techos en el área industrial y urbana del distrito de Lima.

Identificar la distribución espacial del asbesto en el área industrial y urbana del distrito de Lima para futuras evaluaciones.

1.4 Importancia y alcance de la investigación

La importancia de la presente investigación recae en lo nocivo y perjudicial que es el asbesto para salud humana. Su uso y prohibición parcial en el mercado ha permitido que las calaminas de fibrocemento con asbesto presentes en las zonas industriales y urbanas no sean evaluadas en materia del riesgo que generaría; por lo tanto, es necesario identificar su distribución geográfica para los estudios pertinentes.

Para la presente investigación se aplicó las técnicas de teledetección, permitiendo identificar de manera indirecta la distribución geográfica del asbesto, puesto que el método oficial

lo desarrolló la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés).

Una vez identificada la distribución geográfica del asbesto, el alcance de la investigación va dirigida a la población y autoridades que estarán informadas del riesgo que conlleva la convivencia con dicho material.

1.5 Limitaciones de la Investigación

Respecto a las limitaciones para el desarrollo de la presente investigación, se puede mencionar el alto costo de adquisición de las escenas satelitales, la seguridad y accesibilidad del área de estudio, la disponibilidad de datos actualizados, así como el hardware y software para un análisis eficiente.

Al abordar estas limitaciones, se fortalecerá la investigación y se maximizará su impacto. Estas mejoras ayudarán a superar los obstáculos y a lograr avances significativos en el estudio de la presencia de asbesto en techos en el área industrial y urbana del distrito de Lima.

1.6 Justificación de la Investigación

1.6.1. Justificación Teórica

El conocimiento de nuevas metodologías a partir de imágenes satelitales y firmas espectrales nos ayuda a innovar en el campo de la teledetección, los resultados de la tesis generan una base de datos de firmas espectrales, base de datos geográficos, mapas temáticos, escena satelital con bandas del Infrarrojo de onda corta SWIR (Short-Wave Infrared, por sus siglas en inglés), en radiancia y reflectancia; sustentada por procesos físicos y geográficos; para la detección del asbesto en los techos, la cual contribuirá al ordenamiento territorial del Distrito de Lima y a la toma de decisiones.

1.6.2. Justificación Práctica

Debido al carácter cancerígeno y la dificultad de hacer los análisis en el área de investigación, el uso de imágenes satelitales de alta resolución espectral permite discriminar la presencia del asbesto en techos. Mediante técnicas de teledetección se realizó mediciones de reflectancia a techos con presencia de asbesto, así como también se realizó cálculo de la reflectancia en la escena satelital.

1.6.3. Justificación Socioeconómica

Está científicamente comprobado que la inhalación del asbesto produce cáncer en las personas, prohibiéndose cualquier contacto con este a partir del 2011 en el Perú.

Debido a que este problema afecta directamente a las personas al inhalar las fibras de asbesto causando cáncer al pulmón y enfermedades en las vías respiratorias con consecuencias mortales, lo cual representa un deterioro en la calidad de vida de las personas, un gasto del presupuesto estatal para la salud pública, y mayor vulnerabilidad que condiciona a las personas a otras enfermedades, por lo cual la presente investigación tiene como fin identificar la distribución geográfica del asbesto en techos mediante técnicas de teledetección óptica, en el área de estudio y tener una base de datos geográfica para futuras evaluaciones.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

Se ha revisado metodologías para identificar el asbesto mediante técnicas de teledetección, microscopía ópticas y procesos físico químico en laboratorio; siendo esta última la que cuenta con acreditación internacional, así también se han revisado investigaciones en cuanto a su uso en el Perú y como contaminante capaz de generar muchas enfermedades respiratorias, incluso cáncer de mesotelioma.

2.1.1. Antecedentes Nacionales

Para Sotelo (1969), en la investigación “Industria de la Fabricación de Productos de Asbesto-Cemento”, explica las características del asbesto cemento, su aplicación en la industria de la construcción, y los productos que elaboran en la fábrica de Eternit, además contiene una base histórica del uso de asbesto en el Perú.

Para Casas, J, et al (2016), en la investigación “Tecnologías hiperspectrales en la identificación y cartografiado de minerales de alteración hidrotermal”, se desarrolla y explica la técnica de clasificación para identificar minerales con el método “Filtro de Coincidencia Ajustado por Mezcla” MTMF por sus siglas en inglés (Boardman, 1998). Asimismo, la utilización de espectroscopía de reflectancia, en la cual se puede obtener mediante el espectrorradiómetro denominado FieldSpec 4 Hi-Res, en los laboratorios del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET).

Según Accinelli, y López (2017), en su investigación “El Asbesto una epidemia todavía por controlar”, indica que el asbesto ha sido utilizado por más de 4,500 años, y desde hace 100 años se ha relacionado con diversas enfermedades, evidenciando su relación con múltiples tipos

de neoplasias, como cáncer de pulmón, pleura, peritoneo, laringe, esófago, estómago, colon, recto y riñón, y afecciones fibrosantes, como la asbestosis pulmonar, la fibrosis pleural y placas hialinas pleurales, cuyos efectos pueden manifestarse décadas después de la exposición. Ante estos riesgos, los autores resaltan la necesidad de una legislación que prohíba definitivamente el uso de cualquier tipo de asbesto en el Perú.

Para Torres Roman, et al (2020) en la investigación “Estudio geográfico de la mortalidad por mesotelioma en el Perú y su evolución”, mencionan que en el Perú desde 1941 se importa y consume asbesto, el cual se utiliza en la construcción (techos, calderas, tanques y tuberías de agua), la industria automotriz y textil; y está presente en muchas herramientas (tostadoras, cocinas, secadores de pelo, planchas) y durante el período 2005-2014 el número de muertes reportados por mesotelioma fue de 430 (242 hombres y 188 mujeres) por cada 1 000 000 habitantes.

2.1.2. Antecedentes Internacionales

Para Perkins, R, y Harvey, B, (1993) En la investigación, “Método para determinar los asbestos en materiales de construcción”, junto a la autoridad ambiental de Estados Unidos (U.S EPA/600/R-93/116), desarrollaron un método para identificar las fibras de asbesto el cual inicia con la homogenización en un mortero, posteriormente se somete a incineración durante 3 a 15 horas a 450°C. Luego, los residuos se tratan con ácido muriático diluido con el propósito de eliminar componentes acompañantes como yeso, cal y fibras minerales. Una vez extraídas las fibras sospechosas se analizan mediante dos pruebas ópticas: primero, con un estereoscopio para evaluar su compactación y, luego, con un microscopio de polarización para examinar su morfología, índice de refracción, ángulo de extinción y otras características que permiten su identificación.

Para Basile et al (2012), en la investigación “Métodos para identificar techos en fibrocemento a través de datos remotos”, recomienda el uso de la técnica Fracción Mínima de Ruido (MNF por sus siglas en inglés) para sintetizar las bandas y obtener una mejor clasificación. Cuya zona de estudio se caracteriza por ser una zona industrial, residencial y terrenos agrícolas siendo la data usada en este estudio un sensor MIVIS (Espectrómetro multiespectral de imágenes infrarrojas y visibles) de 102 bandas.

Según Frassy et al (2013), en la investigación “Transformación de fracción mínimo de ruido para mejorar la clasificación de datos hiperespectrales aerotransportados: dos casos de estudio”, este estudio investigó el uso de la transformación de fracción mínima de ruido (MNF por sus siglas en inglés) para aumentar la precisión de clasificación de datos hiperespectrales. Los resultados mostraron que el uso de datos procesados por MNF es capaz de mejorar la Inter-clase clasificación y también resaltar las diferencias intraclases.

Según Frassy et al (2014), en la investigación “Cartografía de cubiertas de fibrocemento mediante técnicas de teledetección hiperespectral, aplicada en una amplia zona de los Alpes occidentales italianos”, para obtener una clasificación de confianza razonable el tamaño para analizar techos mediante técnicas de teledetección o sensores remotos, son techos mayores igual a 144 m², siendo la data usada en este estudio un sensor MIVIS (Espectrómetro multiespectral de imágenes infrarrojas y visibles) un escáner hiperespectral en el aire con 102 bandas espectrales de infrarrojo visible a térmico cuya resolución espacial usada para dicha investigación fue de 4 m y de 6 a 9 m por bloque de vuelo.

Szabo et al (2014), en la investigación “Probando algoritmos para la identificación de cubiertas de Asbestos basadas en datos hiperespectrales”, concluyen que estas imágenes constituyen una herramienta adecuada para su detección. Asimismo, recomiendan la aplicación de

algoritmos de clasificación como SVM (Support Vector Machine), MLC (Maximum Likelihood Classifier) y SAM (Spectral Angle Mapper).

Para Książek (2014), en la investigación “Métodos de detección de asbesto cemento en tejados y techos”, el resultado muestra la posibilidad de utilizar la teledetección para identificar las láminas de techo de fibrocemento, con el uso de dos rangos espectrales: SWIR con una longitud de onda de 2,32 μm y TIR con una longitud de onda de 9,44 μm .

Para Cilia et al (2015), en la investigación, “Mapeo de techos con fibrocemento y su estado de desgaste, usando imágenes aéreas hiperespectrales”, concluye en la propuesta de un índice llamado índice de deterioro de la superficie (ISD, por sus siglas en inglés) que no está directamente relacionado con las fibras de la superficie, sino más bien relacionado con la abundancia de musgos y líquenes que, según la investigación, están más desarrollados en los techos más viejos y desgastados; y así proporcionar información del desgaste del techos.

Para Krówczyńska, et al (2019), en la investigación, “Identificación de techos de fibrocemento usando Teledetección y redes de convolución neuronal” propone el uso de redes de convolución neuronal para la identificación de cubiertas de asbesto-cemento usando fotografías aéreas (25 cm) en composiciones de color natural (RGB) e infrarrojo de color (IRC).

La empresa Thermo Fisher Scientific ¹ desarrolló el producto microPhazir AS, capaz de identificar el asbesto (crisótilo, crocidolita, antofilita, tremolita, actinolita y amosita) de manera rápida y operando en campo, mediante espectroscopía de infrarrojo cercano (1320-1440 nm).

¹ Según Thermo Fisher (s.f.), la compañía surgió en 2006 tras la fusión de Thermo Electron y Fisher Scientific, consolidándose como una multinacional de biotecnología. MicroPhazir AS fue desarrollado entre los años 2010 y 2011, actualmente el producto se encuentra discontinuado.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1. Teledetección

Según Chuvieco (1996), los principios físicos de la teledetección se fundamentan en la medición de la radiación electromagnética, entendida como la energía que los objetos reflejan en forma de ondas a través del espacio. Esta radiación puede tener un origen natural, como la emitida por el sol, o artificial, proveniente de sistemas como radares o láser. Cuando el registro se realiza a partir de la radiación solar se denomina teledetección pasiva, mientras que, al emplearse fuentes artificiales, se habla de teledetección activa. La radiación electromagnética corresponde a la energía emitida en una longitud de onda específica por unidad de superficie y por ángulo sólido, siendo captada por sensores que registran distintos rangos del espectro electromagnético, conocidos como bandas espectrales. Esta magnitud, expresada en vatios por metro cuadrado por estereorradián ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$), constituye la base cuantitativa de la teledetección espacial.

Sigmur (2006) fundamenta que la radiación electromagnética constituye una forma de energía que se transmite en forma de ondas, propagándose en el vacío a la velocidad de la luz aproximadamente 300 000 km/s, y transportando paquetes discretos de energía conocidos como fotones. Además, explica que la radiación electromagnética al relacionarse con la atmósfera compuesta por gases y aerosoles modifica la transmisión de energía entre los flujos de radiación del Sol, la superficie terrestre y los sensores remotos instalados en los satélites. Esta interacción se manifiesta a través de tres procesos principales:

- Absorción: donde moléculas y partículas atmosféricas retienen la energía radiante, y la convierten en energía interna. Esta energía acumulada es posteriormente liberada en forma de radiación infrarroja térmica.

- **Dispersión:** Proceso en el que la radiación cambia de dirección al interactuar con partículas y gases presentes en la atmósfera, modificando su trayectoria y afectando su propagación.
- **Emisión:** Proceso mediante el cual todos los cuerpos con una temperatura superior al cero absoluto, es decir mayor a los -273°K emiten radiación. En el caso de la Tierra, esta emisión se concentra principalmente en el espectro infrarrojo térmico debido a su temperatura.

Definiendo el espectro electromagnético, según Chuvieco (1996), lo define como la distribución continua de la energía radiante en función de la longitud de onda o la frecuencia. Este concepto describe el rango completo de radiación electromagnética, desde las ondas de radio, hasta los rayos gamma, es decir desde las mayores longitudes de onda hasta las más cortas. En el ámbito de la teledetección, el espectro electromagnético permite caracterizar las propiedades físicas de los objetos mediante la medición de la energía que absorben, reflejan o emiten, siendo las regiones del espectro visible, infrarrojo y microondas las más utilizadas para el análisis de la superficie terrestre.

De acuerdo con Lillesand y Kiefer (2015), la teledetección consiste en la obtención de información de un objeto, sin necesidad de contacto directo, a través del análisis de datos recopilados por sensores especializados. Además, Emilio Chuvieco (1996) señala que la teledetección espacial consiste en obtener información física mediante imágenes adquiridas con sensores a bordo de plataformas espaciales, los cuales registran la energía reflejada del sol o la emitida por fuentes artificiales.

2.2.1.1 Sistema de Teledetección

Según Chuvieco (1996), un sistema de teledetección se entiende como el conjunto de componentes destinados a la adquisición y procesamiento de datos, con el fin de analizar información de la superficie terrestre sin requerir contacto físico directo con los objetos observados. Dicho sistema se estructura fundamentalmente por:

- i) Fuente de energía: corresponde al origen del flujo radiante captado por el sensor. En el presente estudio, dicha fuente está representada por la radiación solar.
- ii) Cubierta terrestre: comprende los distintos tipos de superficies, como vegetación, suelos, cuerpos de agua y estructuras construidas por el ser humano. En este estudio, se analiza una cubierta terrestre predominantemente de zonificación industrial.
- iii) Sistema sensor: integrado por el dispositivo sensor y la plataforma satelital que lo transporta. Su función principal es registrar la energía reflejada por la superficie terrestre, codificarla y almacenarla o transmitirla al sistema de recepción. Los sensores se clasifican en pasivos, cuando únicamente captan la radiación procedente de una fuente externa, como el Sol, y activos, cuando generan su propia energía y registran la señal de retorno reflejada por los objetos observados.
- iv) Sistema de recepción y comercialización: se encarga de captar la información transmitida por la plataforma, almacenarla en formatos estandarizados y, tras aplicar las correcciones radiométricas y geométricas correspondientes, ponerla a disposición de los especialistas para su interpretación y análisis.
- v) Intérpretes: responsables de analizar los datos recibidos, generalmente en formato de imágenes analógicas o digitales, con el fin de transformarlos en información temática o cuantitativa útil para la evaluación y comprensión del fenómeno estudiado.

- vi) Usuario final: corresponde al actor que utiliza los resultados generados en el proceso de interpretación, con el objetivo de analizarlos y emplearlos en la toma de decisiones, sustentadas en las conclusiones obtenidas del estudio.

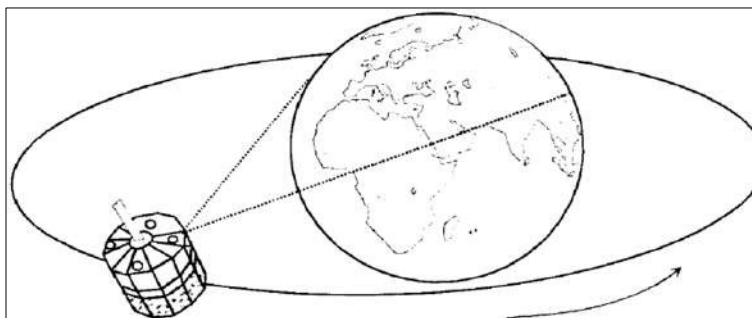
La integración de estos componentes permite obtener datos geoespaciales que describen las características físicas, químicas o biológicas de los objetos, siendo fundamental para el estudio del territorio y la gestión ambiental.

2.2.1.2 Plataforma Satelital

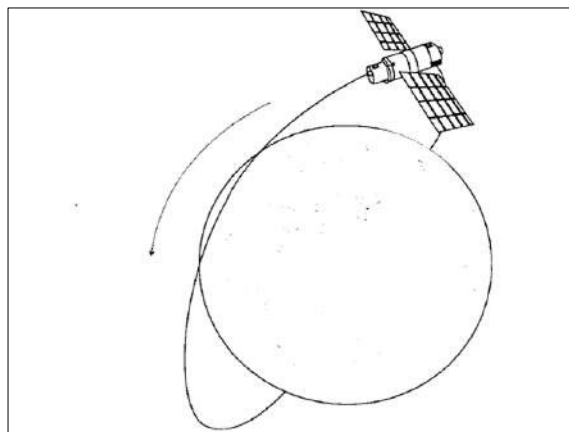
Según Chuvieco (1996), la plataforma satelital o satélite, se define como los medios físicos que transportan los sensores encargados de captar la radiación electromagnética, junto con los dispositivos necesarios para almacenar y transmitir imágenes a distancia. La recolección de datos se realiza a través de diferentes tipos de sensores, cuya selección depende de la aplicación específica. Estas plataformas se clasifican en función de su órbita, distinguiéndose dos tipos principales: órbitas geosíncronas y órbitas heliosíncronas, las cuales se detallan a continuación:

i) Órbitas geosíncronas.

Las órbitas geosíncronas denominadas también geoestacionarias, se sitúan en órbitas muy altas, permitiendo que el satélite se sincronice con el movimiento de rotación de la Tierra y observe siempre la misma zona, como se muestra en la Figura 1. Estos satélites orbitan aproximadamente a 36.000 km sobre la línea ecuatorial, con un período de rotación igual al de la Tierra. Esta característica proporciona una cobertura espacial limitada, pero permite una observación continua de la misma área, lo que resulta ideal para aplicaciones como la meteorología o las telecomunicaciones.

Figura 1*Operaciones de un Satélite Geoestacionario**Nota.* Fuente: Chuvieco (1996)**ii) Órbitas heliosíncronas,**

corresponden a plataformas en movimiento que observan sistemáticamente diferentes regiones del planeta. Aunque la órbita puede ser elíptica, generalmente son circulares para conservar una altura de observación uniforme y asegurar que las imágenes obtenidas sean compatibles. Estas órbitas suelen ser polares, lo que significa que su plano se mantiene perpendicular al Ecuador terrestre. Esto permite aprovechar la rotación de la Tierra para que la plataforma pase sobre un mismo punto en intervalos regulares. Como el planeta gira de Oeste a Este y la plataforma mantiene un desplazamiento constante de Norte a Sur, podrá registrar la misma ubicación tras un período de tiempo determinado, dependiendo de la altitud y velocidad orbital. Por lo general, estos parámetros se ajustan para que cada sector del planeta sea observado a una hora solar específica como se ilustra en la Figura 2.

Figura 2*Operación de un Satélite Heliosíncrona**Nota.* Fuente: Chuvieco (1996)

2.2.1.3 Misión Satelital WorldView-3

Según Kuester (2016), La misión Satelital WorldView-3, es un satélite de imágenes comerciales de alta resolución lanzado el 13 de agosto de 2014 desde la base Vandenberg de la fuerza aérea de los Estados Unidos. El satélite está en una órbita casi circular, sincrónica al sol (órbita heliosíncrona) con un período de 97 minutos, a una altitud aproximada de 617 km, y con un tiempo de cruce nodal descendente alrededor de las 10:30 a.m. El instrumento WorldView-3 es un generador de imágenes de barrido.

La resolución espectral se clasifica en banda pancromática, con un rango aproximado de 0.4 a 0.8 μm ; bandas del espectro visible y del infrarrojo cercano (VNIR, por sus siglas en inglés), que abarcan desde 0.4 hasta 1.04 μm ; y bandas del infrarrojo de onda corta (SWIR, por sus siglas en inglés), utilizadas además para la corrección de efectos atmosféricos como nubes, aerosoles, vapor de agua, hielo y nieve, con un rango espectral comprendido aproximadamente entre 0.405 y 2.245 μm (CAVIS, por sus siglas en inglés).

El sensor WorldView-3 registra información con una profundidad radiométrica de 11 bits en nueve bandas espectrales, que comprenden el rango pancromático, costero, azul, verde, amarillo, rojo, borde rojo, NIR-1 y NIR-2. Además, el sensor infrarrojo de onda corta (SWIR) adicional adquiere datos de 14 bits en 8 bandas que cubren la región espectral de 1100 a 2500 nm.

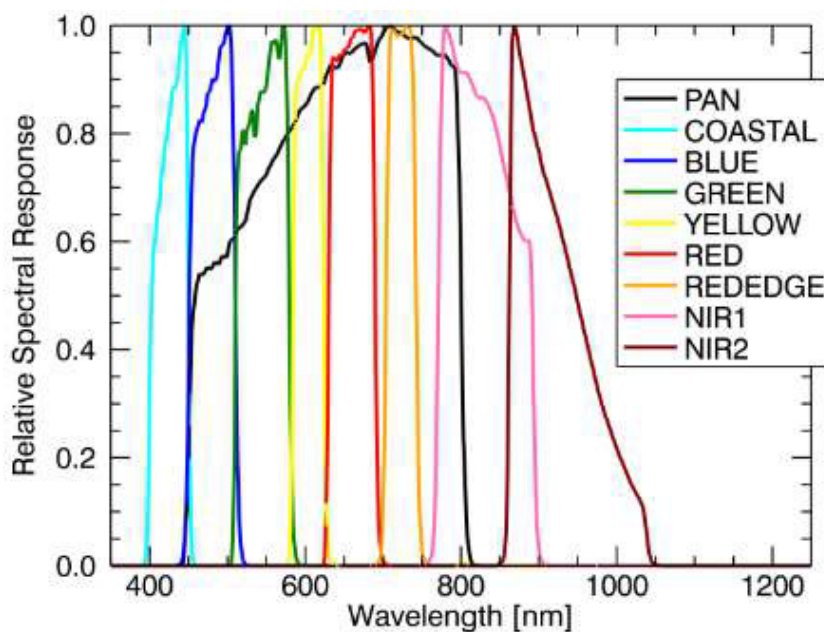
En posición nadir, la resolución espacial nominal es de: 0.31 m (pancromática), 1.24 m (VNIR) y 3.7 m (SWIR). Los productos disponibles comercialmente son remuestreados a 0.3 m (pancromático), 1.2 m (VNIR) y 7.5 m (SWIR). El ancho nominal de la franja de captura es de 13.1 km para el sensor VNIR y 11.6 km para el sensor SWIR.

La respuesta espectral relativa en radiancia del satélite WorldView-3 se establece como la relación entre la cantidad de fotoelectrones detectados y medidos por el sistema sensor y la radiancia espectral ($\text{W} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) correspondiente a una longitud de onda específica en la entrada del telescopio. Incluyendo la eficiencia cuántica del detector en bruto, además, de las pérdidas de transmisión debido a la óptica y los filtros del telescopio. Para cada banda, la respuesta espectral se normaliza dividiendo entre su valor de respuesta máxima, para que esa banda llegue a una respuesta de radiación espectral relativa.

Las curvas para las bandas multiespectrales visibles e infrarrojas cercanas (VNIR) de WorldView-3 se muestran en la Figura 3 y la Tabla 1, mientras que las curvas para las bandas SWIR de WorldView-3 se muestran en la Figura 4. y la Tabla 2

Figura 3

Respuesta de radiación espectral relativa (nm) WorldView-3 VNIR



Nota. Fuente: Hoja de datos WorldView-3. Kuester (2016)

Tabla 1

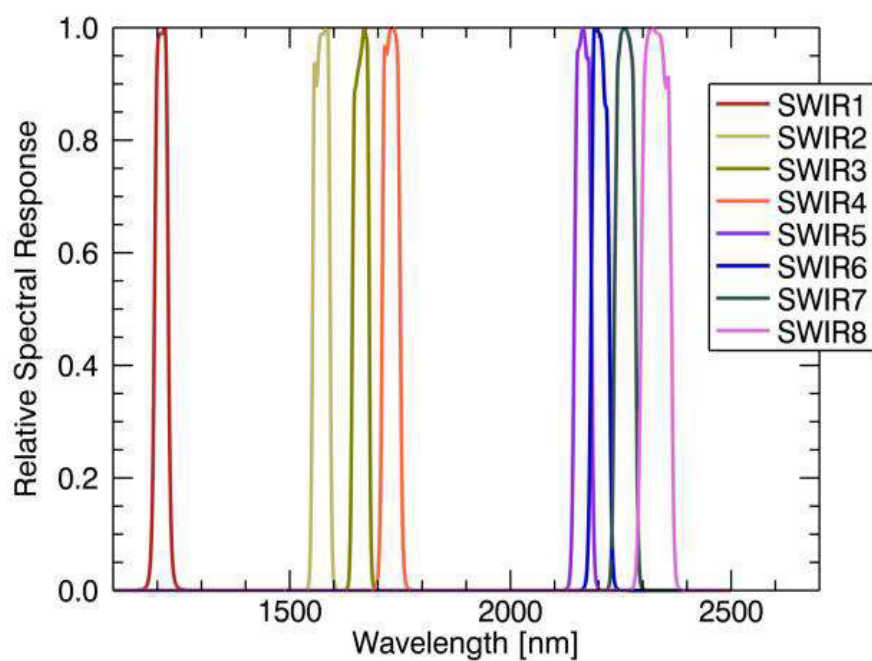
WorldView-3 bandas VNIR

8 bandas multispectrales	
Costero	400 - 450 nm
Azul	450 - 510 nm
Verde	510 - 580 nm
Amarillo	585 - 625 nm
Rojo	630 - 690 nm
Banda espectral en el borde rojo	705 - 745 nm
IR cercano 1	770 - 895 nm
IR cercano 2	860 - 1,040 nm

Nota. Fuente: Hoja de datos WorldView-3. Kuester (2016)

Figura 4

Respuesta de radiación espectral relativa (nm) WorldView-3 SWIR.



Nota. Fuente: Hoja de datos WorldView-3. Kuester (2016)

Tabla 2

WorldView-3 bandas SWIR

8 bandas SWIR	
SWIR-1	1184 - 1235 nm
SWIR-2	1546 - 1598 nm
SWIR-3	1636 - 1686 nm
SWIR-4	1702 - 1759 nm
SWIR-5	2137 - 2191 nm
SWIR-6	2174 - 2232 nm
SWIR-7	2228 - 2292 nm
SWIR-8	2285 - 2373 nm

Nota. Fuente: Hoja de datos WorldView-3. Kuester (2016)

2.2.1.4 Misión del Satélite Sentinel-2

Según la ESA (ESA, 2017) menciona que la misión Sentinel-2 del programa Copernicus está compuesta por dos satélites gemelos que comparten la misma órbita. Cada satélite cuenta con un sensor multiespectral de alta resolución, diseñado para registrar imágenes en 13 diferentes rangos espectrales, lo que permite obtener una visión renovada de la superficie terrestre. La misión Sentinel-2A fue desarrollada gracias a una colaboración entre la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés), la Comisión Europea, y diferentes entidades del sector aeroespacial. La misión Sentinel-2 está conformada por una constelación de dos satélites idénticos que operan en órbita polar, separados entre sí por 180° con el fin de maximizar la cobertura espacial y temporal. Este diseño permite alcanzar un tiempo de revisita de aproximadamente cinco días en la región ecuatorial. El primero de ellos, Sentinel-2A, fue puesto en órbita el 23 de junio de 2015, mientras que su gemelo, Sentinel-2B, se incorporó el 7 de marzo de 2017.

La misión Sentinel-2 cubre el rango comprendido entre las latitudes 56° S y 84° N, con un ancho de franja orbital de 290 km, lo que le permite alcanzar una frecuencia de revisita de 10 días con un solo satélite y de 5 días al operar conjuntamente los dos satélites de la constelación. Cada plataforma está equipada con el instrumento multiespectral óptico MSI (Multispectral Instrument), capaz de registrar información en 13 bandas: cuatro con resolución espacial de 10 m, seis de 20 m y tres de 60 m. Estas bandas permiten aplicaciones como la clasificación de coberturas terrestres, monitoreo de cambios en la superficie, correcciones atmosféricas y diferenciación entre nubes y nieve. La misión opera en órbita heliosíncrona, lo que asegura que el ángulo de incidencia de la radiación solar sobre la superficie terrestre se mantenga prácticamente constante. Esta configuración, además de minimizar los efectos de las sombras y variaciones en la iluminación, garantiza la coherencia temporal necesaria para estudios basados en series de datos

multitemporales. Los satélites Sentinel-2A y Sentinel-2B comparten la misma órbita con un desfase de 180°, a una altitud media de 786 km, una inclinación de 98,62° y una hora solar local media en el nodo descendente fijada a las 10:30 a. m. (ESA, 2017).

Tabla 3

Características generales de la imagen Sentinel-2

Banda Sentinel-2	Longitud de onda central (μm)	Resolución espacial (m)
Banda 1 - Costal aerosol	0.443	60
Banda 2 - Azul	0.490	10
Banda 3 - Verde	0.560	10
Banda 4 - Rojo	0.665	10
Banda 5 - Vegetación borde rojo	0.705	20
Banda 6 - Vegetación borde rojo	0.740	20
Banda 7 - Vegetación borde rojo	0.783	20
Banda 8 - NIR (Infrarrojo cercano)	0.842	10
Banda 8A - Vegetación borde rojo	0.865	20
Banda 9 - Vapor de agua	0.945	60
Banda 10 - SWIR (infrarrojo de onda corta)	1.375	60
Banda 11 - IR	1.610	20
Banda 12 - SWIR	2.190	20

Nota. Fuente: ESA (2017). Elaboración propia

2.2.1.5 Misión del Satélite Alos Palsar

La misión ALOS PALSAR (Phased Array tipo L-band Synthetic Aperture Radar, por sus siglas en inglés) es un satélite avanzado de observación terrestre (ALOS), también llamado Daichi, desarrollado por la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA, por sus siglas en inglés), fue lanzado desde el Centro Espacial de Tanegashima en Japón, el 24 de enero del 2006 (JAXA, 2008). ALOS contiene tres sensores, dos captan imágenes ópticas (PRISM y AVNIR-2), y el tercero es un radar de banda L de apertura sintética. Este sistema tenía como fin obtener información fiable de la superficie terrestre, incluyendo la cartografía, observación regional, monitorear desastres y recursos naturales (Mitchell et al. 2012; Cango, 2017).

La recolección de información inició el 16 de mayo del 2006, en una órbita heliosíncrona circular a una altura de 691.65 km, con un ciclo de repetición de 46 días (Mitchell et al., 2012). El ancho de barrido es de 250 a 350 km. ALOS es considerado como uno de los satélites más grandes, cuyas dimensiones son: 3.5 m de ancho x 4.5 m de largo x 6.5 m de alto (Suzuki, 2014).

2.2.1.6 Tratamiento Digital de Imágenes

Según Chuvieco (1996), el tratamiento digital de imágenes es el conjunto de técnicas que permiten modificar y analizar imágenes digitales con el propósito de resaltar información, corregir errores o extraer datos cuantitativos. Estas técnicas se aplican a los datos registrados por sensores remotos para facilitar su interpretación y optimizar la extracción de información geoespacial.

Asimismo, Chuvieco (1996) señala que la resolución de una imagen satelital se refiere al grado de detalle que puede ser observado o medido en la imagen, en función de las características del sensor que la registra. Esta se clasifica en cuatro tipos fundamentales, los cuales determinan la capacidad de la imagen para representar la información espacial, espectral, radiométrica y temporal.

- Resolución Espacial (Geométrica): Es el tamaño que tiene el píxel para poder interpretar una imagen. Es imprescindible una buena equivalencia entre la resolución y la escala espaciales a la que ocurren los fenómenos que se quieren observar.
- Resolución Espectral: Indica el número y anchura de las bandas en las que el sensor puede captar radiación electromagnética. En principio cuanta más banda incluya un sensor mejor, ya que cada banda constituye una variable para caracterizar la superficie captada. Por otro lado, es preferible que estas bandas sean estrechas para que su poder discriminante se incremente. Si las bandas son muy anchas van a

recoger valores promediados que ocultarán elementos de diferenciación. Por ejemplo, resulta mucho más informativo contar con 3 bandas (rojo, verde azul) en el visible que con una sola banda (fotografía en blanco y negro).

- Resolución Radiométrica: Indica la sensibilidad del sensor, es decir la capacidad de discriminar entre pequeñas variaciones en la radiación que capta. Suele expresarse mediante el número de bits necesarios que se precisan para almacenar cada píxel. Cuanto mayor sea la precisión radiométrica mayor número de detalles podrán captarse en la imagen.
- Resolución Temporal: Es el intervalo de tiempo entre cada imagen obtenida por la plataforma; cada media hora en el caso de los satélites geosíncronos y variable en el caso de los satélites heliosíncronos. Recientemente se han desarrollado satélites de muy alta resolución espacial con sensores orientables, de manera que la zona de la que captan imágenes es relativamente independiente de la posición que ocupe el satélite con lo que la resolución temporal pasa a ser algo más flexible (Sigmur, 2006).

Según Chuvieco (2006), las imágenes satelitales son el producto obtenido por un sensor remoto que, tras ser captado, se transmite a estaciones terrestres para su posterior visualización, procesamiento y análisis. Estas imágenes están compuestas por valores numéricos que representan la intensidad de la radiación electromagnética recibida, definiendo así el tono o nivel de gris de cada unidad pictórica, denominada píxel, constituye la unidad mínima de información de una imagen digital.

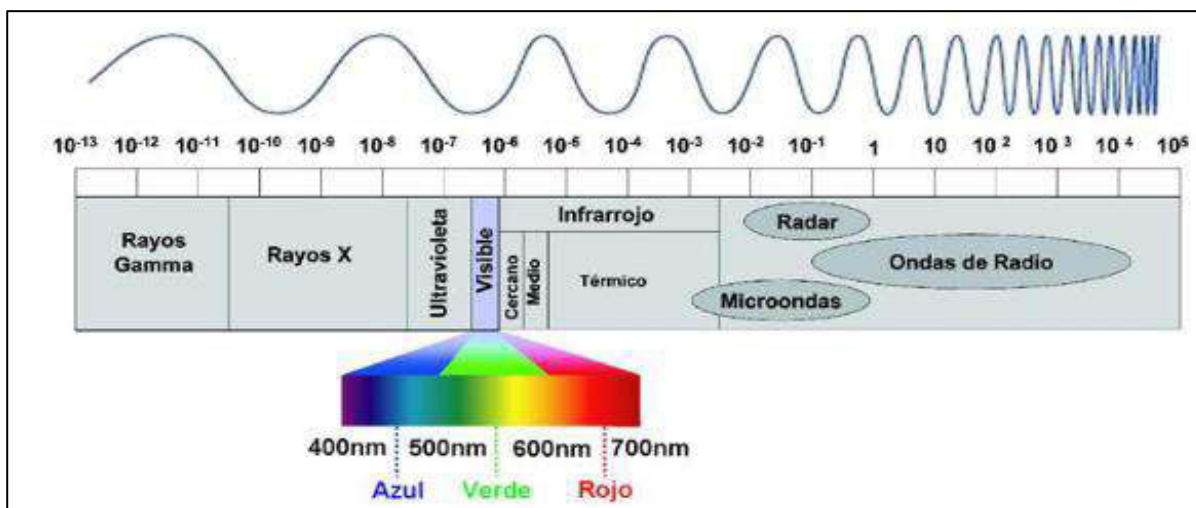
2.2.1.7 Bandas Espectrales

Chuvieco (2017) menciona que, desde el punto de vista de la teledetección, se destaca una serie de bandas espectrales que son las más frecuentes empleadas con la tecnología actual (Figura 5). Su denominación y amplitud varían según distintos autores, si bien la terminología más común es la siguiente:

- Espectro Visible (0.4 a 0.7 μm)
- Infrarrojo Próximo (0.7 a 1.3 μm)
- Infrarrojo Medio (1.8 a 8 μm)
- Infrarrojo Lejano o térmico (8 a 14 μm)
- Microondas (a partir de 1 mm)

Figura 5

Espectro electromagnético (arriba longitudes de onda λ en metros)



Nota. Fuente: Gonzaga, (2014)

2.2.1.8 Correcciones de la imagen satelital

Además, las imágenes capturadas por satélites pueden experimentar diversas fuentes de errores que distorsionan la información que ofrecen. Estos errores pueden originarse por diferentes motivos, entre los cuales se destacan:

i) Las correcciones geométricas:

De una imagen de satélite, al igual que las fotografías aéreas, no proporciona información georreferenciada; cada píxel se ubica en un sistema de coordenadas arbitrario de tipo fila-columna como los que manejan los programas de tratamiento digital de imágenes. El proceso de corrección geométrica consiste en dar a cada píxel su localización en un sistema de coordenadas estándar (UTM, Universal Transversal Mercator) para poder, de este modo, combinar la imagen de satélite con otro tipo de capas en un entorno SIG. De esta manera se obtiene una nueva capa en la que cada columna corresponde con un valor de longitud y cada fila con un valor de latitud (Sigmur, 2016).

ii) Las correcciones radiométricas:

Buscan mejorar la precisión de las medidas de reflectancia, apuntan a eliminar ruidos en los ND (niveles digitales) de la imagen compensando las diferencias en los valores de radiancia y la conversión de los ND a valores de radiancia y reflectancia, utilizando modelos de atmósfera y las geometrías de iluminación/observación (APN, 2005 citado por Gonzaga).

iii) Las correcciones atmosféricas:

Tienen como objetivo general convertir los valores obtenidos por el sensor remoto en valores de reflectancia en superficie, que es la magnitud física de interés. Estos valores son necesarios cuando se utilizan datos satelitales para el análisis cuantitativo de las propiedades biofísicas de los elementos de la superficie terrestre, identificar y evaluar los procesos que en ella ocurren mediante la comparación de diferentes escenas en estudios temporales y cuando se deriven

índices a partir de bandas ubicadas en diferentes regiones del espectro electromagnético. (APN, 2005 citado por Gonzaga)

El método más usado es el modelo FLAASH (Análisis atmosférico rápido de línea de visión de hipercubos; por siglas en inglés) el cual es una herramienta para la corrección atmosférica de primer principio, que es capaz de corregir en el espectro visible, infrarrojo cercana e infrarrojo de onda corta y también puede eliminar la mayor parte de la influencia que tiene el aire y la luz y otros factores de la reflectancia; para obtener parámetros más precisos de la reflectividad, emisividad, temperatura de la superficie y otros modelos físicos reales, características de la superficie (ENVI User's guide, 2009).

FLAASH parte de una ecuación estándar para la radiancia espectral en un píxel del sensor, L , que se aplica al rango de longitud de onda solar (se desprecia la emisión térmica) y plano, lambertiano materiales o sus equivalentes. La ecuación es (ENVI, 2009):

$$L = \frac{A\rho}{1 - \rho_e S} + \frac{B\rho_e}{1 - \rho_e S} + L\alpha$$

Donde L es la radiancia de un píxel recibida por el sensor; ρ es la reflectancia de la superficie para un píxel; ρ_e es la reflectancia superficial promediada espacialmente, S es el albedo esférico de la atmósfera, $L\alpha$ es la radiancia que corresponde a la dispersión de la atmósfera, A , B son coeficientes independientes de la superficie y que varía con las condiciones atmosféricas y geométricas (Anderson et al., 1999 y Perkins et al., 2005).

2.2.1.9 Máscaras

Las máscaras se emplean para excluir o incluir píxeles específicos durante el procesamiento digital de imágenes o en la ejecución de análisis estadísticos, permitiendo focalizar los cálculos únicamente en las áreas de interés. En teledetección, esta técnica se utiliza para seleccionar regiones que cumplen criterios previamente definidos como tipo de cobertura, rango

espectral o delimitación espacial, mediante la asignación de valores binarios a cada píxel, donde el valor **1** representa los píxeles pertenecientes a la región de interés (ROI) y el valor **0** aquellos que son excluidos del análisis. El enmascaramiento constituye, por tanto, un procedimiento fundamental para reducir ruido, limitar la influencia de coberturas no relevantes y mejorar la precisión de los resultados derivados del procesamiento espectral (Jensen, 2015; Richards & Jia, 2006; Lillesand et al., 2015).

2.2.1.10 Índices espectrales

Según Gilabert, García-Haro y Gonzales (1997), los Índices de vegetación son parámetros calculados a partir de los valores de la reflectividad a distintas longitudes de onda y que pretende extraer de los mismos la información relacionada con la vegetación minimizando la influencia de perturbaciones como las debidas al suelo y las condiciones atmosféricas.

Según Giraldo (2018), Los índices espectrales son combinaciones de reflectancia superficial en dos o más longitudes de onda que reflejan la abundancia relativa de características específicas. Estos índices permiten identificar rasgos fisiológicos en coberturas de vegetación, cuerpos de agua, nieve y áreas con alteraciones del terreno. La información obtenida de estos índices es adecuada para estudios de entornos dinámicos a nivel local, regional y global.

2.2.1.11 Índice de Vegetación Ajustado al Suelo

Según Qi et al, (1994), el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Modificado (MSAVI), trata de corregir el efecto del suelo en el valor del índice. En la firma espectral de los suelos se observa que su reflectividad es similar en las bandas roja (R) e infrarroja cercana (IRC). También, al cambiar las condiciones del suelo la reflectividad aumenta o disminuye simultáneamente en ambas bandas. Así, un suelo húmedo refleja menos en el rojo, pero también menos en el IRC, y un suelo seco refleja más en ambas bandas. Lo cierto es que, si representamos en una figura que tenga

en uno de los ejes la banda R y en el otro la banda IRC, los puntos que representan superficies desnudas se distribuyen (con mayor o menor dispersión según la variación experimentada por los parámetros que determinan la reflectividad de los suelos que representan), a lo largo de una línea recta, llamada la “línea del suelo”. Como siempre forman una línea recta, se puede definir a partir de dos puntos, correspondientes a los valores de reflectividad de un mismo suelo húmedo y seco en las bandas R e IRC. Si en un punto concreto no hay vegetación, ese punto se representará sobre la línea del suelo (Muñoz, 2013).

El Índice de Vegetación Ajustado al Suelo se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{MSAVI2} = \frac{(2 * \text{IRC} + 1 - \sqrt{(2 * \text{IRC} + 1)^2 - 8 * (\text{IRC} - \text{R})})}{2}$$

Donde:

IRC: Banda Infrarroja cercana

R: Banda roja

2.2.1.12 Análisis de Componentes Principales PCA

El PCA (por sus siglas en inglés) consiste en resumir un grupo amplio de variables en un nuevo conjunto (más pequeño) sin perder una parte significativa de la información original (Chuvieco, 1996). Para el usuario final de los productos de la Teledetección, el objetivo del PCA es construir una o varias imágenes que incrementen su capacidad de diferenciar distintas coberturas. Es por ello que al realizar una composición a color resulta interesante usar una combinación de tres componentes en lugar de las bandas espectrales. El PCA puede aplicarse como realce previo a la interpretación visual o como procesamiento anterior a la clasificación. En general, esta técnica incrementa la eficiencia computacional de la clasificación porque reduce la dimensionalidad de los datos. (Técnicas Utilizadas, Laboratorio de Teledetección – INGEMMET).

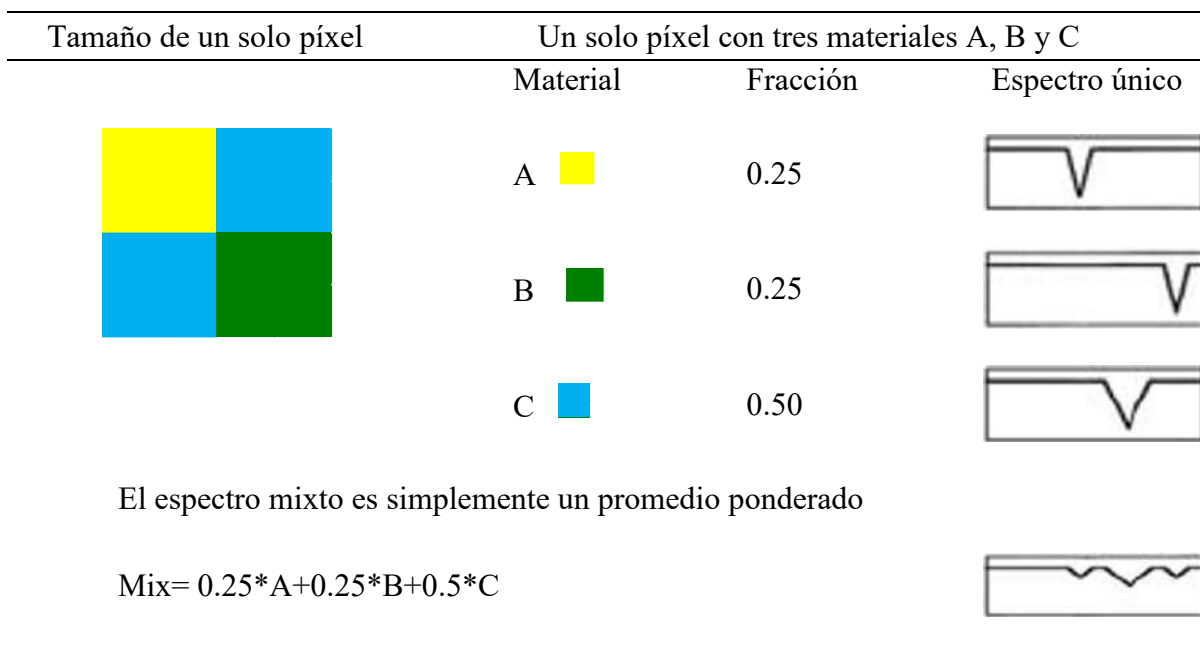
Para la obtención de anomalías espectrales por presencia de óxidos, se aplicó la técnica de Análisis de Componentes Principales.

2.2.1.13 Firmas Espectrales

Sigmur (2006) define a las firmas espectrales como la reflectividad de los objetos respecto a las diferentes longitudes de onda. Cada tipo de material, suelo, vegetación, agua, etc. reflejará la radiación incidente de forma diferente lo que permitirá distinguirlo de los demás si medimos la radiación reflejada. A partir de medidas de laboratorio se ha obtenido la reflectividad para las distintas cubiertas en diferentes longitudes de onda. El gráfico que, para cada longitud de onda, nos da la reflectividad en tanto por ciento se conoce como firma espectral y constituye una marca de identidad de los objetos. Resulta así fácil por ejemplo distinguir entre suelo y vegetación, e incluso entre diferentes tipos de suelo o diferentes tipos de vegetación.

2.2.1.14 Espectrometría de imágenes y mezcla espectral

Boardman& Kruse (2011). La espectrometría de imágenes (medición simultánea de espectros continuos e imágenes de hasta cientos de canales espectrales o bandas) es una tecnología probada para identificar y mapear materiales basándose en sus firmas espectrales. El mapeo espectral utilizando datos de espectrómetros de imágenes está bien establecido y se usa rutinariamente para numerosas aplicaciones. Sin embargo, estudios indican que las superficies naturales raramente están compuestas por un solo material uniforme. La mezcla del área dentro del campo de visión instantáneo de los píxeles de imagen resulta en firmas espectrales mixtas ("mezcla espectral"). La mezcla espectral es consecuencia de la mezcla de materiales con diferentes propiedades espectrales dentro de un solo píxel de imagen según lo medido por el sistema de espectrómetro de imágenes (Figura 6).

Figura 6*Mezcla espectral lineal de tres materiales*

Nota. Fuente: Boardman& Kruse (2011). Elaboración propia

2.2.1.15 Métodos de Clasificación

Según Chuvieco (1996), A partir de la clasificación digital se obtiene una cartografía e inventario de las categorías objeto de estudio. La imagen satelital multibanda se convierte en otra imagen, del mismo tamaño y características de las originales, con la importante diferencia de que el nivel digital que define cada píxel no tiene relación con la radiancia detectada por el sensor, sino que se trata de una etiqueta que identifica la categoría asignada a ese píxel.

El primero es el método supervisado, el cual se define como parte de un conocimiento previo del terreno o de la zona de estudio, adquiridos por experiencia previa o por trabajos de campo, a partir del cual se seleccionan las muestras para cada una de las categorías. Esta familiaridad con la zona de estudio permite al intérprete delimitar sobre la imagen unas áreas suficientemente representativas de cada una de las categorías que componen la leyenda. Estas áreas de estudio se denominan, áreas de entrenamiento.

El término indica que tales áreas sirven para “entrenar” al ordenador en el reconocimiento de las distintas categorías. En otras palabras, a partir de ellas el ordenador calcula los ND que definen cada una de las clases, para luego asignar al resto de los píxeles de la imagen a una de esas categorías en función de sus ND. Finalizada la selección de las áreas de entrenamiento, el ordenador calcula las estadísticas elementales de cada categoría: media, rango, desviación típica, matriz de varianza-covarianza, etc., a partir de los ND de todos los píxeles incluidos en las áreas de entrenamiento asignado a esa clase, este cálculo se aplica a todas las bandas que intervendrán en la clasificación. En definitiva, se asume que las áreas de entrenamiento son fieles representantes de las distintas categorías, y que, por tanto, las medidas extraídas a partir de sus ND definen convenientemente a esas clases. De aquí que sea crucial su correcta selección, ya que de otro modo se estaría forzando al ordenador a clasificar áreas heterogéneas.

El segundo es el método no supervisado, el cual procede a una búsqueda automática de grupos de valores homogéneos dentro de la imagen, este método se dirige a definir las clases espectrales presentes en la imagen. No implican ningún conocimiento del área de estudio, por lo que la intervención humana se centra más en la interpretación que en la consecución de los resultados.

En esta estrategia, se asume que los ND de la imagen forman una serie de agrupaciones o conglomerados (clúster), más o menos nítidos según los casos. Estos grupos equivaldrían a píxeles con un comportamiento espectral homogéneo y, por tanto, deberían definir clases temáticas de interés. (Chuvieco, 1996)

Para Mather (1987) el análisis no supervisado se orienta no tanto a la clasificación de la imagen, como a definir precisamente los grupos o categorías que intervendrán en la clasificación

propiamente dicha. En ese sentido, el método no supervisado podría considerarse como exploratorio, dirigido a deducir las clases espectrales presentes en la imagen.

Para Hoffer y Swain (1980), Justice y Townshend (1981), tanto el método supervisado como el no supervisado cuentan con ventajas e inconvenientes ya que el primero resulta muchas veces subjetivo, pues el usuario establece a priori unas categorías sin valorar las características espectrales de la imagen. El segundo no garantiza que las clases deducidas tengan significado para el usuario del producto, además de ser de difícil verificación. Con el objetivo de minimizar los inconvenientes de ambos métodos, se han propuesto diversas alternativas que los combinan de alguna forma, son los métodos mixtos que pueden agruparse en dos bloques:

Análisis supervisado para “guiar” al no supervisado. En este caso, el conocimiento del intérprete se utiliza para orientar la búsqueda de esos grupos espectrales homogéneos, por ejemplo puede aplicarse el método no supervisado a áreas de la imagen con una cobertura conocida, lo que facilitaría la definición espectral de dicha cubierta (Justice y Townshend, 1981; Lachowski y Dietrich, 1978; Hoffer y Fleming, 1978), otra forma de orientar el análisis no supervisado, consiste en introducir los ND medios de las categorías de interés – obtenidas a partir de las áreas de entrenamiento – como centros iniciales de grupo. Gracias a ello, el proceso iterativo de búsqueda se reduce notablemente, a la vez que se predispone la formación de grupos con un significado temático.

Análisis supervisado y el no supervisado pueden combinarse al aplicarse separadamente sobre la misma imagen, para luego sintetizar las medidas extraídas por ambos. Se asume que las categorías deducidas por los dos métodos pueden complementarse mutuamente, ganando en significado espectral e informacional las clases resultantes. Algunos autores, por ejemplo, emplean el análisis no supervisado para estratificar la imagen, quedando el supervisado para las

áreas no clasificadas previamente (Bruneau y Gautier, 1981; Nuñez et al., 1983). Más original resulta combinar categorías deducidas por los dos métodos, empleando un algoritmo de agrupación jerárquico. Esto permite crear un nuevo conjunto de categorías en donde se combina la información obtenida por ambos métodos (Chuvieco y Congalton 1988).

2.2.1.16 El Método Reloj de Arena (Hourglass)

El Método Reloj de Arena (Hourglass Method) constituye un procedimiento sistemático para la identificación y extracción de miembros finales espectrales (endmembers) a partir de datos hiperespectrales y multiespectrales. Este enfoque fue desarrollado en el contexto del análisis espectral avanzado para espectrómetros de imágenes y se fundamenta en una secuencia estructurada de reducción de dimensionalidad, identificación de píxeles espectralmente puros y posterior mapeo de la distribución espacial de materiales (Boardman, 1993; Kruse et al., 1993). Su aplicación es particularmente relevante en estudios donde se requiere detección dirigida de materiales específicos, caracterización mineralógica o identificación de coberturas superficiales mediante firmas espectrales.

El método recibe su denominación por la analogía conceptual con un reloj de arena: inicia con un amplio conjunto de datos espectrales (reflectancia aparente en múltiples bandas), reduce progresivamente la dimensionalidad para concentrar la información más significativa, y posteriormente expande el análisis hacia la generación de mapas temáticos de distribución y abundancia relativa de los materiales identificados (Green et al., 1988). Esta estructura secuencial permite optimizar el procesamiento de grandes volúmenes de datos hiperespectrales, disminuyendo el efecto del ruido y resaltando la variabilidad espectral relevante.

De acuerdo con Boardman (1993), el procedimiento se compone de cuatro etapas fundamentales: (i) la Transformación Mínima de Fracción de Ruido (Minimum Noise Fraction, MNF); (ii) el Índice de Pureza de Píxeles (Pixel Purity Index, PPI); (iii) la visualización interactiva en espacio n-dimensional para la selección de endmembers; y (iv) la aplicación de algoritmos de detección dirigida, tales como Matched Filtering (MF) o Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF), con el propósito de mapear espacialmente la presencia y abundancia de los materiales identificados.

La Transformación MNF constituye la fase inicial y crítica del método. Según Boardman y Kruse (1994), la MNF permite determinar la dimensionalidad efectiva de la imagen, segregar el ruido de la señal espectral útil y reducir los requerimientos computacionales para el procesamiento posterior. La versión modificada de Green et al. (1988), implementada en software como ENVI, es una transformación lineal que comprende dos rotaciones sucesivas basadas en análisis de componentes principales (ACP).

La primera rotación utiliza los componentes principales derivados de la matriz de covarianza del ruido, con el objetivo de descorrelacionar y reescalar el ruido presente en los datos, proceso conocido como blanqueamiento de ruido (noise whitening). Como resultado, los datos transformados presentan varianza unitaria del ruido y ausencia de correlación interbanda. La segunda rotación aplica un nuevo análisis de componentes principales sobre los datos previamente blanqueados y reescalados por la desviación estándar del ruido. En esta etapa, la dimensionalidad inherente de los datos se evalúa mediante el análisis de los valores propios (eigenvalues) y las imágenes asociadas, permitiendo separar componentes dominadas por señal de aquellas dominadas por ruido (Green et al., 1988; Boardman & Kruse, 1994). Este proceso mejora significativamente la relación señal-ruido y optimiza la identificación posterior de píxeles espectralmente extremos.

Posteriormente, el método incorpora algoritmos de detección dirigida para mapear materiales específicos. En este contexto, el Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF) representa una evolución del Matched Filtering clásico. Según Boardman y Kruse (2011), el MTMF es un método lineal óptimo para localizar una firma espectral conocida en presencia de un fondo mixto y desconocido. Este algoritmo combina las propiedades estadísticas del filtro de coincidencia (MF) con el modelo lineal de mezcla espectral, permitiendo estimar la abundancia aparente de un material objetivo incluso cuando este ocupa solo una fracción del píxel (detección subpíxel).

El MTMF extiende el MF tradicional al incorporar explícitamente el modelo de píxeles mixtos lineales, lo que mejora la selectividad entre materiales espectralmente similares y reduce los errores de clasificación y mapeo. Asimismo, integra métricas de plausibilidad que permiten discriminar respuestas espectrales inconsistentes, minimizando la ocurrencia de falsas alarmas o falsos positivos. Esta combinación de técnicas estadísticas y de mezcla espectral confiere al MTMF una alta capacidad de detección subpíxel y un elevado poder de rechazo de ruido y materiales no deseados (Boardman & Kruse, 2011).

Su aplicación se desarrolla en el laboratorio de teledetección del INGEMMET, donde se realizan análisis espectrales orientados a la identificación y clasificación de minerales en el marco de las actividades de exploración y caracterización del territorio peruano.

En conjunto, el Método Reloj de Arena constituye un enfoque integral para el análisis hiperespectral, al integrar en un mismo flujo la reducción de dimensionalidad, la identificación de miembros finales y el mapeo dirigido de materiales. Su fortaleza radica en separar explícitamente la señal del ruido, explorar la geometría del espacio espectral y aplicar modelos lineales de mezcla para detectar con precisión firmas espectrales específicas, consolidándose como una herramienta clave en la teledetección aplicada.

2.2.2. Características del Asbesto

De acuerdo con Hananiah, y Aremu, S. (2019), El asbesto es un nombre general dado a un grupo de minerales de silicato fibroso cancerígeno y genotóxico que han sido de valores comerciales a lo largo de los años. Debido a sus propiedades especiales como flexibilidad, longitud de tensión, estabilidad al calor y resistividad a ataques químicos, eléctricos, térmicos y biológicos, las fibras de asbesto se han utilizado como componentes de varios materiales de construcción y automotriz; este material cuando es perturbado durante la redecoración, demolición, renovación y reparación, libera fibras de asbesto al ambiente que conduce a la exposición residencial y ocupacional. La concentración media de fibras se ha encontrado que es más alto en las zonas urbanas (especialmente en las que están muy cerca de las industrias de asbesto que puede incluir sitios de minería y demolición) que en áreas rurales. Varios estudios han relacionado la exposición al asbesto a varios problemas de salud graves, como cáncer de pulmón, mesotelioma, asbestosis y otros problemas respiratorios.

2.2.2.1 Historia del Asbesto

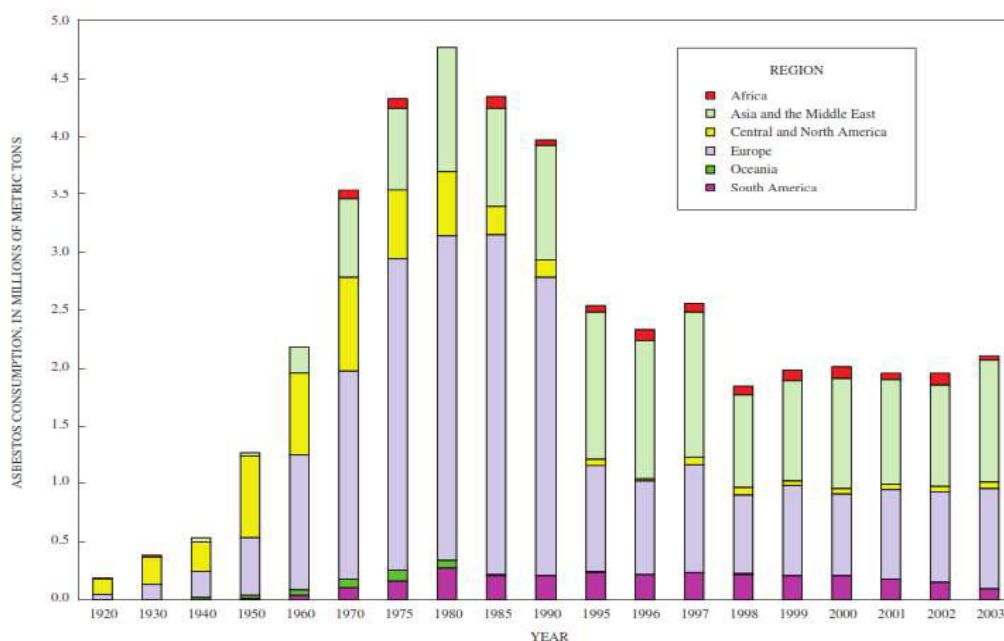
Virta (2006), explica que en los primeros usos del asbesto se explotaron el refuerzo y las propiedades térmicas de las fibras. La primera aplicación registrada se remonta a Finlandia (aproximadamente 2500 a. C.), donde se utilizó antofilita de un depósito local para reforzar utensilios de arcilla y cerámica. Numerosa referencia temprana también se puede encontrar describiendo el uso de fibras de asbesto para la fabricación de mechas de lámparas y ropa crematoria. A finales del siglo XVII, Pedro el Grande de Rusia inició la fabricación de papel de asbesto, utilizando fibras de crisótilo extraídas de depósitos en los Montes Urales. El uso de fibras de asbesto en una escala industrial verdadera comenzó en Italia a principios del siglo XIX con el desarrollo de textiles de asbesto. A fines del siglo XIX, se habían identificado importantes

depósitos de asbesto en todo el mundo y su explotación había comenzado en Canadá (1878), Sudáfrica (1893, 1908-1916) y la ex URSS (1885). Desde principios del siglo XX, la demanda de fibras de asbesto creció de manera espectacular para numerosas aplicaciones, especialmente para el aislamiento térmico. El desarrollo de la máquina Hatschek en el año 1900 para la fabricación continua de láminas de un compuesto de fibrocemento también abrió un importante campo de aplicación industrial para las fibras de amianto, al igual que el desarrollo de la industria del automóvil para los frenos, embragues de amianto. La Segunda Guerra Mundial apoyó el crecimiento de la producción de fibra de asbesto para aplicaciones militares, típicamente en aislamiento térmico y protección del fuego. Dichas aplicaciones se extendieron más tarde a construcciones residenciales o industriales durante varias décadas después de la guerra. A fines de los años sesenta y setenta, el hallazgo de problemas de salud asociados con la exposición a largo plazo a las fibras de asbesto en el aire condujo a una gran reducción en el uso de fibras de asbesto. En la mayoría de las aplicaciones actuales, las fibras de asbesto están contenidas dentro de una matriz, típicamente cemento o resinas orgánicas.

La producción mundial de fibras de asbesto alcanzó un máximo en 1977 de 4.8×10^6 toneladas, disminuyendo a 1.9×10^6 toneladas en 2000. (Ver Figura 7)

Figura 7

Consumo de asbesto en el mundo por región



Nota. Fuente: Virta, 2006.

2.2.2.2 Mineralogía del Asbesto

De acuerdo con Virta (2003), la génesis de las fibras de asbesto como depósitos minerales se presenta en dos tipos:

- Asbesto serpentino (93% en uso comercial): Este tipo de asbesto tiene una estructura en capas con fibras rizadas. Se llama crisótilo y es el único tipo en esta categoría. Ha sido el tipo de asbesto más usado en edificios en los EE. UU. y en todo el mundo debido a sus cualidades ignífugas y resistentes al calor. Su origen está dado en la alteración y metamorfismo de rocas ígneas básicas ricas en silicatos de magnesio. El crisótilo es un silicato de magnesio hidratado y su composición química puede administrarse como $(\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8)$. Las fibras de crisótilo pueden ser extremadamente delgadas, la unidad de fibra tiene un diámetro promedio de aproximadamente 25 nanómetros (nm). Las fibras de crisótilo

industriales son agregados de estas fibras unitarias que generalmente exhiben diámetros de 0.1 a 100 m; su longitud varía desde una fracción de milímetro (mm) hasta varios centímetros (cm), aunque la mayoría de las fibras de crisótilo utilizadas son más cortas que 1 cm.

- **Asbesto Anfíboles (7% de uso comercial):** Los otros cinco minerales comerciales de asbesto pertenecen al grupo mineral anfíbol, que son minerales silicatos hidratados debido a la naturaleza de la estructura cristalina de anfíboles, puede haber una considerable sustitución de elementos en la red cristalina. Si bien hay más de 70 miembros finales de anfíboles químicamente distintos, solo 5 han sido utilizado comercialmente como asbesto, como se explica en la Tabla 4:

Tabla 4

Composición de Asbestos Anfíboles utilizados comercialmente

Nombre	Composición
Actinolita	$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{+2}) \text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Amosita	$(\text{Fe}^{+2})_2(\text{Fe}^{+2}, \text{Mg})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Antofilita	$\text{Mg}_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Crocidolita	$\text{Na}_2(\text{Fe}^{+2}, \text{Mg})_3\text{Fe}^{+3}\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Tremolita	$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{+2}) \text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

Nota. Fuente: Virta (2003)

El grupo de minerales anfíboles se encuentra ampliamente en toda la corteza terrestre. Su composición química puede variar ampliamente. De los anfíboles, solo unas pocas variedades tienen un hábito asbestiforme y estas últimas se presentan en cantidades relativamente bajas. (Virta,2003)

Clasificación del asbesto según el registro de sustancias químicas del Servicio de Resúmenes Químicos² (CAS, por sus siglas en inglés).

² <https://www.cas.org/es-es/about/cas-history>

- Asbesto – sin especificación- (CAS: 1332-21-4)
- Asbesto Actinolita (CAS: 77536-66-4)
- Asbesto Amosita (CAS: 12172-73-5)
- Asbesto Antofilita (CAS: 77536-67-5)
- Asbesto Crisótilo (CAS: 12001-29-5)
- Asbesto Crocidolita (CAS: 12001-28-4)
- Asbesto Tremolita (CAS: 77536-68-6)
- Talco (que contiene fibras de Asbesto) (CAS: 14807-96-6)

2.2.2.3 Toxicología del Asbesto

Según la U.S. Department of Health and Human Services (2001) a través de la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades - ATSDR, menciona que las fibras de asbesto no se evaporan en el aire ni se disuelven en el agua. No obstante, parte de las fibras pueden entrar al aire y al agua desde la erosión de depósitos naturales y desgaste de productos de asbesto manufacturados. Las fibras de pequeño diámetro y las partículas que contienen fibras pueden permanecer suspendidas en el aire durante mucho tiempo y ser transportadas a largas distancias por el viento o las corrientes de agua antes de asentarse. Las fibras y partículas de mayor diámetro tienden a asentarse más rápidamente. Las fibras de asbesto no pueden moverse a través del suelo. Generalmente no se dividen en otros compuestos en el medio ambiente y permanecen prácticamente sin cambios durante largos períodos.

Cuando se inhalan estas fibras, pueden quedar atrapadas en los pulmones. Los niveles de fibras en el tejido pulmonar se acumulan con el tiempo, pero algunas fibras, en particular las fibras de crisótilo, pueden eliminarse o degradarse en el pulmón con el tiempo.

Una exposición corta a altos niveles de asbesto o la inhalación de altos niveles de fibra de asbesto por largo tiempo, pueden producir lesiones que aparecen como cicatrices en el pulmón y en la membrana que envuelve a los pulmones, la pleura.

El riesgo de que se presente una enfermedad asociada al asbesto está relacionado con:

- La concentración de las fibras presentes en el aire.
- La duración de la exposición y frecuencia de exposición.
- El tamaño de las fibras inhaladas.
- El tiempo transcurrido desde la exposición inicial.

Asimismo, indican que el aumento del riesgo para la salud no está relacionado con la cantidad de asbesto que contiene un producto. En general, las serpentinas presentan menor toxicidad que los anfíboles ya que respecto a los anfíboles, la amosita (asbesto marrón) presenta menor toxicidad que la Crocidolita (asbesto azul).

Los principales efectos sobre la salud derivados de la exposición al asbesto son: la asbestosis (fibrosis pulmonar), el cáncer de pulmón, el mesotelioma maligno (pleural o peritoneal) y las placas pleurales.

2.2.2.4 El Carácter Cancerígeno del Asbesto

Organismos internacionales, como la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC por sus siglas en inglés), de la Organización Mundial de la Salud (OMS), desde 1977 clasifica a los asbestos como cancerígenos.

Según IARC, desde 1987, todas las variedades de asbesto, incluido el Crisótilo, son clasificadas en la categoría I-a, esto es, comprobadamente cancerígenos para los seres humanos.

Para Stayner et al. (1997) en la investigación “Análisis de exposición-respuesta del riesgo de enfermedades respiratorias enfermedad asociada con la exposición ocupacional al asbesto

crisótilo”, explica la fuerte relación exposición-respuesta entre la exposición al asbesto crisótilo y la mortalidad por cáncer de pulmón y asbestosis. Las estimaciones de riesgo para el cáncer de pulmón derivados de este análisis son superiores a los derivados de otras poblaciones expuestos al asbesto crisótilo.

La Organización Internacional del Trabajo (OIT) considera al asbesto, incluido el Crisótilo, como el tóxico cancerígeno número 1 en el mundo del trabajo y sostiene la lucha contra la producción y la utilización del asbesto en el mundo (OIT Conferencia de Dresde, 2004). El año 2006, en la Nonagésima 5ta. Reunión Conferencia Internacional del Trabajo, Ginebra, adopta una Resolución sobre el Asbesto, que resuelve: a) la supresión del uso futuro del asbesto y la identificación y la gestión adecuada del asbesto instalado... *“b) no debería esgrimirse el Convenio sobre el asbesto, núm. 162;1986 para justificar o respaldar la continuación del uso del asbesto”*.

El Colegio Ramazzini (1999), Sociedad Académica Internacional, afirma la necesidad de una prohibición total de todas las formas de asbesto ya que la preponderancia de evidencia científica, hasta el momento, demuestra que el crisótilo también causa cáncer, incluyendo cáncer de pulmón y mesotelioma.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), En 2004, el cáncer de pulmón relacionado con el amianto, el mesotelioma y la asbestosis causados por exposiciones laborales dieron lugar a 107 000 muertes y 1 523 000 de años de vida ajustados por discapacidad. Además, miles de muertes pueden atribuirse a otras enfermedades relacionadas con el amianto, como así también a exposiciones a este material que no están relacionadas con el lugar de trabajo. (Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas, 2004)

Asimismo, la OMS indica que el uso de la crocidolita y los productos que contienen esta fibra, así como la pulverización de cualquier variedad de asbesto fue prohibido desde 1986, en

virtud del Convenio N°162 de la OIT que trata sobre utilización del asbesto en condiciones de seguridad. Sin embargo, el uso del crisótilo aún es muy amplio; aproximadamente el 90% de esta fibra se usa para fabricar materiales de fibrocemento para la construcción, cuyos principales consumidores son los países en desarrollo. El crisótilo también se utiliza en materiales de fricción (7%), textiles y otras aplicaciones.

En la comisión técnica multisectorial de la ley N.º 29662 realizada entre los años 2011 y 2015, mediante actas de reuniones, se aprobó el procedimiento de Acreditación del uso Regulado del Asbesto Crisótilo.

Sin embargo, según el Dr. médico cirujano Víctor Cuba Oré (2012), argumenta que la legislación peruana tanto la Ley como su reglamento tiene importantes limitaciones en el contexto de los avances internacionales para la prohibición de todos los tipos de asbestos. Tomando los argumentos contenidos en importantes pronunciamientos realizados por organismos como la Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud, el Colegio Médico del Perú y la Asociación Frente al Asbesto, se puede señalar que en la actual legislación:

- Se descarta el hecho de que el crisótilo es el principal asbesto utilizado mundialmente (más del 95%), siendo por tanto el principal responsable de los problemas de salud.
- Se desconoce que el único tipo de asbesto que se utiliza en el país es el crisótilo.
- No se considera la peligrosidad de la exposición al crisótilo, desconociéndose los estudios epidemiológicos existentes al respecto.
- No se toma en consideración la evidencia respecto a que el “control estricto” del crisótilo no es real en el trabajo industrial y mucho menos en situaciones no industriales, como lo señala la Organización Mundial del Comercio.

- No considera que el balance respecto del “uso controlado” del crisótilo en Europa y otros países, dejó un saldo de decenas de miles de muertos por año en la década del 2000 y que se pronostica llegará a centenas de miles de decesos en el 2025.
- Se desestima los avances internacionales en materia de prohibición del crisótilo realizados por otros países.
- Se considera relevante los Convenios y Acuerdos vinculantes suscritos por el Estado, para incluir el crisótilo en la lista de sustancias peligrosas.

2.2.2.5 Industria de Asbesto en Sudamérica

Virta (2006), describe que la industria del asbesto en América del Sur no comenzó a tener importancia en los mercados mundiales hasta la década de 1960. Antes de eso, había poca producción o consumo de asbesto.

Argentina, Brasil, Chile, Perú, Uruguay y Venezuela fueron los principales consumidores sudamericanos de asbesto durante el principio del siglo XX. En 1960, el consumo en Sudamérica tenía aproximadamente 38 100 t.

Para 1970, Argentina, Brasil y Colombia tenían más activo de las industrias de fabricación de asbesto en el Sudamérica. Aun así, se estimó que el consumo era solo 99 200 t.

Sin embargo, a mediados de la década de 1970, la producción brasileña tenía ampliado para satisfacer las demandas del país, y Brasil pronto se convirtió en el productor y consumidor sudamericano dominante de amianto. En 1980, Brasil representaba alrededor de 73 por ciento del uso de asbesto en el continente de 267 000 t. A Brasil le siguieron Colombia con 27 100 t, Argentina con 21 400 t y Venezuela con 9 100 t. Ecuador, Perú y Uruguay usó cantidades menores.

2.2.2.6 El Asbesto en el Perú

La Asociación Frente al Asbesto (AFA) menciona, que el asbesto inicia su presencia en el Perú en los años 1941-1942, mediante importación con la Fabrica Eternit antes FAPESA³.

Sotelo (1969), explica que la explotación de yacimientos en el Perú solo data de dos años (1985-87) en minas de Junín, Huancavelica y La Libertad. Sin embargo, el empleo del asbesto se fue incrementando mediante las importaciones durante el siglo 20, tanto del grupo anfíbol como crisótilo. El empleo de los asbestos inicialmente se dirige a la fabricación industrial de todo tipo de productos de cemento-asbesto, como planchas planas y onduladas para techos, tubos para la canalización de los sistemas de agua y desagüe; posteriormente se crea una línea de producción de cartones con asbesto para paneles aislantes en paredes y techos. Al pasar de los años, se van incorporando al mercado la creación de nuevas empresas que procesan amianto para fabricar productos de fricción (zapatas, discos de embrague), pisos de vinilo, textiles (sogas, y telas.)

El Ministerio de Salud en su Programa Presupuestal 0024: Prevención y control del cáncer (2021), explica la mortalidad del cáncer pulmonar, mesotelioma y asbestosis debidos a la exposición ocupacional al asbesto. Una de cada tres muertes por cáncer ocupacional se debe a este producto, y en Perú la segunda causa de mortalidad es por las enfermedades neoplásicas. Según datos del MINSA, el cáncer con mayor mortalidad relacionado a la inhalación de fibras de asbesto es el cáncer de pulmón; ocupando el quinto lugar de un ranking de veintidós tipos de cáncer (elaborado en el 2016).

Virta (2009); a través del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), brinda la información estadística de sobre la oferta y la demanda del consumo de asbesto

³ FAPESA: Fabrica Peruana ETERNIT SA

en el mundo. En la Tabla 5 y la Figura 8 se muestra la estadística sobre la importación de asbesto en el Perú desde 1950 a 2007.

Tabla 5

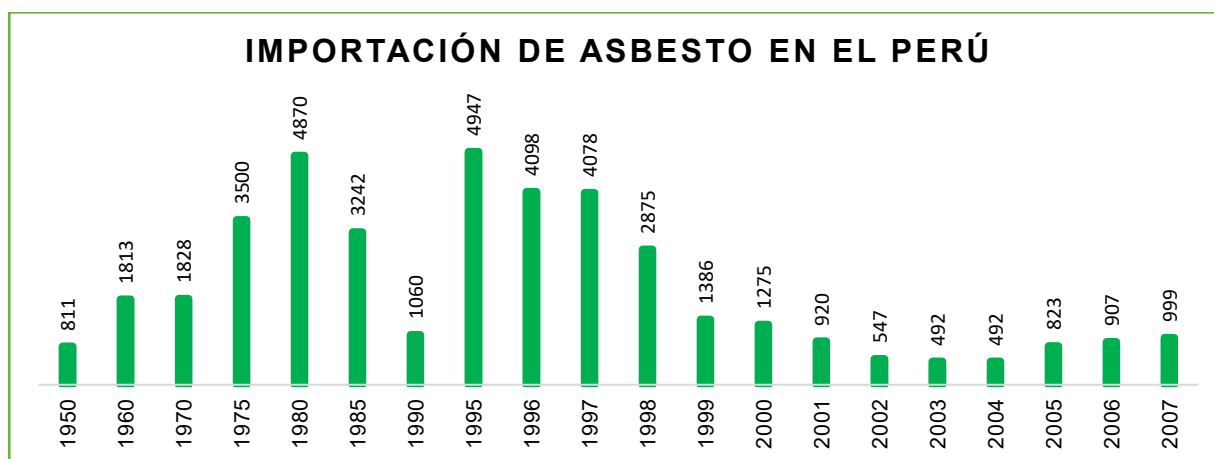
Importación del asbesto en el Perú 1950 - 2007

Años	Toneladas Métricas TM importadas
1950	811
1960	1813
1970	1828
1975	3500
1980	4870
1985	3242
1990	1060
1995	4947
1996	4098
1997	4078
1998	2875
1999	1386
2000	1275
2001	920
2002	547
2003	492
2004	492
2005	823
2006	907
2007	999

Nota. Fuente: USGS (United States Geological Survey), Virta 2009.

Figura 8

Importación del asbesto en el Perú 1950 – 2007



Nota: Unidad: Toneladas métricas. Fuente: USGS (United States Geological Survey), Virta

2009. Elaboración propia

2.3 Definición de Términos

Asbestosis

Es una forma de fibrosis pulmonar intersticial causada por la exposición al asbesto.

Fibrocimiento

El fibrocemento es un material de construcción compuesto por cemento, agua y fibras. Es un material fuerte y versátil que se puede utilizar en una amplia gama de aplicaciones.

Radiancia

La radiancia representa la cantidad de energía electromagnética que una superficie emite, refleja o transmite en cada longitud de onda. Es una medida cuantitativa de la intensidad de la radiación electromagnética en diferentes longitudes de onda, expresada típicamente en vatios por metro cuadrado por estereorradián por micrómetro ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$).

Reflectancia

Medida de la cantidad de radiación electromagnética que es reflejada por una superficie en comparación con la radiación incidente. Se expresa como una fracción o porcentaje de la radiación incidente y es fundamental para comprender las características espectrales de los materiales en la escena observada. La reflectancia es una propiedad importante para el análisis de imágenes satelitales, ya que proporciona información sobre la composición y las propiedades físicas de la superficie terrestre.

Compilación de Bandas

Se refiere a la combinación de varias bandas espectrales de una imagen para formar una imagen multiespectral o hiperespectral, cada banda representa información en una longitud de onda específica del espectro electromagnético al apilar o compilar estas bandas, se crea una imagen que contiene información variada sobre la superficie terrestre, el cual es utilizado para mejorar la

capacidad de discriminación y análisis de características en la imagen mediante la combinación de información de diferentes longitudes de onda.

Espectrorradiómetro

Es un instrumento utilizado en teledetección y en estudios científicos para medir la radiancia espectral de objetos o superficies en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético. Este dispositivo proporciona información detallada sobre la intensidad de la radiación electromagnética emitida, reflejada o transmitida por un objeto en función de su longitud de onda. El espectrorradiómetro divide la radiación en diferentes bandas espectrales y mide la energía en cada una de estas bandas. Esto permite obtener firmas espectrales, que son patrones únicos de radiación en función de la longitud de onda.

Subpíxel

Es la información detallada sobre diferentes materiales o características presentes dentro de un solo píxel de una imagen digital, especialmente en imágenes hiperespectrales o multiespectrales. Aquí, el concepto se amplía para abordar cómo se utiliza la información espectral para identificar y caracterizar materiales que pueden ocupar una fracción del área de un píxel individual.

2.4 Marco Normativo

2.4.1. Normas Nacionales

La Constitución Política del Perú (1993), en el Artículo 7, garantiza el derecho de todas las personas a la protección de su salud, así como la de su entorno familiar y comunitario. Además, el Artículo 67 establece que el Estado define la Política Nacional Ambiental, estableciendo el marco legal para la protección de la salud humana y la prevención de agentes contaminantes.

El Reglamento de Prevención y Control del Cáncer Profesional, Presidencia del Consejo de Ministros (1993), aprobado con el Decreto Supremo N.º 093-93-PCM, el objetivo de esta normativa es establecer lineamientos que salvaguarden la salud y seguridad de los trabajadores frente a riesgos derivados de la exposición ocupacional a agentes con potencial cancerígeno. En el Anexo B se identifica al asbesto como sustancia peligrosa de carácter cancerígeno, señalando la necesidad de implementar acciones preventivas y controles que restrinjan al mínimo su contacto.

Ley General de Residuos Sólidos, Congreso de la República del Perú (2000), aprobada con la Ley N.º 27314, la finalidad de esta disposición es definir los derechos, deberes, competencias y responsabilidades de todos los actores sociales, con el propósito de garantizar una gestión integral y un manejo de los residuos sólidos que cumpla criterios sanitarios y ambientales adecuados. Todo ello se desarrolla conforme a los principios de reducción en la generación de residuos, prevención de impactos ambientales y resguardo de la salud y el bienestar de la población.

El Reglamento de la Ley General de Residuos Sólidos, Presidencia de Consejo de Ministros (2004), aprobado con el Decreto Supremo N.º 057-2004-PCM, con el propósito de garantizar la gestión y el tratamiento de los residuos sólidos se realicen de manera adecuada, a fin de evitar riesgos para la salud pública, preservar y mejorar la calidad ambiental, y salvaguardar el

bienestar de la población. En la Lista A, se clasifica como residuo peligroso al asbesto o amianto, tanto en forma de polvo como de fibras (Anexo 4, numeral A2.5).

El Reglamento sobre Valores límites Permisibles para Agentes Químicos en el ambiente de Trabajo, del Ministerio de Salud (2005), aprobado con el Decreto Supremo N.º 015-2005-SA, tiene por objetivo establecer los valores límite permisible orientados a proteger la salud de los trabajadores de cualquier actividad ocupacional, así como la de su descendencia, mediante la medición cuantitativa y el control de los riesgos asociados principalmente a la inhalación de agentes químicos presentes en el entorno laboral. En el Anexo II, referido a los valores límite permisibles para agentes químicos cancerígenos en el ambiente de trabajo, se especifica que el amianto (asbesto), en todas sus variedades, presenta un límite máximo de 0.1 fib/cc.

La Norma Técnica de Salud que aprueba el Listado de Enfermedades Profesionales mediante Resolución Ministerial N.º 480-2008-MINSA (2008), incluye en su Anexo I, al cuarto grupo, referido a las enfermedades profesionales causadas por inhalación de sustancias el detalla que el agente polvo de amianto (asbesto), se relaciona con asbestosis, afecciones fibrosantes de la pleura y pericardio que cursan con restricción respiratoria o cardíaca provocada por amianto. Asimismo, en el sexto grupo, denominado enfermedades profesionales causadas por agentes carcinogénicos, se indica que el amianto está vinculado con las neoplasias malignas de laringe, bronquio, pulmón, así como mesoteliomas de pleura, peritoneo y otras localizaciones.

La Ley N.º 29662 (2011), establece la prohibición del asbesto anfíboles y regula el uso del asbesto crisótilo, en el territorio nacional. En cumplimiento a la norma, se prohíbe la posesión, exportación, importación, elaboración, distribución, producción y transferencia, ya sea a título gratuito o remunerado a todas las variedades de fibras de asbesto anfíbol, incluyendo crocidolita, actinolita, amosita, antofilita y tremolita, así como otras variantes y de los productos que las

contengan. Además, la Ley establece la regulación de las actividades vinculadas con el asbesto crisótilo, abarcando su explotación, importación, manufactura, distribución, elaboración, y comercialización, a estas operaciones, que involucran fibras de silicatos minerales pertenecientes al grupo de rocas metamórficas serpentinas denominadas también crisótilo o asbesto blanco y los productos que las incorporen, están sujetas a un régimen de control estricto y permanente, conforme a lo establecido en la Ley y su reglamento, el cual fue aprobado por el Ministerio de Salud (2014) mediante el Decreto Supremo N.º 028-2014-SA.

El Reglamento de Gestión y Manejo de los Residuos de las Actividades de la Construcción y Demolición, aprobado mediante el Decreto Supremo N.º 003-2013-Vivienda por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2013). Tiene por finalidad establecer los lineamientos para la gestión y el manejo de los residuos sólidos generados en procesos de construcción y demolición, con el propósito de minimizar impactos ambientales, prevenir riesgos para la salud, salvaguardar el bienestar humano y promover el desarrollo sostenible. En su Anexo III, referido a los Residuos sólidos peligrosos de la construcción y demolición, se incluyen, entre otros, los desechos provenientes de planchas de fibrocemento con asbesto, pisos de vinilasbesto y paneles divisores con asbesto, clasificados como peligrosos por su toxicidad y carácter cancerígeno.

El Reglamento de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos N.º 1278. Aprobado mediante Decreto Supremo N.º 014-2017-MINAM por el Ministerio del Ambiente. (2017). tiene como finalidad asegurar optimizar de manera continua la eficiencia en el uso de materiales, y también regular la gestión y el manejo de residuos sólidos, sus lineamientos abarcan desde la minimización de la generación de los residuos en la fuente, la valorización material y energética, la disposición final segura y la sostenibilidad de los servicios de limpieza pública. Los residuos de

amianto en polvo y fibras se consideran como peligroso según el Anexo III denominado Lista A: Residuos Peligrosos, con el código A2050.

2.4.2. Acuerdos Internacionales

El Convenio número 162 de la Organización Internacional del Trabajo - OIT (1986) establece, en su artículo 11 menciona: *“la prohibición del uso de la crocidolita y de la pulverización de cualquier forma de asbesto”* y en el artículo 12: *“deberá prohibirse la pulverización de todas las formas de asbesto”*.

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 1992), mediante el Convenio de Basilea, incluye en su clasificación a los desechos de amianto en forma de polvo o fibras, identificados con el código A2050. Estos residuos están sujetos a un régimen de control estricto que regula los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos y su eliminación. El objetivo principal de esta normativa es proteger la salud humana y el ambiente frente a los impactos negativos asociados a la generación, transporte internacional y manejo de dichos residuos.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2023) a través del Convenio de Rotterdam: Sobre el procedimiento de consentimiento fundamentado previo aplicable a ciertos Plaguicidas y productos químicos peligrosos objeto de comercio internacional, tiene como finalidad principal proteger la salud humana y el ambiente frente a los riesgos del comercio internacional de plaguicidas y productos químicos peligrosos, promoviendo la responsabilidad compartida y el uso ambientalmente racional de dichas sustancias mediante el intercambio de información y la adopción de decisiones informadas sobre su importación y exportación. En relación con el asbesto, el convenio reconoce como altamente peligrosas las variedades amosita, actinolita, antofilita, crocidolita y tremolita, incluidas en el Anexo III por su vínculo con enfermedades como la asbestosis, el mesotelioma y el cáncer de

pulmón; no obstante, el crisótilo o asbesto blanco, que aún representa la mayor parte del consumo mundial y está asociado a más de 255,000 muertes anuales por patologías relacionadas, no ha sido incorporado debido a la falta de consenso entre los Estados parte, lo que refleja una limitación en la efectividad del Convenio.

En la Asamblea de la Organización Mundial de la Salud (2006), sobre la eliminación de enfermedades asociadas al amianto, estableció que todas las formas de asbesto representan un riesgo significativo para la salud humana, ya que su inhalación está asociada con el desarrollo de cáncer de pulmón, mesotelioma y otras enfermedades respiratorias crónicas. El Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (IARC) clasificó tanto al crisótilo como a las variedades anfíboles (amosita, crocidolita, tremolita, actinolita y antofilita) dentro del Grupo 1 de agentes carcinógenos para los humanos. La evidencia científica indica que la exposición ocupacional y ambiental al asbesto, incluso en niveles bajos, incrementa de manera sustancial el riesgo de morbilidad y mortalidad, no solo en trabajadores directamente expuestos, sino también en poblaciones cercanas a minas, plantas de procesamiento y en convivientes de trabajadores que manipulan fibras minerales. Ante esta situación, la OMS promueve la eliminación progresiva del uso del asbesto como la medida más eficaz para prevenir enfermedades relacionadas con su exposición.

CAPÍTULO III

3. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis General

La aplicación de una metodología basada en técnicas de teledetección permite identificar y analizar la distribución geográfica del asbesto en techos del área industrial y urbana de la margen izquierda del río Rímac, distrito de Lima, con un nivel adecuado de precisión espacial.

3.2 Hipótesis Específica

Las imágenes satelitales WorldView-3 permiten identificar el asbesto en techos en el área industrial y urbana del distrito de Lima, debido a su alta resolución espectral.

La aplicación de técnicas de teledetección presenta una relación significativa con la identificación del asbesto en techos en el área de estudio.

La distribución espacial permite identificar y cuantificar la cobertura de techos con asbesto en el área industrial y urbana del distrito de Lima.

3.3 Identificación de Variables

3.3.1. Variable Independiente

La variable independiente, **“Técnicas de teledetección”**, se define como los procesos y métodos que se utilizaron para identificar la presencia de asbesto en techos. Estas variables se obtuvieron mediante la selección y aplicación de diversas técnicas, que abarcan desde el uso de diferentes tipos de imágenes satelitales hasta procesamiento de medición de firmas espectrales y métodos específicos identificación de coberturas.

3.3.2. Variable Dependiente

La variable dependiente, **“Identificación de Asbesto en techos”**, se define como el resultado obtenido mediante la aplicación de las técnicas de teledetección, el cual busca determinar

la presencia o ausencia de asbesto en los techos de fibrocemento en la zona de estudio, evaluando así la efectividad de las técnicas empleadas en este proceso de identificación.

3.4 Operacionalización de variables

VARIABLE (Independiente)	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Técnicas de teledetección	Estas técnicas permiten identificar coberturas a través de la adquisición de datos de la superficie terrestre mediante sensores instalados en plataformas espaciales	Plataforma Satelital	Misión Satélite WorldView-3(óptico, SWIR) Misión Satélite Sentinel-2 (óptico) Misión Satélite Alos Palsar (radar) Resoluciones de la imagen satelital Correcciones de la imagen satelital
		Tratamiento digital de imágenes	Elaboración de Máscaras Índices Espectrales Firmas Espectrales Método Supervisado Método No Supervisado Método Mixto Método Reloj de Arena
Identificación de Asbesto en techos	La identificación de asbesto en techos está en función de las técnicas de teledetección.	Mineralogía Asbesto	Tipo Serpentin Tipo Anfiboles
		Toxicología del Asbesto	El Carácter Cancerígeno del Asbesto

3.5 Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS	VARIABLE INDEPENDIENTE
¿Se podrá desarrollar una metodología para identificar la distribución geográfica de asbesto en techos mediante técnicas de teledetección, en el área industrial y urbana del distrito de Lima?	Desarrollar una metodología mediante técnicas de teledetección que permita identificar la distribución geográfica del asbesto en techos, en el área industrial y urbana del distrito de Lima.	La aplicación de una metodología basada en técnicas de teledetección permite identificar y analizar la distribución geográfica del asbesto en techos del área industrial y urbana de la margen izquierda del río Rímac, distrito de Lima, con un nivel adecuado de precisión espacial.	Técnicas de teledetección
PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPÓTESIS ESPECIFICA	VARIABLE DEPENDIENTE
¿Qué tipo de imágenes satelitales, nos permitirán identificar asbesto en techos en el área industrial y urbana del distrito de Lima?	Determinar el tipo de imagen satelital que nos permita identificar asbesto en techos en el área industrial y urbana del distrito de Lima	Las imágenes satelitales WorldView-3 permiten identificar el asbesto en techos en el área industrial y urbana del distrito de Lima, debido a su alta resolución espectral.	
¿Cómo se relacionan las técnicas de teledetección con la identificación del asbesto en techos en el área industrial y urbana del distrito de Lima?	Demostrar la relación de las técnicas de teledetección con la identificación del asbesto en techos en el área industrial y urbana del distrito de Lima.	La aplicación de técnicas de teledetección presenta una relación significativa con la identificación del asbesto en techos en el área de estudio.	Identificación de Asbesto en techos
¿Cómo se distribuye espacialmente el asbesto en el área industrial y urbana del distrito de Lima?	Identificar la distribución espacial del asbesto en el área industrial y urbana del distrito de Lima para futuras evaluaciones.	La distribución espacial permite identificar y cuantificar la cobertura de techos con asbesto en el área industrial y urbana del distrito de Lima.	

CAPÍTULO IV

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Área de estudio.

4.1.1. Consideraciones Cartográficas

4.1.1.1 Sistema de Referencia Espacial

Para el desarrollo de la tesis, se adoptó el Sistema Geodésico Mundial 1984 (*World Geodetic System 1984, WGS 1984*) como sistema de referencia espacial. La proyección cartográfica utilizada corresponde a la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM), específicamente en la zona 18 Sur, definida como WGS 1984 UTM Zona 18S, en conforme a la normativa oficial establecida.

El estado peruano a través del Instituto Geográfico Nacional (IGN) constituye el Marco de Referencia Geodésico Oficial a la Red Geodésica Peruana de Monitoreo Continuo (REGPMOC), conformada por el sistema de estaciones de rastreo permanente (GNSS) administrada por el IGN. Esta red de infraestructura geodésica materializa el Sistema Geodésico Horizontal Oficial, basado en el Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS) el cual se fundamenta en el Marco Internacional de Referencia Terrestre 2 000 (ITRF2000, por sus siglas en inglés) del International Earth Rotation Service (IERS, por siglas en inglés) para la época 2000.4 relacionado con el elipsoide del Sistema de Referencia Geodésico 1980 (GRS80).

Para fines prácticos y operativos se emplea el elipsoide World Geodetic System 1984 (WGS84). Este Marco de Referencia Geodésico oficial, sirve como base de toda la información geoespacial que se genera en el país, ya sea por métodos directos o indirectos conforme a la Resolución Jefatural N.º 087-2020/IGN/DIG/SDNGC. Los parámetros cartográficos utilizados se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6*Parámetros Cartográficos*

Parámetros Cartográficos	
Proyección	Transversal de Mercator
Falso Este	500 000.0 m
Falso Norte	10 000 000.0 m
Meridiano Central	-75.0 °
Factor de Escala	0.9996
Latitud de Origen	0
Unidad lineal	Metro (1.0)
Datum	World Geodetic System 1984 - WGS-84.
Primer Meridiano	Greenwich (0.0)
Elipsoide:	World Geodetic System 1984 - WGS-84.
Semieje Mayor	6 378 137.0 m.
Semieje Menor	6 356 752.31424517 m.
Aplanamiento inverso	298.257223563

Nota. Fuente: IGN. RJ N° 087-2020/IGN/DIG/SDNGC

4.1.1.2 Escala Cartográfica

La escala utilizada se adapta a la variable dependiente de nuestra investigación, que es la identificación de techos de fibrocemento con asbesto. Dado que estos techos pueden cubrir áreas extensas como lotes o manzanas, se requiere una escala que permita la identificación de esta cobertura. Esta escala se determinó en función del tamaño de píxel de la imagen satelital WorldView-3 SWIR, que es de 7.5 metros. Cada píxel representa un área de 56.25 metros cuadrados, por lo que se priorizará el análisis de techos mayores a estos en las zonas industriales. La escala de estudio se calculó utilizando la regla de Tobler (1987), que consiste en multiplicar la resolución del píxel por 2 y luego por 1 000, resultando en una escala de 1:15 000.

$$\text{Escala del Mapa} = \text{Resolución del Ráster (en metros)} * 2 * 1\,000$$

$$\text{Escala del Mapa} = 7.5 \text{ m} \times 2 \times 1\,000$$

$$\text{Escala del Mapa} = 1:15\,000$$

4.1.2. Ubicación

El área de estudio se ubica en el distrito de Lima (ubigeo 150101), provincia de Lima, departamento de Lima. Formando un polígono que toma como referencia el límite norte con la Av. Enrique Meiggs, por el sur con la Av. Oscar R. Benavides (ex Colonial), por el este con la Av. Alfonso Ugarte y por el oeste con la Av. Universitaria, como lo indica la Figura 9 y la Figura 10 (Ver anexo de mapas: M1_US_10M y M2_U_10M). Tiene una superficie total de 364.4 hectáreas (3.644 km²), con un perímetro de 9.65 Km.

La zona de estudio se caracteriza por un relieve predominantemente plano, con una pendiente media del 2% orientada hacia el oeste, alcanzando una altitud máxima de 136 m.s.n.m. y una mínima de 76 m.s.n.m.

Figura 9

Área de estudio vista satelital.



Nota. Fuente: ESRI (Mapa base ArcGIS). Elaboración propia

Figura 10

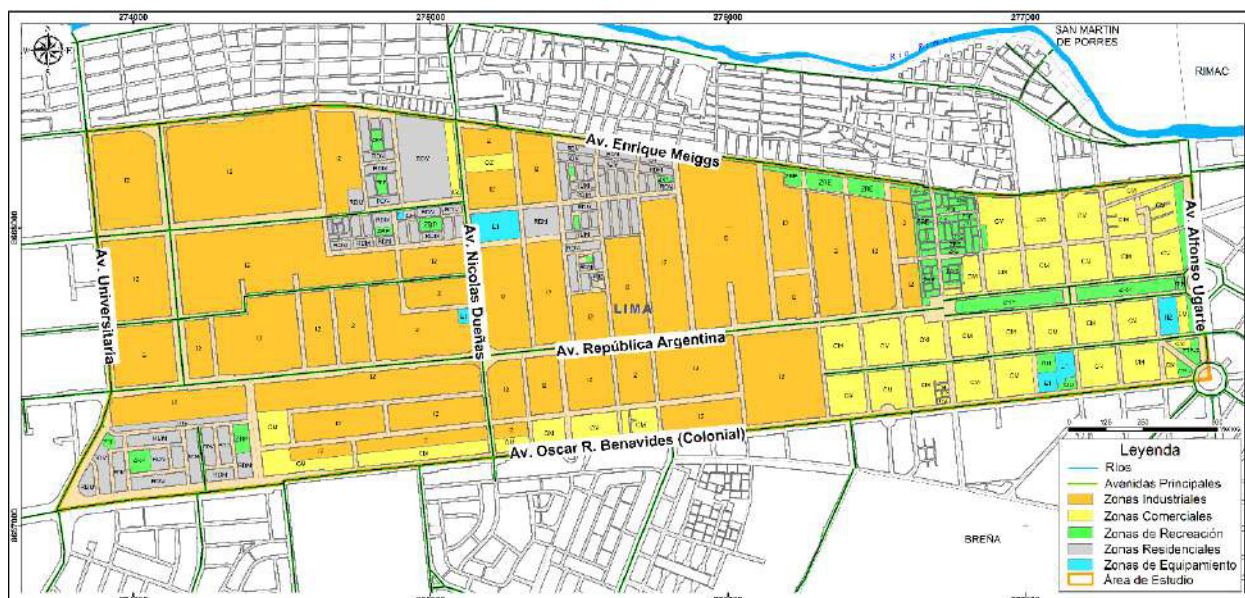
Área de estudio vista Ortofoto Lima 2012.



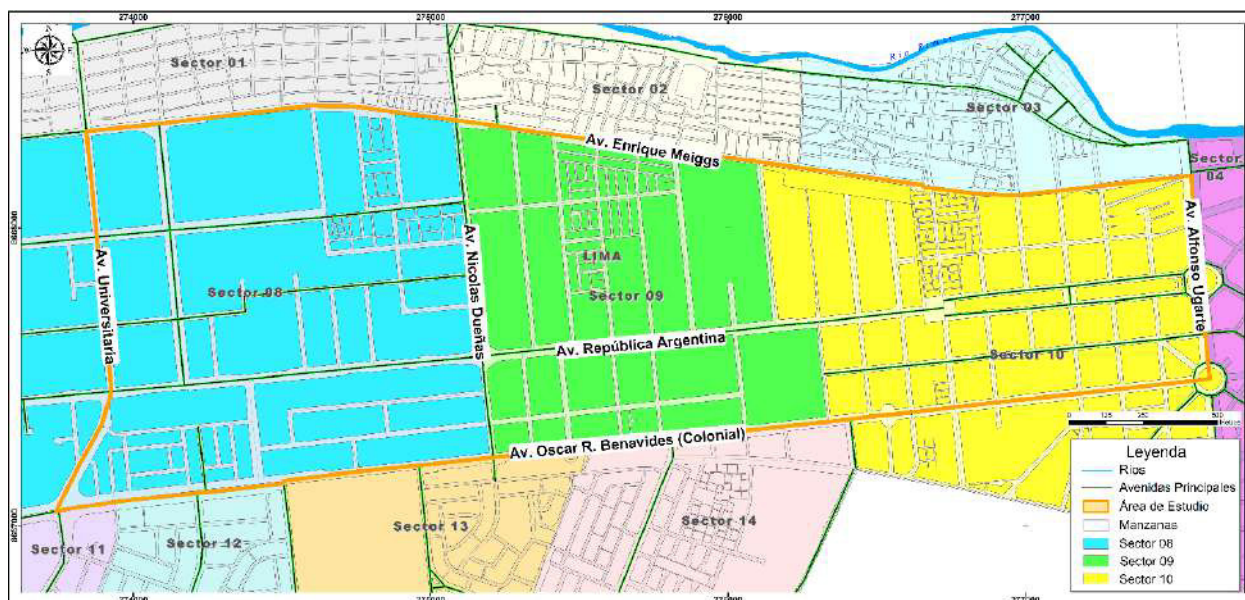
Nota. Fuente: IGN, ICL. Elaboración propia

4.1.3. Zonificación y Sector Catastral

El área de estudio tiene Zonificación Industrial elemental y complementaria (I1) e Industria Liviana (I2); y otras zonas de menor superficie que se detalla a continuación: la zona Comercio Metropolitano (CM), Zona Residencial de Densidad Media (RDM), Comercio Zonal (CZ), Zona de Equipamiento Educación Básica (E1), Zona de equipamiento Centro de Salud (H2), Zona de Reglamentación Especial (ZRE), Zona de Recreación Pública, Zona de Tratamiento Espacial 2 (ZTE-2) y Zona de Otros Usos (OU), ver Figura 11. El área de estudio se ubica dentro de los sectores catastrales 08, 09 y 10 de la municipalidad de Lima, Figura 12 (Ver anexo de mapas: M3_S_10M y M4_Z_10M).

Figura 11*Zonificación*

Nota. Fuente: IGN, ICL. Elaboración propia

Figura 12*Sectores Catastrales Lima*

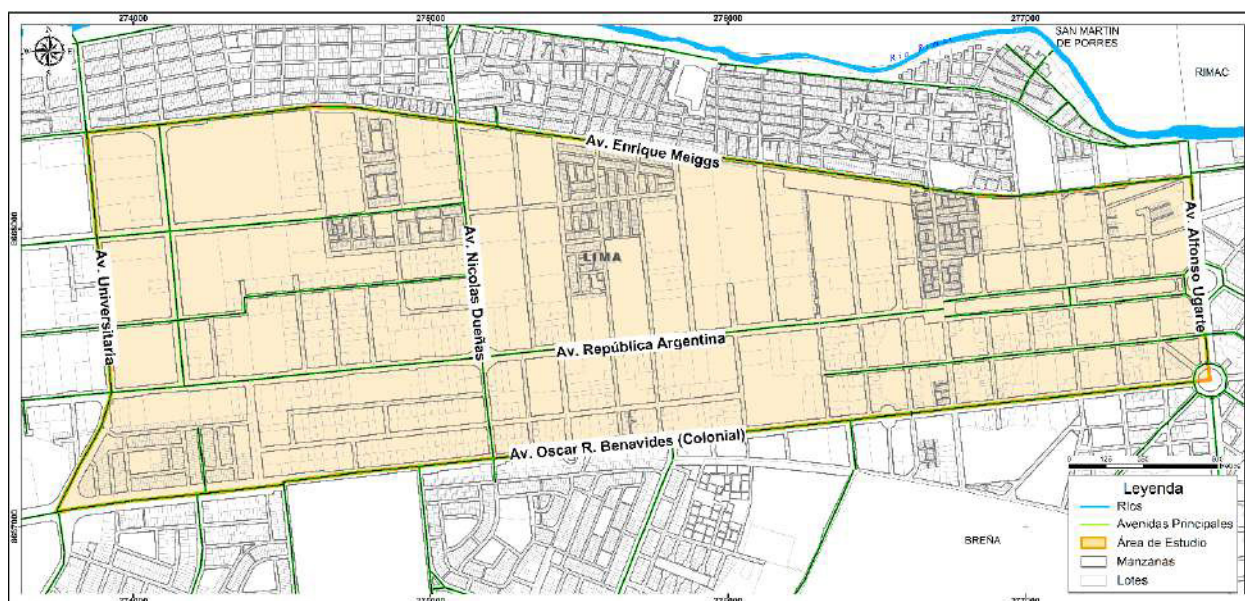
Nota. Fuente: IGN, ICL. Elaboración propia

4.1.4. Manzanas, Lotes y vías Urbanas

El área de estudio comprende un total de 215 manzanas, 4022 lotes; ubicados en los sectores catastrales 08, 09 y 10. (ICL,2012), como se muestran en la Figura 13 y 14 (Ver anexo de mapas: M5_MZ_10M y M6_V_10M).

Figura 13

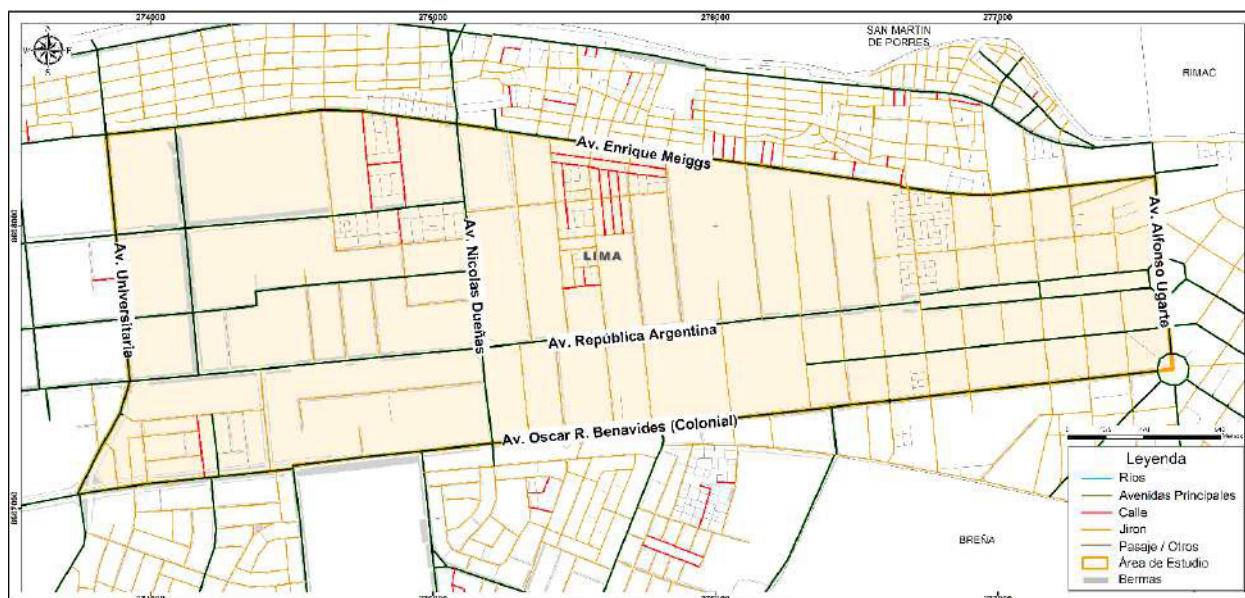
Manzanas y Lotes Catastrales Lima



Nota. Fuente: IGN, ICL. Elaboración propia

Figura 14

Vías Urbanas



Nota. Fuente: IGN, ICL. Elaboración propia

4.2 Diseño de investigación

4.2.1. Tipo de investigación

La investigación corresponde al tipo de investigación aplicada debido a sus propósitos prácticos inmediatos y bien definidos. En ese marco, esta investigación ejecuta las técnicas de teledetección, para desarrollar una metodología que permita identificar el asbesto en techos dentro del área de estudio, mediante la transformación y modificación los datos satelitales para lograr su identificación. Además, esta investigación se fundamenta en teorías científicas derivadas de investigaciones básicas y sustantivas, complementándose con técnicas utilizadas por el Laboratorio de Teledetección del INGEMMET.

4.2.2. Nivel de Investigación

La investigación corresponde al nivel de investigación descriptiva, pues se orienta a detallar las características, cualidades y propiedades de los fenómenos estudiados en un contexto y período específico. Este nivel de investigación permite desarrollar los parámetros para elaborar una metodología que permita identificar la presencia de asbesto en los techos de fibrocemento mediante técnicas de teledetección, en el área de estudio, centrándose en dar respuesta a su descripción espectral, su ubicación, cobertura y en la cuantificación de los lotes afectados.

4.2.3. Diseño de Investigación

El diseño de la investigación de la tesis corresponde al diseño de investigación no experimental, caracterizado por observar los fenómenos en su contexto natural sin manipular deliberadamente variables, así las variables independientes ocurren sin posibilidad de intervención. La investigación no experimental es sistemática y empírica, permitiendo inferencias sobre las relaciones entre variables sin influencia directa, observando estas relaciones tal como se han manifestado en su entorno natural. A su vez el diseño de investigación no experimental se

subdivide en transversal, por recolectar los datos es decir en un tiempo determinado tomados por el satélite en momento determinado y por los datos obtenidos al medir la firma espectral de la muestra, y descriptivo por analizar y conocer las características, rasgos y propiedades de la realidad en un momento determinado de tiempo la presencia de asbesto mediante técnicas de teledetección.

4.2.4. Enfoque de investigación

De acuerdo con Hernández Sampieri, R., Mendoza Torres C. (2018), se realizó un enfoque de investigación cuantitativo, el cual se define por centrarse en la recolección y el análisis de datos numéricos, además, es un conjunto de procesos que se desarrolla de manera secuencial y probatoria, cada etapa precede a la siguiente, el orden es riguroso, aunque luego se puede redefinir alguna fase. El proceso inicia con una idea general que se va delimitando progresivamente hasta definir objetivos y preguntas de investigación. Posteriormente, se revisa la literatura existente y se formula el marco teórico. A partir de las preguntas se plantean hipótesis y se identifican las variables, las cuales se miden en un contexto específico. Con los datos recolectados se aplican métodos estadísticos para su análisis y, finalmente, se obtienen conclusiones relacionadas con las hipótesis propuestas.

4.3 Población y Muestra

La población se define como el conjunto total de unidades o elementos que comparten una característica común y son objeto de estudio, mientras que la muestra corresponde a un subgrupo representativo de esta población del cual se recolectan los datos necesarios para llevar a cabo la investigación. Esta muestra debe ser representativa para garantizar la validez y fiabilidad de los resultados obtenidos, y es utilizada para realizar observaciones, mediciones y análisis, según lo establecido por el Dr. Roberto Hernández Sampieri (2014).

La unidad de muestreo se estableció como los lotes en el área de estudio con el objetivo de identificar la presencia de asbesto en techos, y el límite de la población como los lotes que se encuentran en el área de estudio, de acuerdo con el catastro actualizado por el Instituto Catastral de Lima (ICL) al 30 de marzo del 2016, como se muestra en la Figura 15. (Ver anexo de mapas: M16_PM_25M)

Se estableció la población como los lotes dentro del área de estudio y la muestra a los lotes industriales con una extensión mayor a 4,000 m².

Se optó por una muestra no probabilística debido a las limitaciones de resolución espacial, considerando el tamaño del píxel en el contexto de una investigación de teledetección, teniendo en cuenta la resolución de imagen más alta disponible, de 20 metros por píxel. Así, se determinó que el análisis espacial y espectral mínimo requería agrupaciones de al menos 4 píxeles, lo que equivale a un área total de más de 4,000 m². En la Tabla 6 se tiene un resumen cuantificado del número total de lotes y las extensiones de la superficie de la Población y Muestra además del análisis porcentual de la muestra en función de la población.

Tabla 7

Población y Muestra

	Número Lotes	Área m2	Área Km2	%Lotes	%Área
Población	4 022	2 813.228	2.81	100	100
Muestra	96	1 323.298	1.32	2	47

Nota. Fuente: ICL. Elaboración Propia

Figura 15

Mapa de Población y Muestra

Nota. Fuente: ICL. Elaboración Propia

4.4 Procedimiento, técnicas e instrumentos de recolección de información

4.4.1. Materiales

4.4.1.1 Muestra de techo con Asbesto

La muestra de techo compuesta de fibrocemento con asbesto se representa en la Foto 1, fue proporcionada por la empresa Klepel Consulting y obtenida mediante un proceso de remoción realizado en una fábrica ubicada en Punta Pejerrey Paracas – Ica. La presencia de fibras de asbesto fue verificada mediante análisis microscópico de luz polarizada, efectuado en los laboratorios de Carbotech AG⁴ en Zúrich, Suiza.

Foto 1

Muestra de Techo con Asbesto



Nota. Foto de los autores

⁴ Carbotech AG. es una empresa líder en consultoría en el campo de: consultoría medioambiental y de sostenibilidad (incluidos análisis de ciclo de vida, análisis de flujo de materiales y energía, informes, etc.); Asbesto, PCB y otros contaminantes y descontaminación. (Carbotech, 1987).

4.4.1.2 Materiales de Seguridad

Para la conservación y manipulación de la muestra de techo de fibrocemento con asbesto se utilizaron los siguientes materiales de seguridad:

- Bolsa conservadora Ziploc
- Mascarillas KN95
- Guantes quirúrgicos

4.4.1.3 Equipo de Medición Espectral

Para la medición de la muestra en laboratorio se empleó el espectrorradiómetro FieldSpec 4 Hi-Res. Este equipo, diseñado para aplicaciones en teledetección, permite la adquisición de espectros de reflectancia en las regiones del visible e infrarrojo cercano (VNIR, por sus siglas en inglés) y del infrarrojo de onda corta (SWIR, por sus siglas en inglés), conforme a las especificaciones que se detallan en la Tabla 7.

Tabla 8

FieldSpec 4 Hi-Res

Características		
	Rango espectral	350-2 500 nm
	Resolución espectral	3 nm - 700 nm
	Intervalo de captura	1.4 nm - 350-1 050 nm
		8 nm – 1 400/2 100 nm
		2 nm – 1 000/2 500 nm
	Tiempo de escaneo	100 milisegundos
Canales Espectrales		2151
Peso		12 lb

FieldSpec 4 Hi-Res

Nota. Elaboración propia

4.4.2. Software y Hardware

Se utilizaron programas informáticos para el tratamiento digital de las imágenes satelitales, los cuales son los siguientes:

- PCI Geomática para realizar el proceso de ortorrectificación
- ENVI 5.3 para el análisis espacial y posterior clasificación
- Arcgis 10.8 para la elaboración de los mapas temáticos y cartografía
- Microsoft Excel, Word y PowerPoint.
- En cuanto al Hardware se procesó la información con una computadora Intel(R) Core (TM) i5-9400F CPU @ 2.90GHz, con 32.0 GB de memoria RAM, Sistema operativo de 64 bits, tarjeta de Video NVIDIA GeForce GTX 1050 TI, y 1 terabyte de disco duro.

4.4.3. Inversión de la investigación

La elaboración de la presente investigación requirió recursos económicos destinados a la adquisición de una imagen satelital WorldView-3 SWIR, a través de la empresa Geomática Soluciones, por un monto de USD 776.25 (sin IGV). Además, se hizo la cotización del análisis de una muestra de fibrocemento que certifica la presencia de asbesto, cuyo costo es de USD 488.00 (sin IGV), los cuales se detallan en los Anexos.

Las mediciones de firmas espectrales, el uso de equipos especializados y el procesamiento de datos se realizaron mediante convenio con el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), por lo que no generaron costos adicionales.

4.4.4. Datos Geográficos

Para el procesamiento digital de imágenes, se utilizaron dos representaciones de datos geográficos: datos vectoriales y datos ráster los cuales se detallan a continuación:

4.4.4.1 Datos Vectoriales

Los datos vectoriales se refieren a información geográfica representada por entidades o elementos definidos por coordenadas espaciales. Estos datos describen características geográficas y atributos asociados con puntos, líneas o polígonos en un marco de referencia geográfico.

A continuación, se detalla la lista de datos vectoriales que ha sido necesario para la elaboración de la tesis. (Ver Tabla 9)

Tabla 9

Datos Vectoriales utilizados para la elaboración de la Tesis

Nombre de la Capa	Tipo	Fuente
Límite Departamental	Polígono	ICL
Límite Provincial	Polígono	ICL
Límite Distrital	Polígono	ICL
Centros Poblados	Punto	ICL
Vías Cercado	Línea	ICL
Manzana	Polígono	ICL
Lote	Polígono	ICL
Zonificación	Polígono	ICL
Área Estudio	Polígono	Propia

Nota. Elaboración propia

4.4.4.2 Datos Ráster

Los datos ráster se refieren a imágenes digitales que representan la superficie terrestre como una matriz de celdas o píxeles, donde cada píxel tiene un valor asociado que corresponde a una propiedad física, espectral o fenomenológica de la superficie observada. Estos datos ráster son adecuados para representar fenómenos continuos, como la reflectancia espectral de diferentes superficies terrestres, la temperatura de la superficie, la elevación del terreno, entre otros. Los datos

ráster son ampliamente utilizados en teledetección para realizar análisis espaciales, procesamiento de imágenes y extracción de información sobre la superficie terrestre, a continuación, se detalla la lista de datos ráster que ha sido necesario para la elaboración de la tesis. (Ver Tabla 10).

Tabla 10

Datos Ráster utilizados

Nombre de la Imagen	Fuente
WorldView-3 SWIR	Maxar Technologies
Sentinel 2	Agencia Espacial Europea (ESA)
Alos Palsar	Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA)
Ortofoto de Lima	Instituto Catastral de Lima (ICL)

Nota. Elaboración propia

i) Imagen Satelital WorldView-3 bandas SWIR

Se adquirió la imagen satelital mediante una transacción comercial con la empresa Maxar Technologies, anteriormente conocida como DigitalGlobe, a través del proveedor autorizado en Perú, Geomática Soluciones ver Tabla 11.

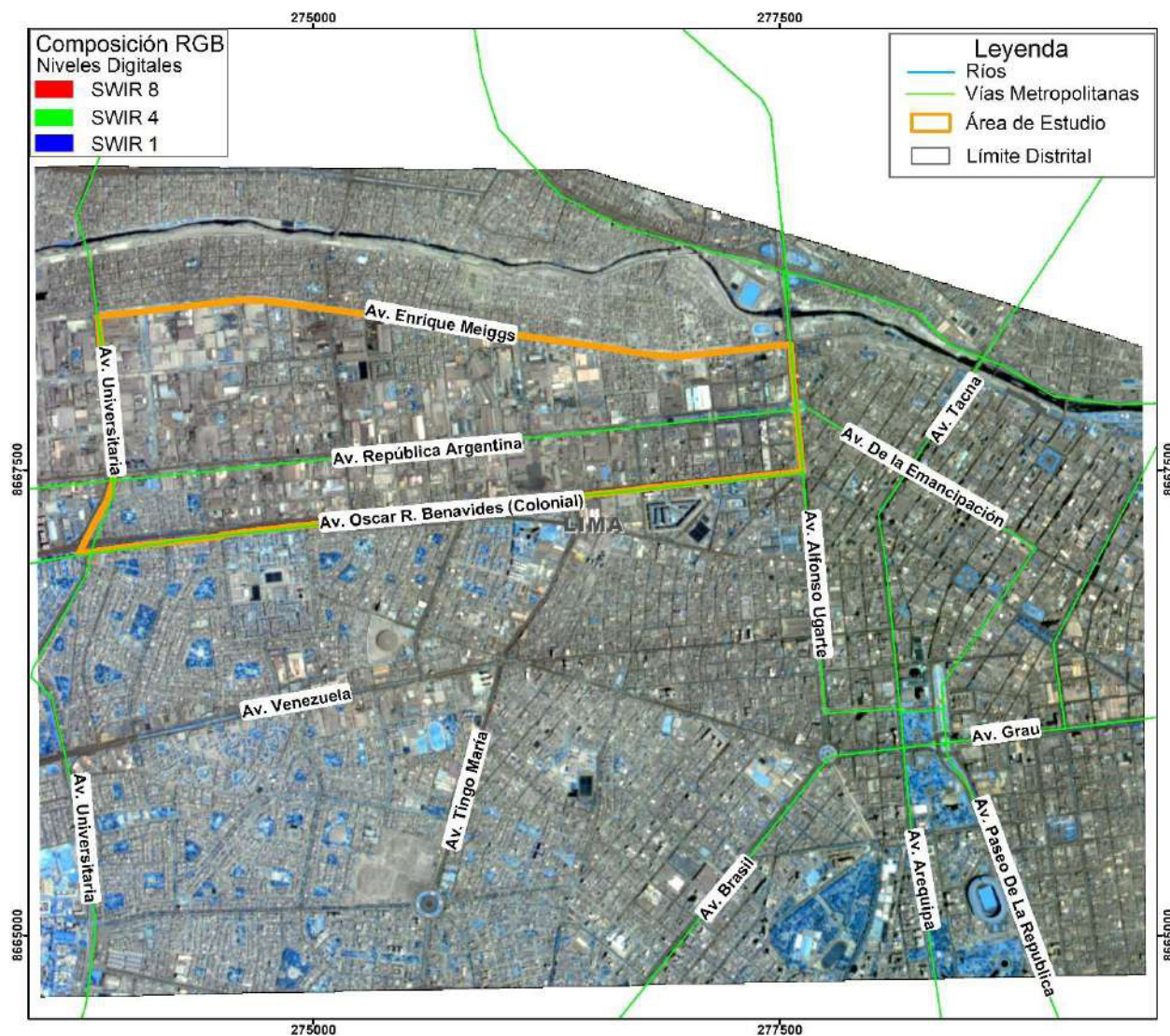
La captura se realizó el 22 de febrero de 2017 a las 15:53:56.82 horas. La escena presenta una cobertura del 0% de nubes y un ángulo de nadir de 18.5°. Se eligió adquirir la imagen en las bandas SWIR, dado que según Książek (2014), la absorción espectral del asbesto se evidencia en la longitud de onda de 2.327 μm , y la banda SWIR abarca esta longitud de onda, registrando la absorción espectral en 2.330 μm . En la Figura 16 se visualiza la extensión de la imagen satelital adquirida. (Ver anexo de mapas: M7_U_25M).

Tabla 11

Imágenes Satelitales utilizadas

Imagen	Fecha	Bandas	Resolución Espacial
WorldView-3	22/02/2017	SWIR	7.5 m

Nota. Elaboración propia

Figura 16*Escena WorldView-3 Niveles Digitales (Inicial)*

Nota. Fuente: Imagen SWIR WorldView-3. Elaboración propia

ii) Imagen Satelital Sentinel 2

La imagen Sentinel-2 fue adquirida a través del servicio en línea de la USGS EarthExplorer, la cual es una plataforma proporcionada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) que ofrece acceso gratuito a datos de observación de la Tierra. La imagen satelital fue corregida geométrica y radiométricamente, por el Laboratorio de

teledetección del INGEMMET en unidades de reflectancia que van de 0 a 1. Se seleccionaron 7 de las 12 bandas espectrales de la imagen Sentinel-2, correspondientes a las bandas 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8. Esta selección se realizó con el propósito de complementar la información del área de estudio, lo que permite mejorar el análisis espectral y espacial. Ver Tabla 12.

Tabla 12

Imágenes Satelitales utilizadas

Imagen	Fecha	Bandas	Resolución Espacial
Sentinel-2	22/02/2017	2,3,4,5,6,7,8	10 y 20 m

Nota. Elaboración propia

iii) Modelo Digital de Elevación (DEM) Alos Palsar

El Modelo Digital de Elevación (DEM) obtenido a partir de la imagen satelital ALOS PALSAR, capturada por el satélite japonés ALOS equipado con el sensor PALSAR, es proporcionado por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) y constituye un conjunto de datos para el análisis topográfico del área de estudio. Esta información se adquirió a través del servicio en línea de la USGS EarthExplorer. El DEM de 12 metros se utilizó para realizar la corrección geométrica de la imagen WorldView-3, lo que garantiza una precisión espacial adecuada para el análisis detallado de la cobertura terrestre. Ver Tabla 13.

Tabla 13

Modelo Digital de Elevación utilizado

Imagen	Fecha	Autor	Proyección	Resolución Espacial
Alos Palsar DEM	2012	Agencia de exploración aeroespacial de Japón	UTM ZONA 18	12 m

Nota. Elaboración propia

iv) Ortofoto del distrito de Lima

La imagen ortofoto del distrito de Lima fue suministrada por el Instituto Catastral de Lima (ICL) y generada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) en el año 2012. Esta imagen se caracteriza por estar ortorrectificada y georreferenciada en la proyección cartográfica UTM Zona 18 sur, con una escala espacial de 1:5 000 lo que permite una representación detallada. La selección de esta imagen se basó en su precisión y cobertura, lo que la convierte en una opción ideal para verificar y validar los resultados obtenidos mediante la metodología desarrollada para identificar la presencia de asbesto en techos mediante técnicas de teledetección. Ver Tabla 14.

Tabla 14

Imagen Ortorrectificada del distrito de Lima

Imagen	Fecha	Autor	Proyección	Escala
Ortofoto Lima	2012	IGN	UTM ZONA 18	1: 5 000

Nota. Elaboración propia

4.4.5. Metodología en Teledetección

Desde una perspectiva temprana, Curran (1985) señala que la teledetección adquiere significado científico únicamente cuando se desarrolla bajo una metodología claramente estructurada y orientada a objetivos explícitos de identificación, clasificación y validación, enfatizando que la organización metodológica constituye un requisito esencial para asegurar la confiabilidad y reproducibilidad de los resultados.

Posteriormente, Richards y Jia (2006) definen la metodología de clasificación como un flujo organizado de decisiones algorítmicas y analíticas aplicadas a datos espectrales, orientado a la discriminación y asignación de clases de cobertura o materiales de superficie en función de sus características espectrales y estadísticas, aspecto fundamental en investigaciones dirigidas a la identificación de materiales específicos en entornos urbanos.

Más adelante, Lillesand, Kiefer y Chipman (2015) indican que el análisis mediante sensores remotos requiere un procedimiento metodológicamente estructurado que integre los fundamentos físicos de la interacción radiación–materia, las técnicas de procesamiento digital de imágenes y el análisis espacial, permitiendo transformar datos espectrales brutos en información geográficamente significativa.

Finalmente, Jensen (2016) concibe la metodología en teledetección como un proceso sistemático y secuencial orientado a la generación de información temática confiable, compuesto por una cadena lógica de etapas que se inicia con la captación de la energía electromagnética reflejada o emitida por los objetos y culmina con la producción de información interpretada y validada para fines específicos de análisis territorial.

En conjunto, estos enfoques sustentan que la metodología en teledetección no se limita al empleo de imágenes satelitales, sino que constituye un marco analítico integral, en el que la

organización ordenada y estructurada de las etapas metodológicas permite la identificación precisa de materiales específicos, como el asbesto, en techos ubicados en entornos urbanos e industriales.

En ese sentido, el desarrollo de una metodología basada en técnicas de teledetección se sustenta en un enfoque procedimental, constituido por un conjunto ordenado, sistemático y reproducible de etapas técnicas y decisiones analíticas. Lo ordenado responde a una secuencia lógica y jerárquica de procesos interdependientes, que abarca desde la selección de la imagen satelital y su preprocesamiento, hasta el análisis espectral, la clasificación y la validación de resultados. Asimismo, lo estructurado se refiere a la organización coherente de procedimientos estandarizados, criterios técnicos y reglas de decisión, que garantizan la consistencia, trazabilidad y replicabilidad del análisis, permitiendo que la metodología pueda ser aplicada y contrastada en contextos espaciales similares.

4.4.6. Desarrollo de la Metodología

La metodología desarrollada en la presente investigación se basó en la aplicación del enfoque “Spectral Hourglass” o Reloj de Arena, originalmente diseñado para el análisis de imágenes hiperespectrales y, en algunos casos, multiespectrales. No obstante, dicho enfoque fue ajustado y adaptado en el laboratorio del INGEMMET, considerando que la información utilizada corresponde a una escena multiespectral de 15 bandas, complementada con imágenes Sentinel-2. Dado que el método Hourglass completo resulta más sofisticado y exploratorio para imágenes hiperespectrales de alta dimensionalidad, su aplicación directa no resultaba plenamente coherente con las características espectrales y espaciales del conjunto de datos empleado. En ese sentido, y por recomendación de los especialistas, el flujo metodológico fue redefinido y orientado a la identificación dirigida de píxeles correspondientes a techos de dimensiones específicas. Asimismo, al contarse previamente con la firma espectral del asbesto, se prescindió de las etapas de

identificación y extracción de píxeles puros (como PPI y N-D Visualizer), las cuales fueron reemplazadas por un enfoque de análisis espectral dirigido, basado en la comparación directa entre la firma espectral del material objetivo y la respuesta espectral de los píxeles analizados.

La metodología aplicada se desarrolló a partir de la obtención de las muestras de campo y se midieron las firmas espectrales del asbesto mediante el uso de un espectrorradiómetro FieldSpec 4, las cuales fueron posteriormente corregidas y convertidas a valores de reflectancia, garantizando su compatibilidad espectral con la información satelital empleada.

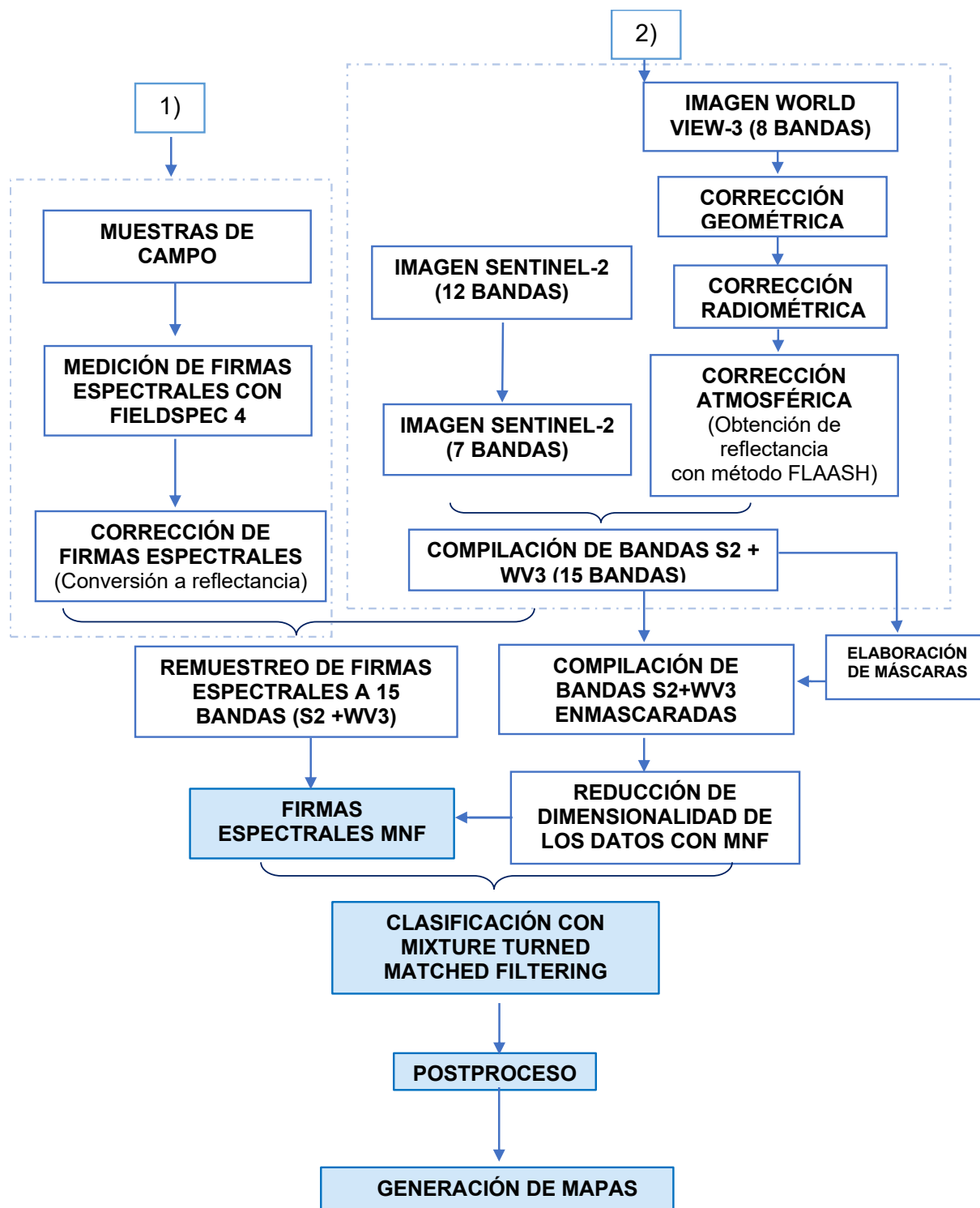
De manera paralela, se desarrolló el preprocesamiento de las imágenes satelitales WorldView-3 y Sentinel-2, que comprendió la aplicación de correcciones geométrica, radiométrica y atmosférica, esta última mediante el método FLAASH, con el propósito de obtener reflectancias de superficie homogéneas. Posteriormente, ambas fuentes de información fueron integradas en una imagen multiespectral compuesta de 15 bandas, sobre la cual se aplicaron máscaras espaciales con el fin de restringir el análisis a áreas urbanas e industriales y a coberturas compatibles con techos de fibrocemento.

La imagen multiespectral fue transformada inicialmente mediante la técnica Minimum Noise Fraction (MNF), con el fin de reducir la dimensionalidad de los datos y separar la información útil del ruido espectral. A partir de esta transformación, las firmas espectrales de campo del asbesto fueron previamente remuestreadas a la resolución espectral de la imagen compuesta y posteriormente proyectadas al mismo espacio MNF, garantizando la coherencia espectral entre la información de referencia y los datos satelitales. Este procedimiento permitió minimizar la redundancia espectral y optimizar la comparación entre la firma objetivo y los píxeles de la imagen durante el proceso de clasificación.

Finalmente, la identificación del asbesto se realizó mediante la aplicación del algoritmo Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF), utilizando la firma espectral del techo de fibrocemento con contenido de asbesto como espectro objetivo o píxel puro. Este procedimiento permitió identificar y cuantificar píxeles con alta similitud espectral respecto a la firma de referencia, donde los valores más elevados indican una mayor probabilidad de presencia de asbesto en techos. Los resultados obtenidos fueron sometidos a postprocesos, orientados a mejorar la calidad, coherencia espacial y confiabilidad de la información, constituyendo la base para la generación de los mapas finales de distribución del asbesto.

Figura 17

Metodología para Identificar El Asbesto



4.4.6.1 Obtención de la firma espectral del techo con Asbesto

Para obtener la firma espectral del techo con contenido de asbesto, se utilizó el método pasivo de medición, el cual aprovecha la radiación solar incidente, para registrar la reflectancia espectral del material.

Las mediciones espectrales se realizaron en el laboratorio de teledetección del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), utilizando el espectrorradiómetro FieldSpec 4 Hi-Res. La adquisición de los espectros se efectuó sin contacto directo con la muestra, con el fin de simular las condiciones de observación de los sensores satelitales que dependen de la energía solar reflejada por la superficie terrestre, tal como se ilustra en la Foto 2.

El trabajo de medición se llevó a cabo durante el mes de febrero de 2018, en el intervalo horario comprendido entre las 12:00 y las 14:00 horas, con el objetivo de reproducir condiciones de iluminación solar y geometría de adquisición similares a las existentes durante la captura de la imagen satelital WorldView-3, obtenida en febrero de 2017.

Foto 2

Medición de muestras método Pasivo



Nota. Foto de los autores febrero 2018

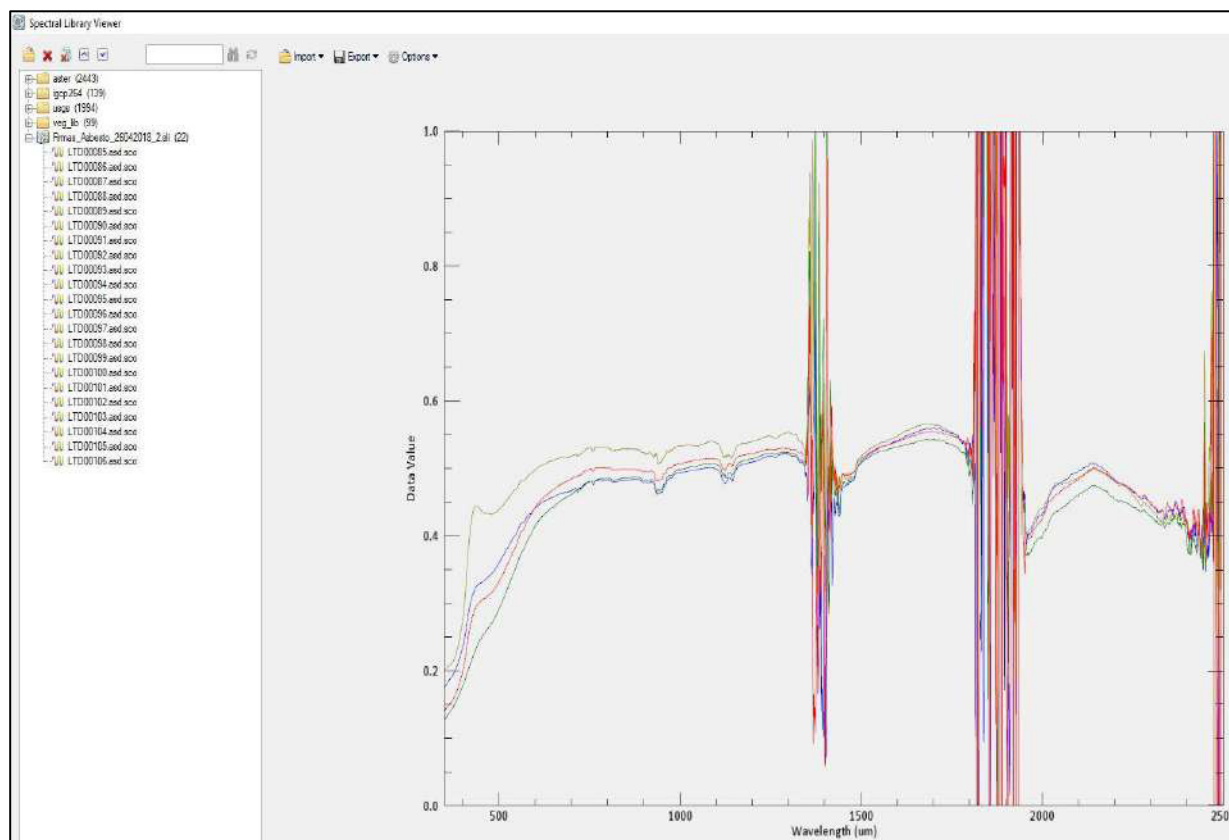
4.4.6.2 Librería Espectral de las Firmas

En total, se recolectaron 22 firmas espectrales, cada una con 2 151 canales o bandas espectrales. Estos datos se descargaron y convirtieron a unidades de reflectancia. Posteriormente, se creó una Librería Espectral en el software ENVI para facilitar el análisis, la comparación de las firmas y el comportamiento espectral del techo de fibrocemento con asbesto.

Durante el análisis de las firmas espectrales, se detectó la influencia de la atmósfera en la radiación electromagnética la cual se manifiesta como absorción de energía vinculada a la presencia de gases atmosféricos como el oxígeno (O_2), el ozono (O_3), el dióxido de carbono (CO_2) y el vapor de agua. Esta interacción de la radiación electromagnética detectada por los sensores limita y elimina cualquier posibilidad de observación remota en rangos que van desde los <1350 nm - 1500 nm>, <1800nm - 2000 nm> y <2400 nm - 2900 nm>. Dichas absorciones se representan como líneas verticales en el espectro de longitudes de onda, como se muestra en la Figura 18. Por tanto, se excluyeron estos rangos de la firma espectral de la muestra de techo de fibrocemento con asbesto.

Figura 18

Firmas espectrales FieldSpec 4, formato ENVI



Nota. Fuente: software ENVI. Elaboración propia

4.4.6.3 Corrección Geométrica

La corrección geométrica se realizó a partir de la imagen satelital WorldView-3, cuyo tipo de producto es OrStandar2A⁵, como se detalla en la Tabla 16, la cual se aplicó la corrección geométrica utilizando el método riguroso del Modelamiento con Polinomial. Este proceso se realizó mediante la herramienta de ortorrectificación o corrección geométrica denominada “OrthoEngine” del software PCI Geomática. Para garantizar una precisión óptima, se emplearon Puntos de Control en el Terreno (GCPs, por sus siglas en inglés).

Tabla 15

Nivel de Producto WorldView-3

Nombre de Producto	Nivel de procesamiento	Descripción	Beneficios
OrStandar2A	OR2A	Proyectado y remuestreados, proyectado a una elevación base promedio	Ideal para manipulación de imágenes y análisis fotogramétrico mediante sistemas de procesamiento de imágenes, y visualización de imágenes y análisis de características en sistemas de información geográfica.

Nota. Fuente: Productos Maxar

https://securewatchdocs.maxar.com/enus/Orders/Orders_ProductInfo.htm

Para la ortorrectificación, se utilizaron los parámetros del sensor WorldView-3 y los datos orbitales pertinentes, junto con 13 Puntos de Control en el Terreno (GCPs) con coordenadas UTM Zona 18 Sur, fotoidentificables, los cuales fueron seleccionados estratégicamente a partir de la intersección de avenidas principales visibles tanto en la ortofoto de Lima como en la imagen WorldView-3. Además, se integró información de elevación del modelo digital de elevación

⁵ Tipo de producto de las Imágenes Satelitales Maxar, antes Digital Globe.

(DEM) de la imagen satelital Alos Palsar a fin de mejorar aún más la precisión del proceso de ortorrectificación. Ver Tabla 16.

Tabla 16

Coordenadas de los puntos de control

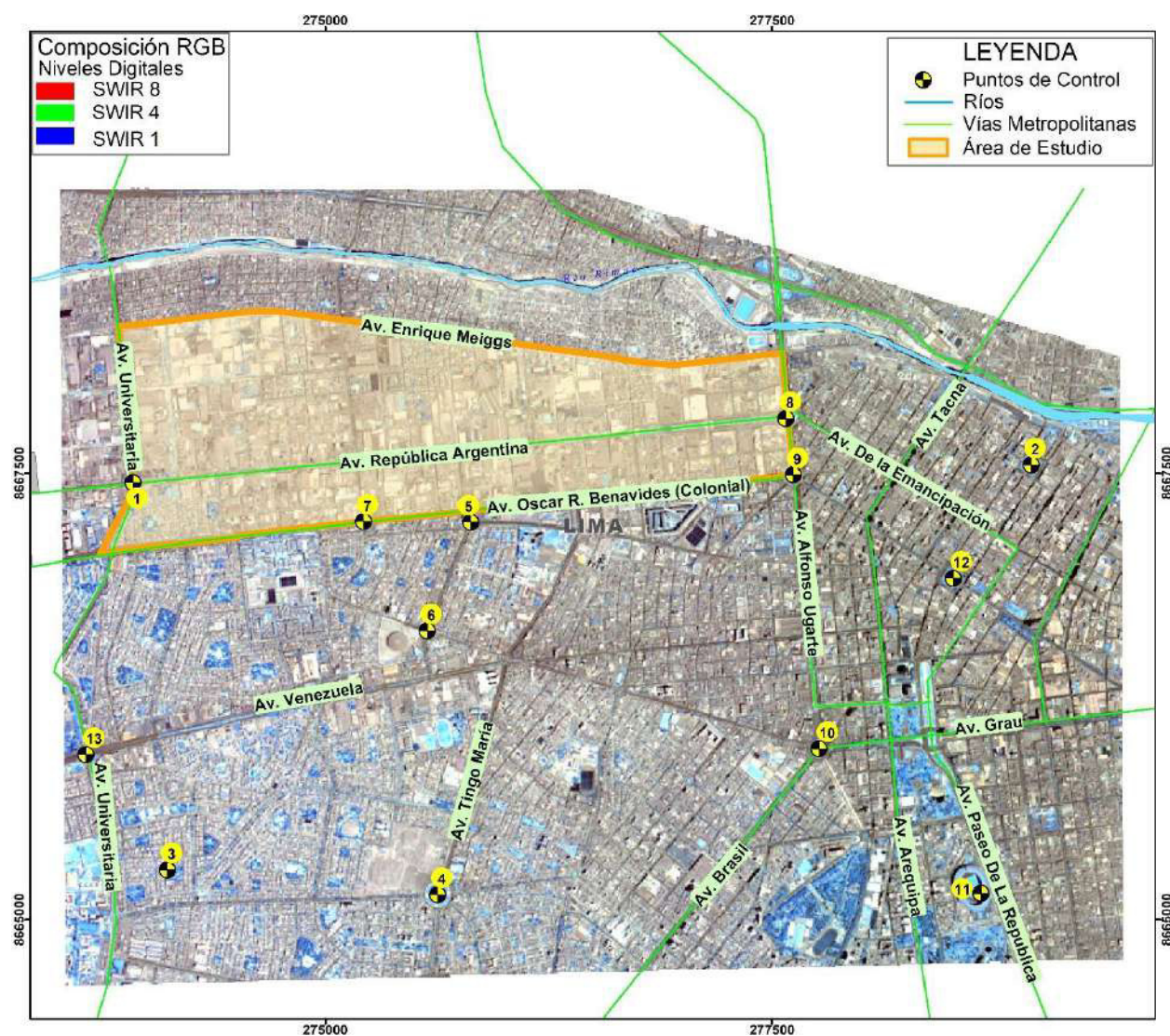
N°	X-mapa	Y-mapa	Fila	Columna
1	273 924.193	8 667 448.53	273 923.626	8 667 445.32
2	278 950.106	8 667 547.09	278 949.108	8 667 546.52
3	274 117.909	8 665 278.56	274 116.373	8 665 281.49
4	275 629.708	8 665 138.66	275 630.379	8 665 141.84
5	275 813.742	8 667 226.25	275 811.449	8 667 223.11
6	275 570.809	8 666 618.07	275 574.499	8 666 616.11
7	275 214.178	8 667 229.52	275 213.977	8 667 230.61
8	277 579.022	8 667 806.58	277 577.736	8 667 806.86
9	277 619.993	8 667 491.38	277 620.345	8 667 489.48
10	277 763.324	8 665 957.11	277 764.820	8 665 957.73
11	278 670.624	8 665 146.90	278 670.358	8 665 149.61
12	278 514.887	8 666 911.99	278 513.274	8 666 910.01
13	273 660.911	8 665 924.37	273 663.440	8 665 926.39

Nota. Elaboración propia

En la Figura 19 se visualiza la distribución de los puntos de control en la escena WordView-3. (Ver anexo de mapas M8_W_25M).

Figura 19

Puntos de Control ubicados en la Escena WorldView-3



Nota. Fuente: Imagen SWIR WorldView-3. Elaboración propia

Como resultado de la corrección geométrica se tiene un error medio cuadrático de 0.26 píxeles es decir 1.93 metros, aceptable para la escala de trabajo. La Figura 20 nos muestra el reporte generado por el software PCI.

Figura 20*Reporte de resultados de los residuales*

Residual Error Report											
Residual Units: Image pixels											
Residual Summary for 1 Images											
GCPs: 13 X RMS 0.23 Y RMS 0.30											
Check points: 0 X RMS Y RMS											
Tie points: 0 X RMS Y RMS											
Listing: GCPs only All images											
Point ID	Res	Res X	Res Y	Res Z	Type	Image ID	Image X	Image Y	Ground Z	Comp X	Comp Y
G0006	0.57	-0.50	-0.27		GCP	IMAGENW3_PIX	277.97	335.97	130.48	277.47	335.70
G0005	0.52	0.32	-0.42		GCP	IMAGENW3_PIX	310.88	255.19	136.00	311.19	254.77
G0001	0.44	0.08	-0.43		GCP	IMAGENW3_PIX	54.01	222.11	105.24	54.09	221.68
G0003	0.44	0.21	0.39		GCP	IMAGENW3_PIX	78.00	512.00	105.14	78.21	512.39
G0004	0.44	-0.09	0.42		GCP	IMAGENW3_PIX	283.97	532.98	121.12	283.87	533.41
G0002	0.44	-0.35	0.27		GCP	IMAGENW3_PIX	17.01	424.99	100.76	16.66	425.26
G0011	0.36	0.03	0.36		GCP	IMAGENW3_PIX	697.98	536.97	163.17	698.01	537.34
G0012	0.34	0.22	-0.26		GCP	IMAGENW3_PIX	678.48	301.48	171.96	678.70	301.22
G0009	0.26	-0.05	-0.25		GCP	IMAGENW3_PIX	557.47	222.49	160.99	557.43	222.23
G0010	0.22	-0.20	0.08		GCP	IMAGENW3_PIX	575.51	427.47	155.00	575.31	427.55
G0008	0.18	0.17	0.04		GCP	IMAGENW3_PIX	552.01	179.99	162.00	552.19	180.03
G0013	0.16	0.14	-0.08		GCP	IMAGENW3_PIX	738.49	217.00	179.00	738.63	216.92
G0007	0.15	0.03	0.15		GCP	IMAGENW3_PIX	229.49	253.03	124.00	229.52	253.17
Residual Summary for IMAGENW3_PIX											
GCPs: 13 X RMS 0.23 Y RMS 0.30											
Check points: 0 X RMS Y RMS											
Tie points: 0 X RMS Y RMS											

Nota. Fuente: PCI Geomática. Elaboración propia

En la Figura 21 se presenta una sección de la imagen WorldView-3 corregida geoméricamente, mostrando una alineación precisa en comparación con la imagen original, la cual presentaba un ligero desplazamiento.

Figura 21

WorldView-3: adquirida inicial (izquierda), corregida(derecha)



Nota. Fuente: PCI Geomática. Elaboración propia

4.4.6.4 Corrección Radiométrica

La corrección radiométrica de la imagen WorldView-3 se realizó posterior a la corrección geométrica, en la cual los datos se encontraban en niveles digitales (ND) de 14 bits (2^{14}), es decir, inicialmente se encuentran en un rango 0 a 16 384 unidades, los cuales serán convertidos en unidades físicas de radiancia en la parte superior de la atmosfera, representadas como L, medidos en $\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$. Para realizar esta conversión, se emplea un cálculo específico para cada una de las bandas utilizando la información de los metadatos proporcionada al adquirir la imagen, la cual se detalla a continuación:

$$L = \text{DN} * \frac{\text{ACF}}{\text{EBW}} * (2 - \text{Gain}) - \text{Offset}$$

Dónde:

L= Radiancia ($\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$.)

DN = Números o Niveles Digital del píxel

ACF = Factor de calibración radiométrico absoluto (AbsCalFactor)

EBW = Ancho de Banda Efectivo (EffectiveBandWidth)

Gain = Ganancia

Offset= Desplazamiento

La Tabla 17 muestra las variables de cada banda SWIR de la imagen WorldView-3, para el cálculo de la Radiancia.

Tabla 17

Datos de entrada para el cálculo de la Radiancia WorldView-3

Nombre de Banda	Longitud de Onda (nm)	AbsCalFactor (ACF)	Effective Band Width (EBW)	Gain	Offset
SWIR1	1210	3.533070E-04	3.300000E-02	0.844	3.295
SWIR2	1570	2.309390E-04	3.970000E-02	0.835	1.496
SWIR3	1660	2.106770E-04	3.730000E-02	0.848	1.385
SWIR4	1 730	1.959880E-04	4.160000E-02	0.834	1.009
SWIR5	2 165	8.931681E-05	3.890000E-02	0.780	0.356
SWIR6	2 205	9.212040E-05	4.090000E-02	0.750	0.353
SWIR7	2 260	9.292150E-05	4.760000E-02	0.749	0.252
SWIR8	2 330	9.572510E-05	6.790000E-02	0.729	0.167

Nota. Fuente: Sensor WorldView-3 Elaboración: Propia

La Tabla 18 presenta la sustitución de cada variable en la fórmula utilizada para calcular la radiancia, a cada banda SWIR de la imagen WorldView-3, utilizando la herramienta matemática de bandas o con la herramienta calibración radiométrica del software ENVI.

Tabla 18

Algoritmo para el cálculo de la Radiancia WorldView-3

Bandas	Radiancia (L)
SWIR 1	$b1*(0.000353307/0.033) *(2-0.844)-3.295$
SWIR 2	$b2*(0.000230939/0.0397) *(2-0.835)-1.496$
SWIR 3	$b3*(0.000210677/0.0373) *(2-0.848)-1.385$
SWIR 4	$b4*(0.000195988/0.0416) *(2-0.834)-1.009$
SWIR 5	$b5*(0.00008931681/0.0389) *(2-0.78)-0.356$
SWIR 6	$b6*(0.0000921204/0.0409) *(2-0.75)-0.353$
SWIR 7	$b7*(0.0000929215/0.0476) *(2-0.749)-0.252$
SWIR 8	$b8*(0.0000957251/0.0679) *(2-0.729)-0.167$

Nota. Fuente: Sensor WorldView-3 Elaboración: Propia

La Tabla 19 muestra los valores mínimos y máximos de cada banda SWIR de la imagen WorldView-3, comparando la imagen inicial en números digitales (ND) con la imagen corregida y calculada a radiancia espectral en la parte superior de la atmósfera (L). (Ver anexo de mapas M9_W_25M)

Tabla 19*Comparativo entre Niveles Digitales y Radiancia*

Nombre de Banda	Longitud de Onda (nm)	Niveles o Números Digitales (ND)		Radiancia (L, $\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$)	
		Min	Max	Min	Max
SWIR1	1210	0	15073	0	183.2552
SWIR2	1570	0	14915	0	99.5818
SWIR3	1660	0	15675	0	100.6075
SWIR4	1730	0	13803	0	74.8153
SWIR5	2165	0	14833	0	41.1941
SWIR6	2205	0	15145	0	42.2865
SWIR7	2260	0	14853	0	36.0208
SWIR8	2330	0	14491	0	25.7987

Nota. Fuente: Sensor WorldView-3 Elaboración: Propia

4.4.6.5 Corrección Atmosférica

La corrección atmosférica se llevó a cabo mediante el algoritmo FLAASH, que utiliza información atmosférica y características específicas de la imagen WorldView-3, para corregir los efectos atmosféricos, como la dispersión y la absorción de la luz.

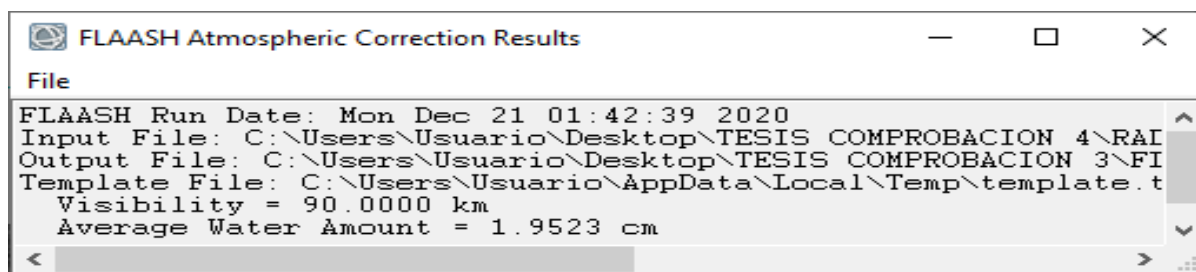
Esto permite obtener imágenes más claras y precisas del área de estudio. Además, la reflectancia calculada por FLAASH representa la cantidad de radiación electromagnética reflejada por la superficie terrestre en diferentes longitudes de onda. Esta reflectancia ajustada refleja la luz que realmente proviene de la superficie terrestre, una vez que se han eliminado o corregido los efectos atmosféricos. Esto proporciona una estimación más precisa de las características de la superficie y mejora la calidad de los datos obtenidos. La Tabla 20, se presentan los parámetros utilizados para la corrección atmosférica y cálculo de la reflectancia.

Tabla 20*Parámetros FLAASH*

	Latitud	Longitud
Centro de la Escena	-12° 3' 5.28"	-77° 3' 11.60"
Tipo de Sensor	WorldView-3	
Altitud del Sensor (Km)	617	
Elevación del suelo (Km)	0,114	
Tamaño de Píxel (m)	7.5	
Fecha de Vuelo	22/feb/2017	
Tiempo de Vuelo GMT (HH:MM: SS)	15:53:56	
Modelo Atmosférico	Tropical	
Modelo Aerosol	Urbano	

Nota. Fuente: Elaboración propia

Como resultado se obtuvo la cantidad promedio de agua de 1.9523 cm tal como se aprecia en la Figura 22. (Ver anexo de mapas M10_W_25M)

Figura 22*Resultado de la corrección atmosférica FLAASH*

Nota. Fuente: ENVI. Elaboración propia

Los resultados de reflectancia obtenidos mediante el algoritmo FLAASH de ENVI están representados en unidades que van desde 1 hasta 10 000. Sin embargo, en algunos casos se observan datos fuera de este rango. Por ejemplo, valores negativos pueden surgir debido a sombras de edificios u otros objetos, mientras que valores mayores a 10 000 suelen indicar áreas con una alta reflectividad, como superficies metálicas o con un brillo intenso que satura al sensor. Con el fin de abordar esta variabilidad en los resultados, se llevó a cabo un proceso de reescalado de los

valores de reflectancia para ajustar los valores donde el valor mínimo es 0 y el valor máximo es 1. Para lograr esto, se aplicó un algoritmo específico a la imagen resultante del FLAASH que permite una integración y análisis con otros datos en reflectancia, la cual se detalla a continuación:

$$\frac{(\mathbf{B1\ le\ 0}) * 0 (\mathbf{B1\ ge\ 10000}) * 1 + (\mathbf{B1\ gt\ 0\ and\ B1\ lt\ 10000}) * \text{float}(\mathbf{b1})}{10\ 000}$$

Donde:

(B1 le 0) *0: Para que los valores menores a 0 se iguale a 0.

(B1 ge 10 000) *1: Para los valores mayores a 10 000 se iguale a 1.

(B1 gt 0 and B1 lt 10 000) *float (b1) /10 000: Para que los valores que están entre 0 y 10 000 sean divididos entre 10 000.

Como resultado del reescalado de los valores obtenidos con la corrección atmosférica del modelo FLAASH, se tiene la Tabla 21 Comparativo de la radiancia con la reflectancia, en sus valores máximos y mínimos de la SWIR del Worldvier-3.

Tabla 21

Comparativo entre Niveles Digitales y Radiancia

Nombre de Banda	Longitud de Onda (nm)	Radiancia (L, Wm ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹)		Reflectancia	
		Min	Max	Min	Max
SWIR1	1 210	0	183.2552	0	1.0
SWIR2	1 570	0	99.5818	0	1.0
SWIR3	1 660	0	100.6075	0	1.0
SWIR4	1 730	0	74.8153	0	1.0
SWIR5	2 165	0	41.1941	0	1.0
SWIR6	2 205	0	42.2865	0	1.0
SWIR7	2 260	0	36.0208	0	1.0
SWIR8	2 330	0	25.7987	0	1.0

Nota. Fuente: Elaboración: Propia

4.4.6.6 Compilación de Bandas Sentinel-2 y WorldView-3

Usando la herramienta compilación de bandas (layer stacking) del software ENVI se sumaron las bandas 2,3,4,5,6,7,8 de la imagen Sentinel-2 y las 8 bandas SWIR de la imagen WorldView-3, ambas en unidades de reflectancia, haciendo un total de 15 bandas espectrales que abarcan desde los 496 hasta los 2333 nanómetros, escaladas a 7.5 metros por píxel. Ver Tabla 22. (Ver anexo de mapas M11_L_25M).

Tabla 22

Compilación de bandas Sentinel-2 y WorldView-3

Imagen Satelital	Satélite	Nº	Nombre Banda	Banda Central	Resolución Espacial Inicial (m)	Resolución Espacial Compilado (m)
Imagen Satelital Sentinel-2 y WorldView-3 SWIR (15 Bandas)	Sentinel-2 (7 Bandas)	1	B2	496.6	10	7.5
		2	B3	560.0	10	7.5
		3	B4	664.5	10	7.5
		4	B5	703.9	20	7.5
		5	B6	740.2	20	7.5
		6	B7	782.5	20	7.5
		7	B8	835.1	10	7.5
	WorldView-3 SWIR (8 Bandas)	8	SWIR1	1 210.0	7.5	7.5
		9	SWIR2	1 570.0	7.5	7.5
		10	SWIR3	1 660.0	7.5	7.5
		11	SWIR4	1 730.0	7.5	7.5
		12	SWIR5	2 165.0	7.5	7.5
		13	SWIR6	2 205.0	7.5	7.5
		14	SWIR7	2 260.0	7.5	7.5
		15	SWIR8	2 330.0	7.5	7.5

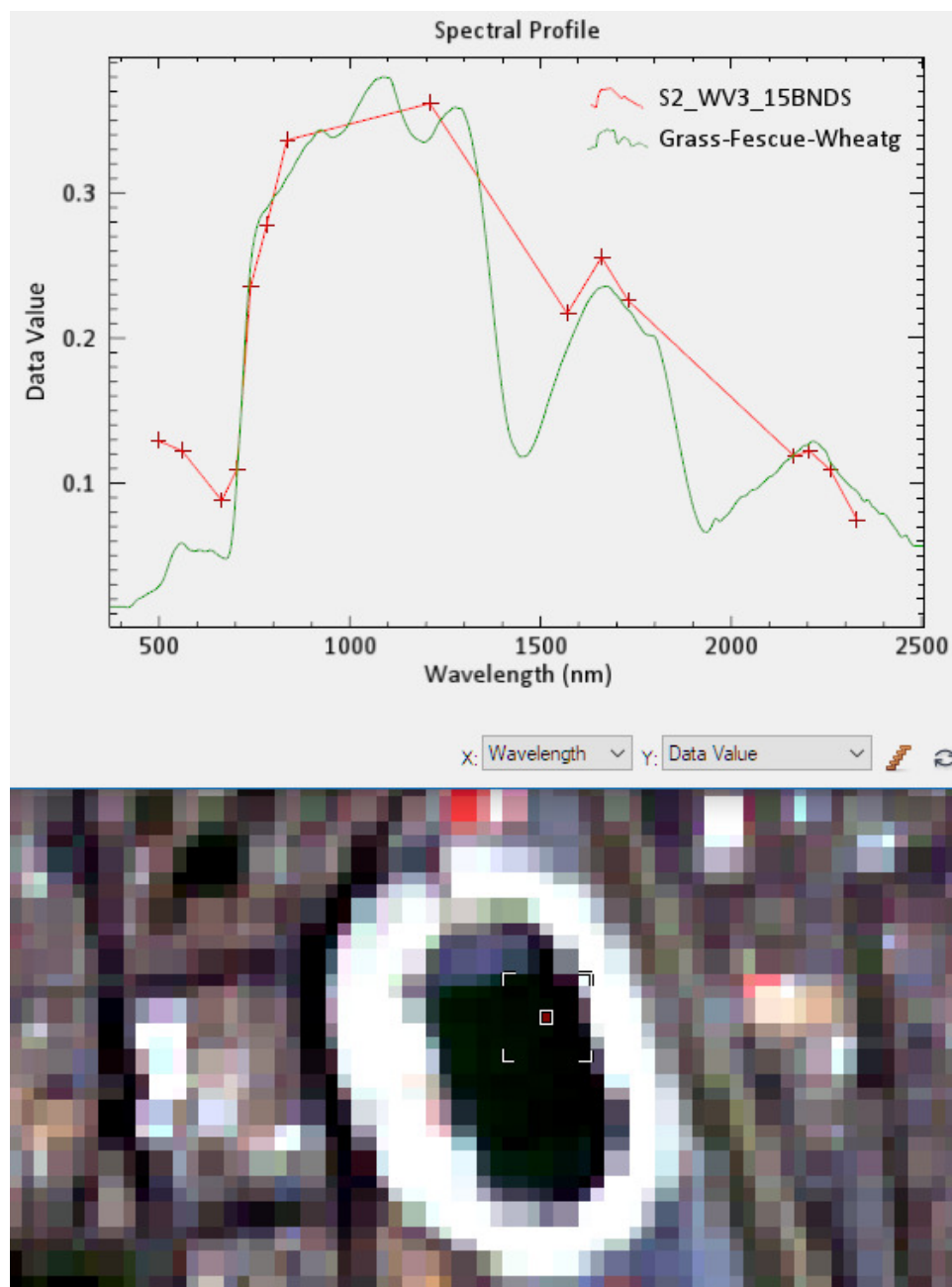
Nota. Elaboración: propia

La validación de los datos de la Imagen Sentinel-2 y WorldView-3 en reflectancia, se realizó comparando el píxel del gras del Estadio Nacional con la firma del gras de la biblioteca espectral de la USGS, denominado vegetación AVIRIS 2138.sli Grass-Fescue-Wheatg YNP-FW-1 [W1R1Ab RTGC]. De esta manera se verificó la congruencia espectral de la imagen satelital,

verificando la sinuosidad de las curvas y vértices, tal como se muestra en la Figura 23 donde se compara los perfiles espectrales del gras, de color rojo representa el píxel de la imagen Sentinel-2 y WorldView-3 de 15 bandas y de color verde la firma espectral de la biblioteca de la USGS.

Figura 23

Comparación de la firma espectral del Grass



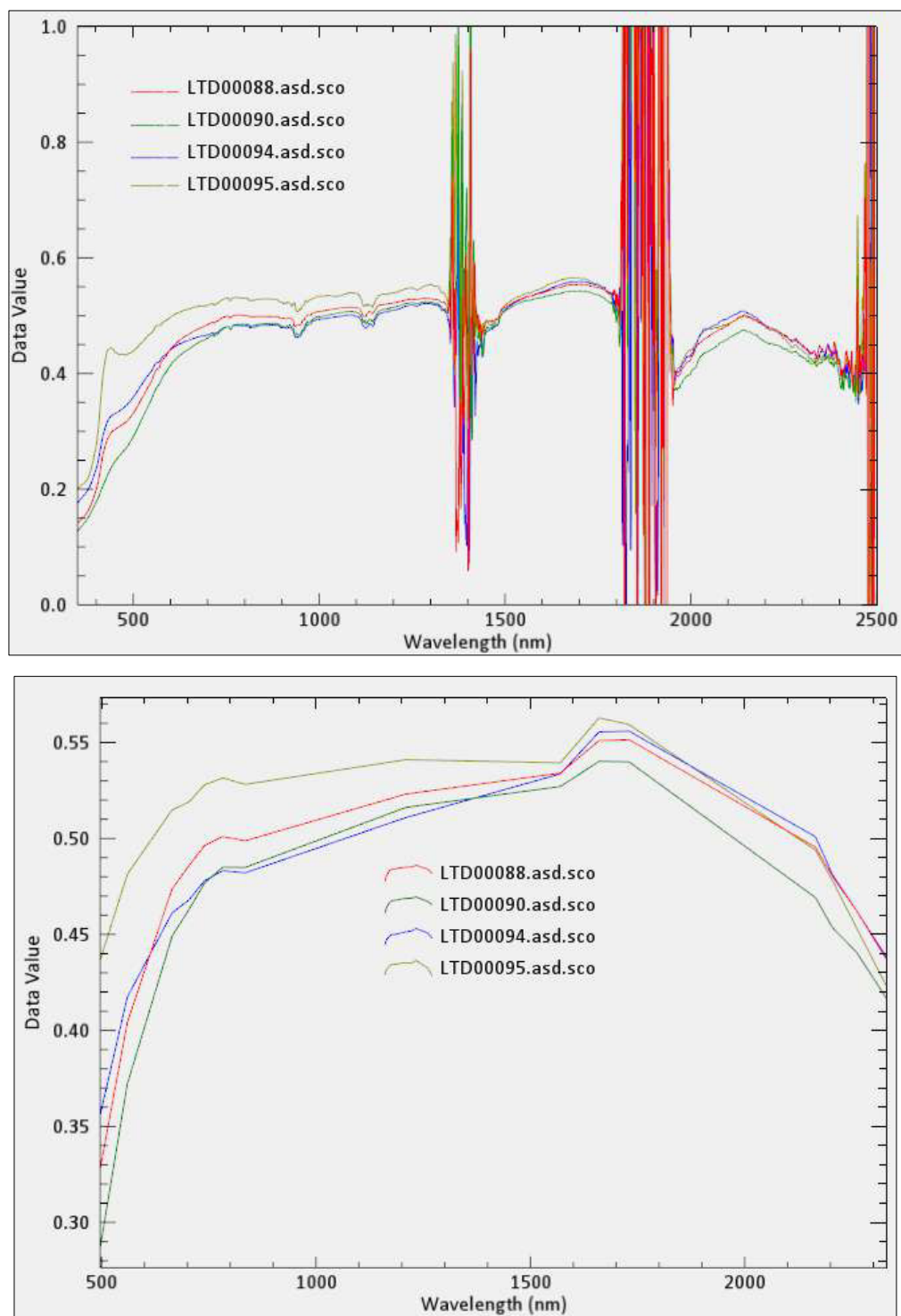
Nota. Fuente: ENVI.

4.4.6.7 Remuestreo de Firmas espectrales

A partir de las imágenes compiladas (Sentinel-2 y WorldView-3), se seleccionaron las cuatro firmas espectrales más representativas de la muestra de fibrocemento con asbesto, correspondientes a las tomas 88, 90, 94 y 95, obtenidas con el Espectrorradiómetro FieldSpec 4. Estas firmas espectrales se sometieron a un proceso de remuestreo para ajustarla a la imagen Sentinel-2 y WorldView-3. El remuestreo consistió en reducir el conjunto original de 2151 bandas espectrales a un conjunto de 15 bandas. La Figura 24 muestra la comparación entre la firma original medida por el FieldSpec 4 y la firma remuestreada a un entorno de 15 bandas del Sentinel-2 y WorldView-3.

Figura 24

Firma FieldSpec 4 (superior) vs Remuestreo (inferior)



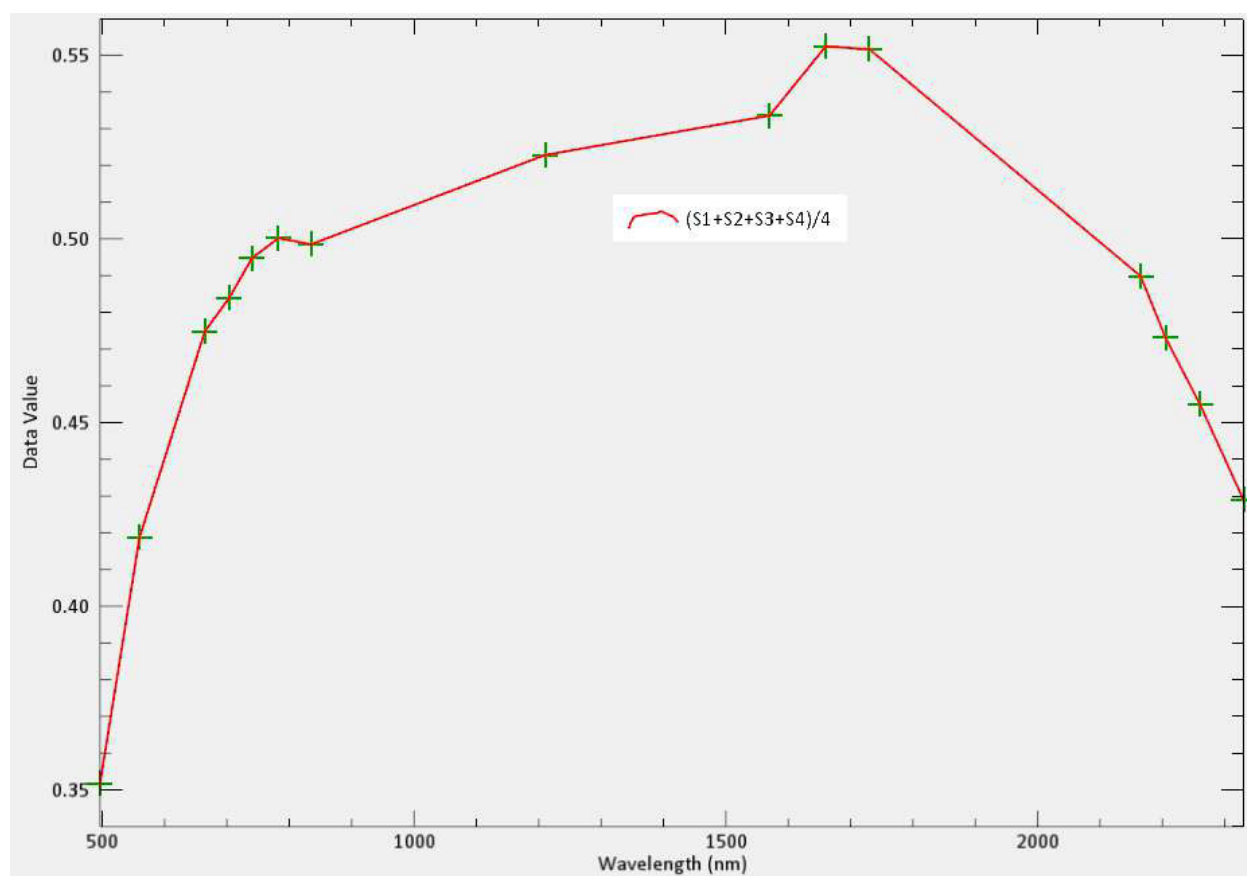
Nota. Fuente: Elaboración propia, software ENVI

4.4.6.8 Firma Espectral del techo de fibrocemento con asbesto

Habiendo realizado el remuestreo de las firmas espectrales a 15 bandas del Sentinel-2 y WorldView-3 correspondientes a las tomas 88, 90, 94 y 95, se procedió a calcular el promedio. Dando como resultado la firma espectral representativa del techo de fibrocemento con asbesto. La Figura 25 ilustra el promedio de la firma del fibrocemento con asbesto.

Figura 25

Firma del Asbesto 15 Bandas



Nota. Fuente: software ENVI. Elaboración propia

4.4.6.9 Elaboración de Máscaras

Se utilizó la técnica de elaboración de máscaras con el propósito de identificar y delimitar las regiones de interés que serán excluidas del análisis, evitando así la generación de falsos positivos. Para ello, se crearon las siguientes máscaras:

i. Máscara de vacíos o sin información

Se elaboró la máscara de vacíos o sin información de la imagen satelital WorldView-3, la cual se ubicó en los bordes y en sombras que el sensor no pudo cuantificar.

ii. Máscara de vías urbanas

Para la elaboración de la máscara de las vías urbanas, se utilizó la información georreferenciada en formato vectorial de las manzanas del distrito de Lima, para evitar semejanzas espectrales con el pavimento y veredas.

iii. Máscara de Vegetación

En el análisis espectral del asbesto cemento, se encontró una similitud con la firma espectral de la vegetación en las bandas SWIR. Debido a esta semejanza se optó por crear la máscara de la vegetación aplicando los índices de vegetación.

Con la finalidad de reducir la influencia de la cobertura vegetal en el área de estudio, se optó por el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo modificado MSAVI (por sus siglas en inglés Soil-Adjusted Vegetation Index), aplicado para identificar la vegetación en zonas urbanas por su baja densidad. (Qi et al, 1994)

La máscara se realizó a partir de la escena Sentinel-2 utilizando la banda 4 Roja (R) y banda 8 Infrarroja cercano (NIR) aplicando el algoritmo MSAVI con la herramienta matemática de bandas del software ENVI, como resultado se obtiene una correlación de cobertura espacial de la vegetación.

Finalmente se generó una región de interés (ROI) de vegetación, para la elaboración de la máscara, asignando 0 (negro) a la vegetación y 1 (blanco) a lo que no es vegetación.

iv. Máscara de Óxidos

La máscara de óxidos se realizó para descartar los techos que contienen metales y estos no interfieran en la identificación de techos con asbesto, para la clasificación de óxidos se utilizó el método PCA el cual se describe líneas abajo:

Se realizó un análisis de componentes principales (PCA), utilizando las bandas 2, 4, 8, y 11 de la escena Sentinel-2, las cuales son utilizadas para resaltar óxidos en temas geológicos (INGEMMET) resultando 4 bandas PCA, escogiéndose la cuarta.

Para el análisis de los óxidos se aplicó la máscara parcial el cual es la suma de las máscaras MSAVI, manzanas y bordes, evitando así falsos positivos o valores que se encuentran fuera de la zona de estudio.

A la banda 4 del análisis PCA con la máscara parcial, se identificó los óxidos con los valores que se encuentran en el rango negativo $<-10; -0.0057 >$, se mejoró la clasificación con la herramienta convolución y con la herramienta sieve se filtró los polígonos mayores de 3 píxeles; finalmente los óxidos se visualizan en el análisis.

v. Máscara Área de Estudio

Para delimitar los resultados se elaboró la máscara con el área de estudio, la cual limita por el norte con la Av. Enrique Meiggs, por el sur con la Av. Oscar R. Benavides (ex Colonial), por el este con la Av. Alfonso Ugarte y por el oeste con la Av. Universitaria.

vi. Máscara Total (Suma de máscaras)

La Máscara Total es el resultado de la superposición de todas las máscaras calculadas, las cuales son: máscara vacíos, máscara de vías urbanas, máscara de vegetación (MSAVI), máscara

de óxidos y máscara área de estudio tal como se muestra en la Figura 26 (Ver anexo de mapas: M12_M_25M).

Figura 26

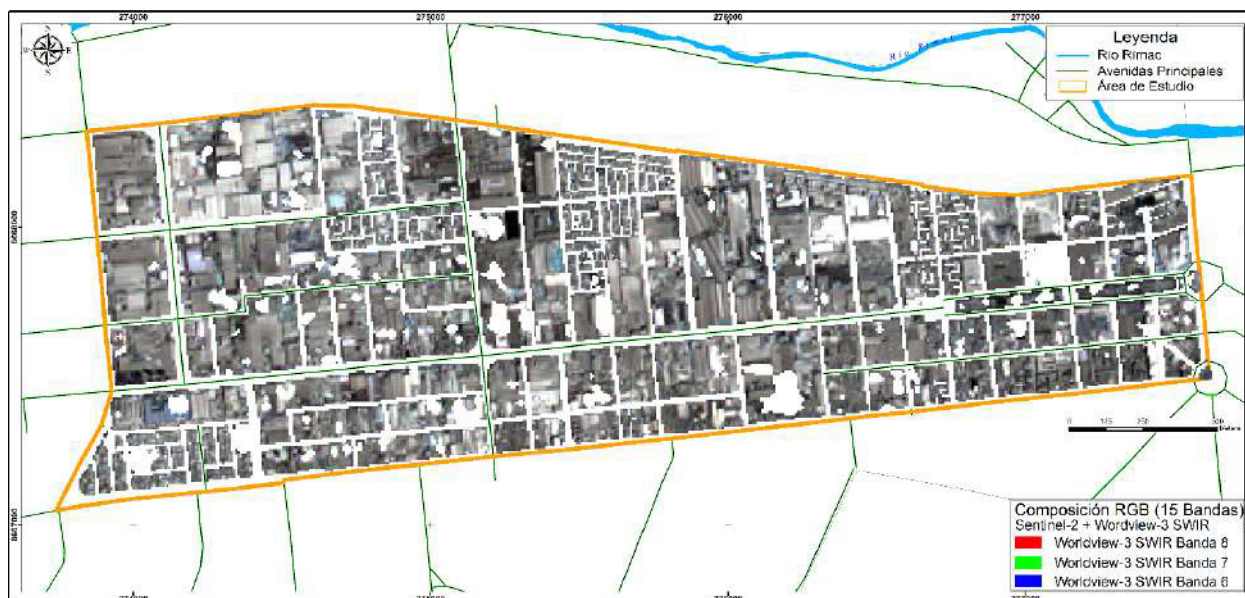
Máscara Total



Nota. Elaboración propia. Fuente ICL, IGN

4.4.6.10 Aplicación de Máscara Total

A la imagen compilada elaborada a partir de las imágenes (Sentinel-2 y WorldView-3 de 15 bandas); se le aplicó la máscara total. Esta escena enmascarada es el insumo utilizado en la presente investigación a partir del cual se aplicó el análisis espectral y posterior clasificación de la cobertura, como se muestra en la Figura 27.

Figura 27*Imagen Enmascarada*

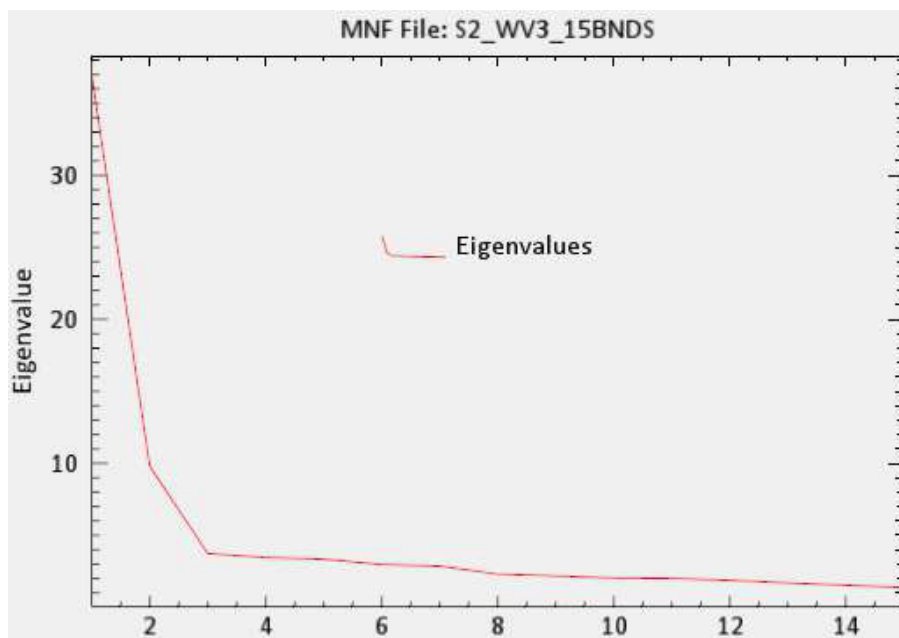
Nota. Elaboración propia. Fuente ICL, IGN

4.4.6.11 Reducción de Dimensionalidad de los Datos con MNF

La transformación MNF se utiliza para determinar la dimensionalidad de los datos, segregar el ruido y reducir los requisitos computacionales para el procesamiento. A partir de la imagen en reflectancia de 15 bandas de Sentinel-2 y WorldView-3 se realizó la transformación MNF en valores propios con el fin segmentar el espacio de datos en dos sectores: una de identificar los componentes principales de la imagen y la otra identificar las imágenes dominadas por el ruido. Los resultados de la transformación MNF se muestran en la Figura 28 la cual ilustra la distribución de los datos transformados en el espacio MNF. En el gráfico, se representan las 15 bandas en unidades MNF a lo largo del eje X, mientras que en el eje Y se observan sus valores propios donde las primeras bandas retienen información preclasificada, y las últimas bandas contienen el ruido que puede interferir en el análisis.

Figura 28

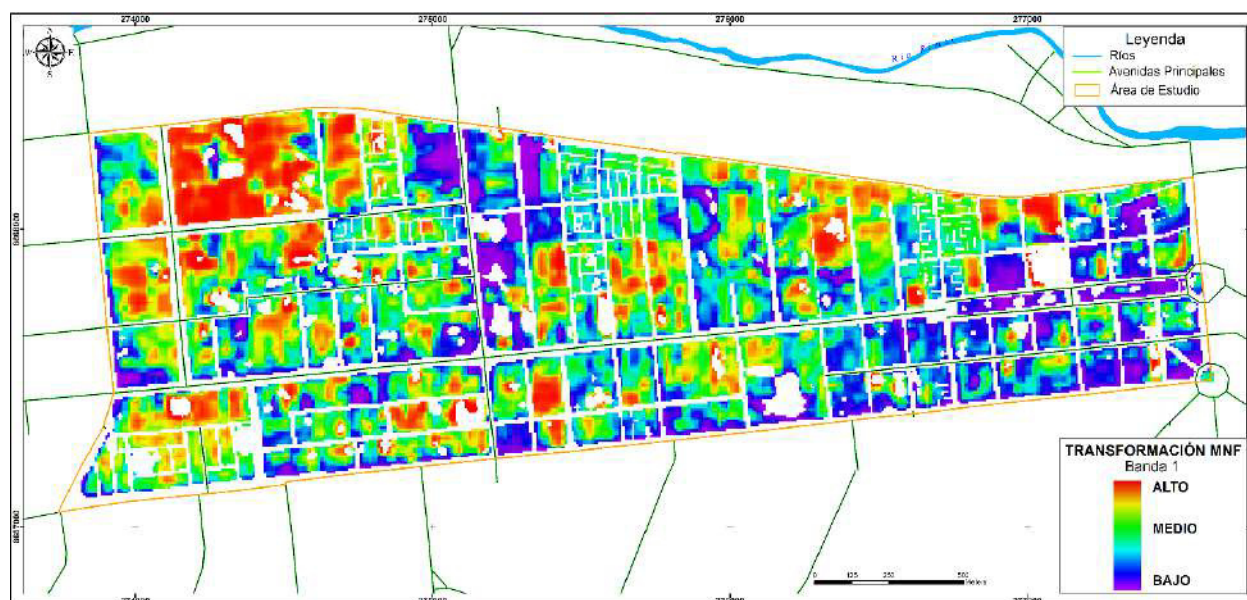
Distribución de los datos MNF de la imagen S2 y WV-3



Nota. Fuente: Elaboración propia, software ENVI

Una vez convertidos los datos en valores propios MNF, se identifican las bandas que serán utilizadas para la clasificación MTMF, seleccionando las primeras 5 bandas (1-5) donde se identificó la información preclasificada de los componentes principales de la imagen, y segregando de esta manera las siguientes 10 bandas (6-15) asociadas al ruido, minimizando así su influencia en el procesamiento y análisis de datos.

La Figura 29 nos brinda una visión de la banda 1 MNF, que muestra información preclasificada, en sus valores propio y asociados a sus componentes principales y la Figura 30 muestra la banda 15 MNF, que muestra una imagen dominada por el ruido.

Figura 29*Banda 1 MNF**Nota. Elaboración Propia***Figura 30***Banda 15 MNF**Nota. Elaboración Propia*

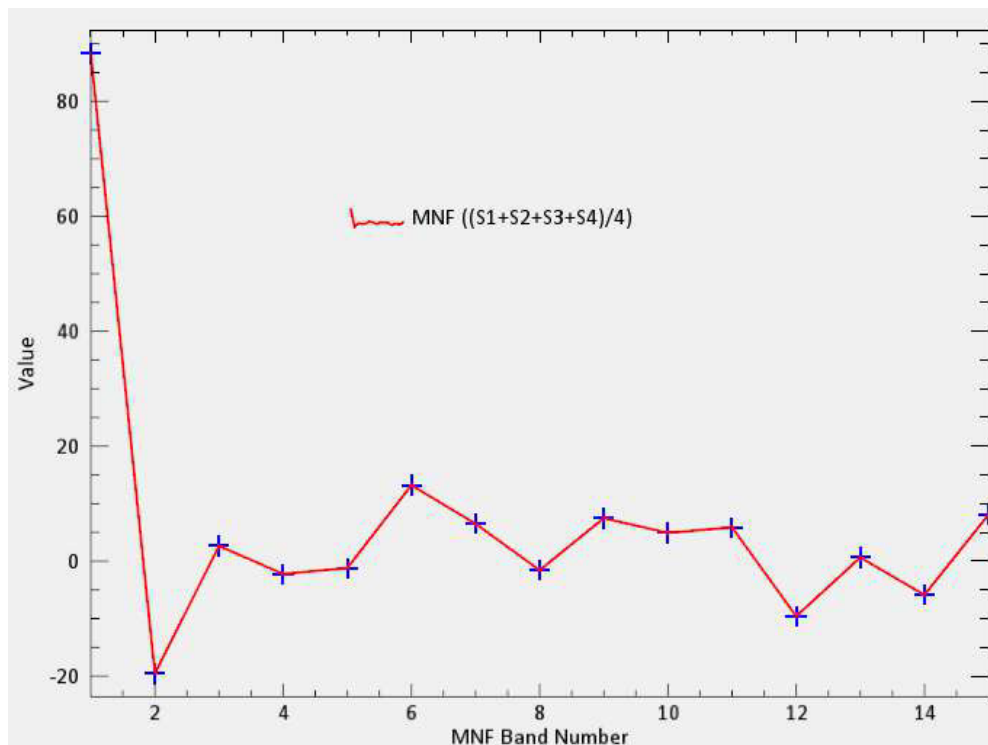
4.4.6.12 Transformación MNF de la firma espectral fibrocemento con asbesto

A partir de la firma espectral del techo de fibrocemento con asbesto, se realizó la transformación MNF. Esta transformación se basó en la estadística generada a partir de la imagen MNF. El resultado de este proceso es una firma espectral perfectamente alineada con las bandas MNF y sus correspondientes valores propios. La Figura 31 proporciona una visualización de la firma espectral del fibrocemento con asbesto en el espacio MNF.

De esta manera se tiene identificado la firma espectral objetivo que será procesado como el “píxel puro” en la escena y será el filtro de coincidencia (MF) en la imagen MNF.

Figura 31

Firma espectral de Fibrocemento con Asbesto al espacio MNF



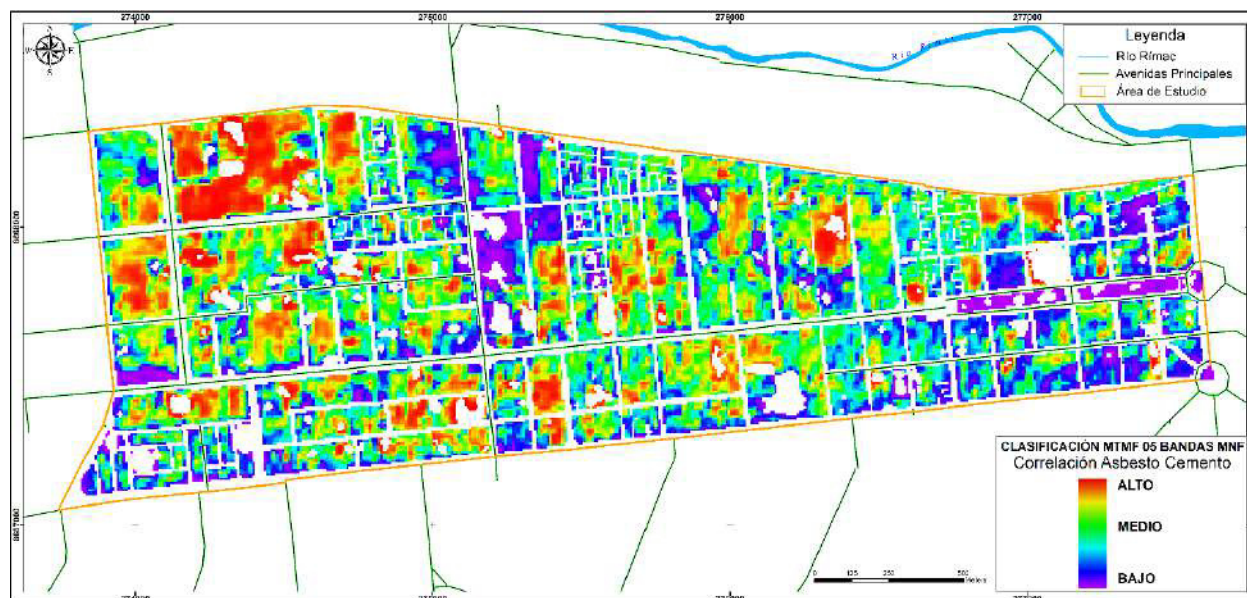
Nota. Elaboración Propia

4.4.6.13 Clasificación MTMF para identificar la abundancia del Asbesto

La clasificación MTMF se desarrolló a partir de la imagen MNF seleccionando las primeras 5 bandas MNF, y la firma espectral del techo con asbesto transformada al espacio MNF, como filtro de coincidencia. Este proceso permite descomponer espectralmente los datos y mapear con precisión la abundancia aparente del techo con asbesto en presencia de un fondo compuesto, explicado en el ítem 2.2.1.21.

Como resultado de este proceso, se generó el Mapeo Espectral con la Clasificación MTMF, que se presenta en la Figura 32 (Ver anexo de mapas: M13_C_25M). En esta representación, se observa un mapeo homogéneo y coberturas suaves, en las cuales los colores se asignan en función de la correlación gradual con el espectro de referencia del techo de fibrocemento con asbesto.

Los datos de los píxeles están en función de la abundancia con el filtro objetivo donde los valores máximos se acercan al color rojo, lo que indica una alta correlación con el techo de fibrocemento con asbesto, mientras que el verde representa valores intermedios y el azul sugiere una baja correlación.

Figura 32*Clasificación MTMF, con 5 bandas MNF**Nota.* Elaboración Propia

4.4.7. Análisis estadístico

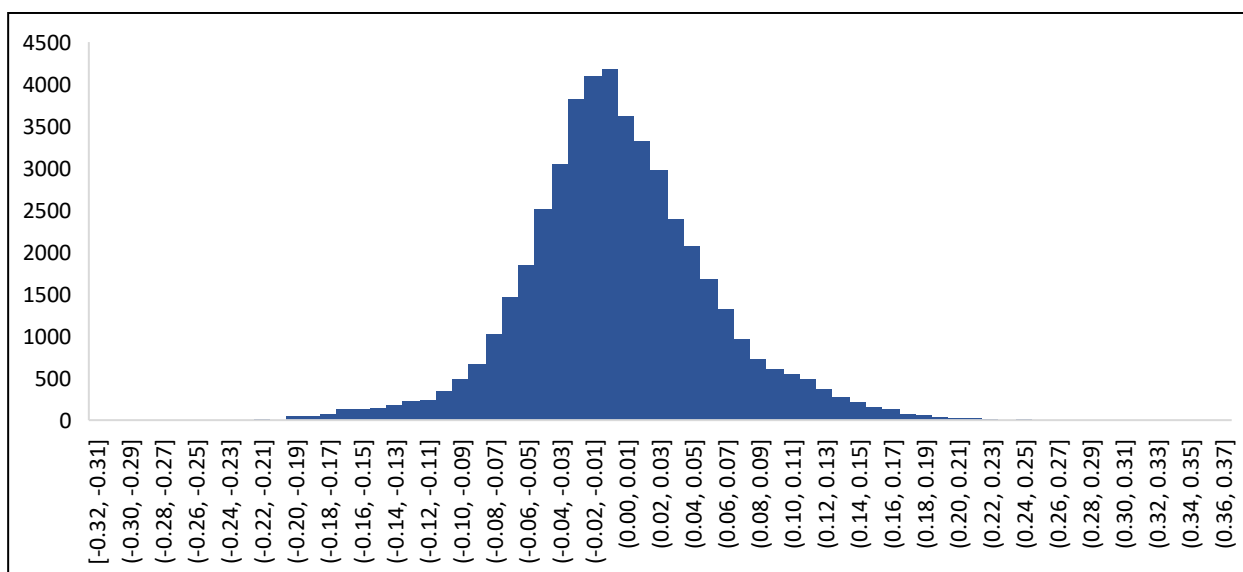
A partir de la clasificación MTMF en el área de estudio, se realizaron las medidas y términos fundamentales estadísticos para describir y analizar el conjunto de datos, del cual se determinó como tamaño de muestra estadística, a los valores de los píxeles de la imagen MTMF, que son un total de 46 750 píxeles, siendo el valor mínimo de -0.32068232, el máximo de 0.36455426 y un promedio cercano a cero, que es de -0.000000000000984. Para el cálculo de la variabilidad, se aplicó la desviación estándar (S), utilizando la fórmula $S = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{(n-1)}}$, donde “n” representa el tamaño de la muestra y $\bar{x}$ es el promedio, teniendo como resultado 0.05697981. Estas medidas y términos fundamentales estadísticos están resumidos en la Tabla 23:

Tabla 23*Medidas y términos fundamentales estadísticos*

Medidas Estadísticas	Valores Estadísticos
Cantidad de píxeles (tamaño de muestra)	46 750 píxeles
Valor Mínimo	-0.32068232
Valor Máximo	0.36455426
Promedio	0
Desviación Estándar	0.05697981

Nota. Fuente: Elaboración: Propia

Además, se representó los valores cuantitativos del conjunto de píxeles de la imagen MTMF en un Histograma para graficar la distribución de los datos y la ubicación del centro. Se seleccionó 0.01 como ancho del rango, graficando una distribución normal en forma de campana, cuya característica en su simetría es que las frecuencias comienzan bajas, luego aumentan a frecuencias altas y luego disminuyen a frecuencias bajas, como se visualiza en la Figura 33:

Figura 33*Histograma MTMF**Nota.* Fuente: Elaboración: Propia

4.4.7.1 Identificación de Asbesto

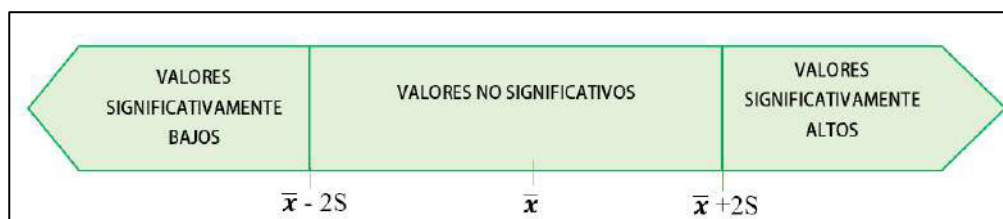
Para la identificación del Asbesto en los techos de fibrocemento se aplicó herramientas estadísticas en función de la desviación estándar para determinar los valores significativos.

Según Triola (2018), señala que en una distribución normal se cumple una regla práctica la cual aproximadamente el 95% de los valores muestrales se ubican dentro de dos desviaciones estándar (S) respecto de la media ($\bar{x}$). De este principio parte la regla práctica del rango para identificar valores significativos, ver Figura 34:

- Los valores significativamente bajos son $\bar{x} - 2S$ o inferiores.
- Los valores significativamente altos son $\bar{x} + 2S$ o superiores.
- Los valores no significativos están entre $\bar{x} - 2S$ y $\bar{x} + 2S$.

Figura 34

Regla Práctica para valores significativos



Nota. Fuente: Triola (2018)

A fin de identificar los píxeles con presencia de asbesto en los techos de fibrocemento, se utilizó una variación de la regla práctica de valores significativos, donde se asumió el rango a partir del promedio más una desviación estándar hasta el límite máximo, [$\bar{x}+S$; Límite máx.]; este criterio estadístico se aplicó para identificar los píxeles que se encuentran próximos a los valores significativamente altos, y tener un mejor desarrollo espacial y visual. Esto, debido la importancia de las características físicas del fibrocemento, la dispersión y distribución de sus partículas en el ambiente por erosión o remoción de techos.

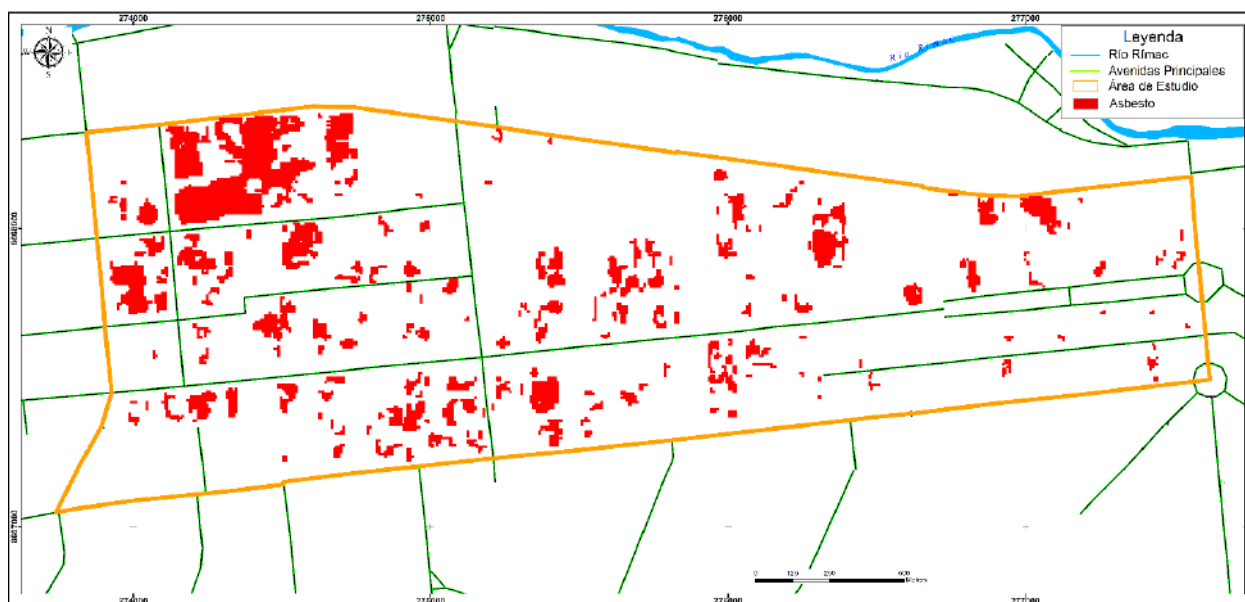
Para descartar píxeles aislados y considerando el tamaño de un techo industrial, se optó por realizar un tamizado, que consiste en filtrar píxeles vecinos igual o mayor a 3.

Píxeles con asbesto $[\bar{x}+S; \text{Limite máx.}] = [0.17093943; 0.36455426]$

Para identificar las coberturas con asbesto en el área de estudio, se realizó la distribución geográfica, como se muestra en la Figura 35 (ver anexo de mapas: M14_IA_25M).

Figura 35

Mapa Identificación con Asbesto



Nota. Fuente: Elaboración Propia

Además, se clasificó el contenido de la abundancia de los píxeles con presencia de asbesto en tres niveles: bajo, medio y alto. Esta clasificación nos permitió identificar los píxeles que tienen mayor abundancia en contenido de asbesto.

Píxeles con contenido Bajo: $[\bar{x}+S; \bar{x}+2S] = [0.05697981; 0.11395962]$

Píxeles con contenido Medio: $[\bar{x}+2S; \bar{x}+3S] = [0.11395962; 0.17093943]$

Píxeles con contenido Alto: $[\bar{x}+3S; \text{Limite máx.}] = [0.17093943; 0.36455426]$

Esta clasificación se encuentra resumida por la sumatoria de píxeles, áreas y porcentajes, explicado en la Tabla 24. Donde el 74% es de contenido bajo, y los valores significativamente altos se clasifican en contenido medio con 21% y contenido alto con 4%.

Tabla 24

Clasificación de Fibrocemento con Asbesto

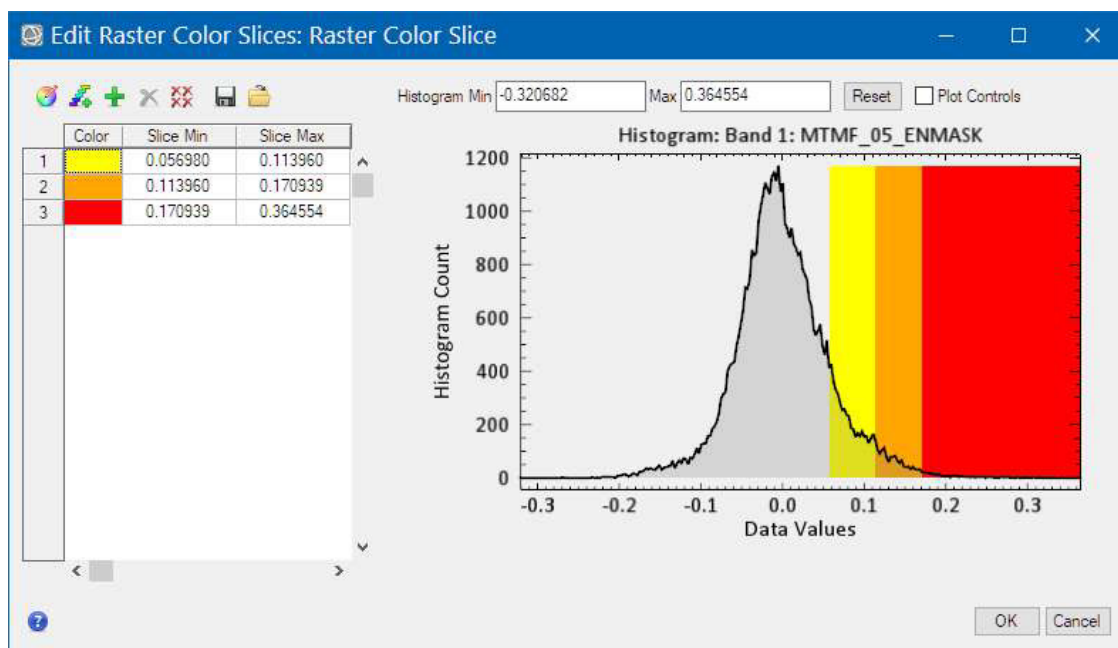
Clasificación	Suma Píxeles	Área (m ²)	Porcentaje %
Bajo	4,649	261,506.25	74%
Valores significativamente Altos			
Medio	1,342	75,487.50	21%
Alto	272	15,300.00	4%
Total	6,263	352,293.75	100%

Nota. Elaboración Propia

A su vez se agregó el histograma con la clasificación en el aplicativo ENVI usando los rangos estadísticos de bajo, medio y alto explicados en la Figura 36.

Figura 36

Histograma: Clasificación de Fibrocemento con Asbesto

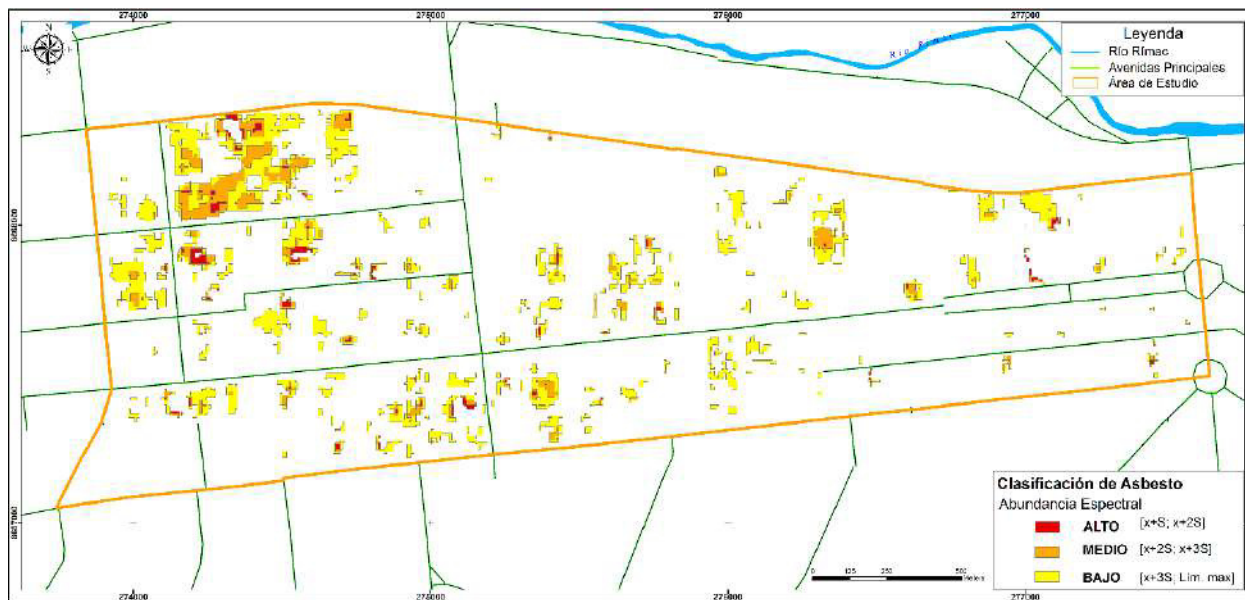


Nota. Elaboración Propia

Para identificar la clasificación de estos rangos en el área de estudio, se realizó la distribución geográfica visualizado en la Figura 37 (Ver anexo de mapas: M15_IAC_25M)

Figura 37

Mapa de clasificación de Fibrocemento con Asbesto



Nota. Elaboración Propia

4.4.7.2 Matriz de Confusión

La matriz de confusión constituye un recurso fundamental para evaluar el desempeño de un clasificador. Esta matriz permite cuantificar la eficacia del modelo en la clasificación de datos, y facilita la comparación de las predicciones del clasificador con los valores reales o fuentes de información adicionales. En su estructura, las columnas reflejan las clases verdaderas, mientras que las filas representan las predicciones realizadas por el clasificador (ENVI, 2022).

Para verificar el grado de precisión en la identificación del asbesto, se utilizó un escenario hipotético basado en fuentes de información como: (i) una visita técnica limitada por el ángulo de visión hacia los techos (ver Fotos 3,4,5 y 6), (ii) imágenes satelitales de alta resolución espacial del software Google Earth al año 2017 y (iii) la ortofoto de Lima al año 2012. Se identificó techos de calamina de fibrocemento, asumiendo que estas coberturas contienen asbesto con un grado de confiabilidad del 100%. Se vectorizó, identificándose 56 polígonos que se transformaron en un formato ráster con una resolución de píxeles de 7.5 metros para la correcta comparación con nuestro clasificador MTMF, resultando un total de 2 522 píxeles.

Del análisis de la matriz de confusión se demostró que 1 963 píxeles fueron clasificados correctamente, representando un 77.84% de confiabilidad. Sin embargo, también se detectaron 559 píxeles que debieron ser clasificados como techos de fibrocemento representando un 22.16%, lo que equivale a un error de falso positivo en la clasificación, representado en la Tabla 25.

La manera de certificar el contenido de asbesto en una superficie es recolectar muestras y llevarlas a laboratorio para confirmar su identificación. Debido a esta limitación presentamos este escenario hipotético, para visualizar la precisión del modelo.

Foto 3*Techo de Fibrocemento 1***Foto 4***Techo de Fibrocemento 2***Foto 5***Techo de Fibrocemento 3***Foto 6***Techo de Fibrocemento 4*

Nota. Elaboración propia

Tabla 25*Matriz de Confusión*

Matriz Confusión	Píxeles con asbesto	Techos (%)	Techos (Área m ²)
Clasificación MTMF	1 963	77.84%	110 419
Sin Clasificar	559	22.16%	31 444
Total	2 522	100.00%	141 863

Nota. Elaboración propia

Esta métrica de error es esencial para evaluar la eficacia de la metodología propuesta y mejorar el proceso de detección del asbesto en los techos.

CAPÍTULO V

5. RESULTADOS

- i. **Desarrollar una metodología mediante técnicas de teledetección que permita identificar la distribución geográfica del asbesto en techos, en el área industrial y urbana del distrito de Lima.**

La presente investigación desarrolló una metodología para la identificación de coberturas de fibrocemento con contenido de asbesto mediante técnicas de teledetección, integrando análisis espectral aplicado a imágenes multiespectrales. El enfoque metodológico constituye una adaptación del modelo conceptual Spectral Hourglass Workflow, reorganizado hacia un esquema de detección dirigida (target detection), en el cual la identificación del material se fundamenta en una firma espectral conocida previamente medida en campo. El procedimiento se estructuró en ocho fases secuenciales. Ver figura 38.

Previo a la secuencia metodológica se realizó el análisis espectral del asbesto a partir de literatura científica, identificando su comportamiento espectral característico. Dicho análisis evidenció que la absorción espectral del asbesto se manifiesta en la longitud de onda de $2.327\ \mu\text{m}$, dentro de la región correspondiente a la banda SWIR, la cual abarca esta longitud de onda y registra una absorción espectral en $2.330\ \mu\text{m}$. Estos resultados permitieron sustentar la selección de la imagen WorldView-3 SWIR (8 bandas, 7.5 m de resolución espacial) como fuente principal de información, así como definir un ámbito de estudio de carácter industrial, donde el mayor tamaño de las coberturas contribuye a minimizar la mezcla espectral a nivel de píxel y mejorar la detectabilidad del material.

1. Obtención de la firma espectral del fibrocemento con asbesto.

Se midió directamente la reflectancia de una muestra representativa de fibrocemento con asbesto, obteniendo la firma espectral objetivo que actúa como patrón de comparación en todo el análisis.

2. Reflectancia de la imagen WorldView-3 y Sentinel-2

La imagen satelital WorldView-3 fue procesada mediante las diferentes correcciones con el fin de obtener reflectancia de superficie comparable con la firma medida.

3. Compilación espectral.

Las 8 bandas SWIR de WorldView-3 se integraron a las 7 bandas del sensor Sentinel-2 para complementar la información espectral, generándose una imagen compilada de 15 bandas que mejoró la capacidad de discriminación del material en diferentes rangos del espectro.

4. Elaboración de máscaras.

Se elaboró y aplicó máscaras de exclusión para eliminar coberturas que pudieran introducir ruido espectral o interferencias en el análisis, tales como vegetación, vías urbanas, superficies con óxidos dominantes y áreas fuera del ámbito de estudio. Esta depuración permitió focalizar el procesamiento en superficies con mayor probabilidad de corresponder a cubiertas de fibrocemento, reduciendo la variabilidad no relevante.

5. Transformación MNF de la imagen

Posteriormente, se aplicó la transformación Minimum Noise Fraction (MNF) para disminuir la dimensionalidad y separar la señal útil del ruido, reduciendo la información de 15 bandas originales a 10 componentes con alta relación señal-ruido.

6. Firma espectral en MNF

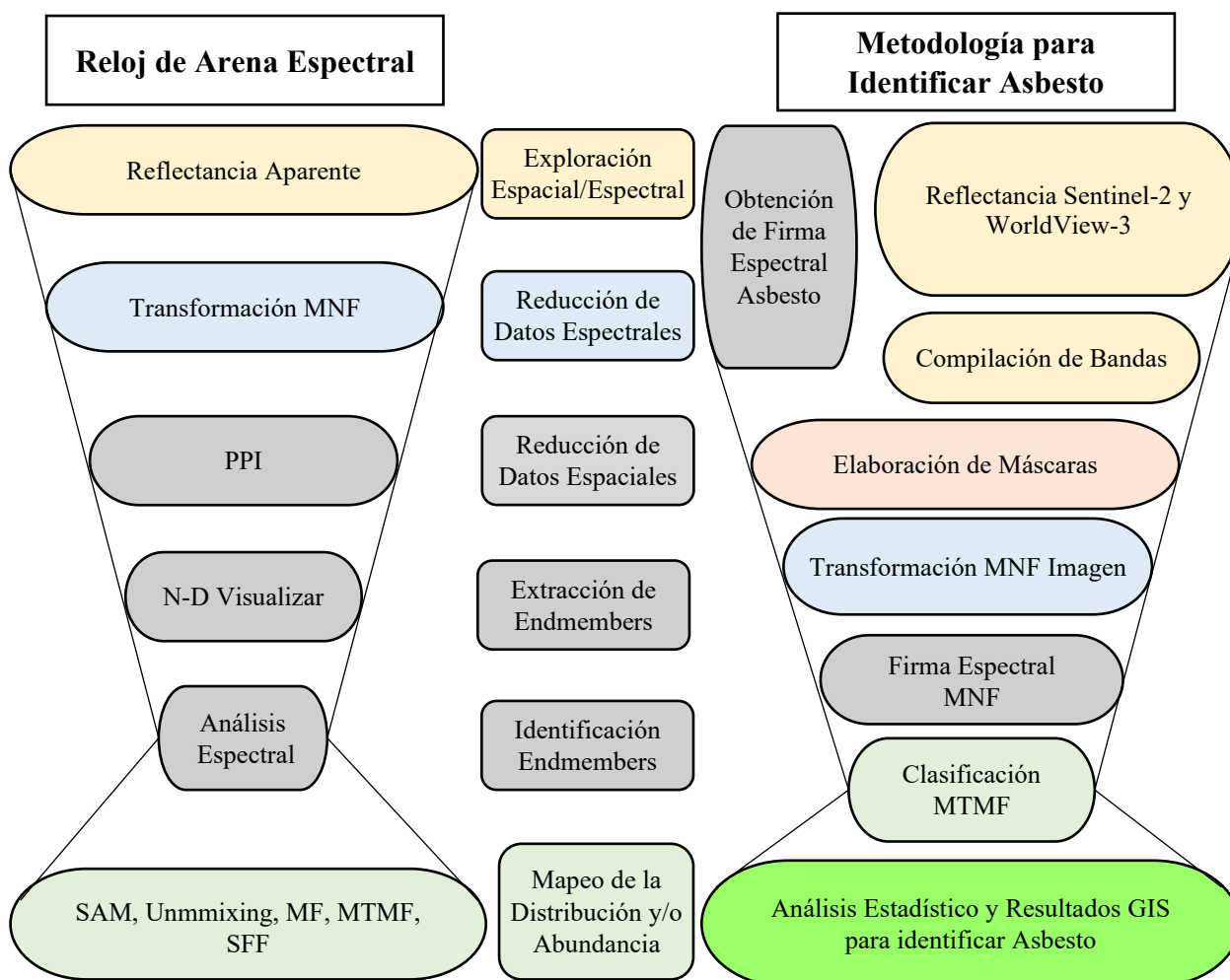
La firma espectral objetivo fue proyectada al espacio MNF, garantizando coherencia matemática entre los datos de la imagen y el patrón espectral de referencia, lo que optimiza los procesos posteriores de detección.

7. Clasificación mediante Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF).

Se empleó el algoritmo MTMF para detectar la presencia relativa del material objetivo en píxeles espectralmente mezclados, generándose imágenes de abundancia que representan el grado de similitud con la firma espectral del asbesto. Los valores altos de respuesta fueron interpretados como una mayor probabilidad de presencia del material en las coberturas analizadas, permitiendo su identificación espacial dentro del área de estudio.

8. Análisis estadístico y resultados GIS

Los resultados de abundancia fueron evaluados mediante análisis estadístico basado en la distribución normal para establecer umbrales objetivos de clasificación y discriminar niveles de coincidencia espectral, tras lo cual las detecciones se integraron en un entorno SIG, permitiendo su análisis espacial sobre la base catastral, la cuantificación de superficies afectadas, la estimación de lotes con cubiertas de fibrocemento con asbesto y la elaboración de una zonificación de peligro según la intensidad de la respuesta espectral.

Figura 38*Metodología para Identificar Asbesto Comparativo**Nota:* Elaboración Propia.

ii. Determinar el tipo de imagen satelital que nos permita identificar asbesto en techos en el área industrial y urbana del distrito de Lima.

Se determinó que la imagen del satélite WorldView-3, espectralmente en la banda infrarroja de onda corta SWIR (canal – 2.330 μm), es la más adecuada para la identificación del asbesto en techos en el área industrial y urbana del distrito de Lima, esto debido a la absorción

espectral del asbesto en la longitud de onda de $2.327\ \mu\text{m}$ y por la resolución espacial de 7.5 metros para detectar techos industriales.

iii. Demostrar la relación de las técnicas de teledetección con la identificación del asbesto en techos en el área industrial y urbana del distrito de Lima.

Se demostró la relación de las técnicas de teledetección a partir de una muestra de fibrocemento con asbesto certificada mediante análisis microscópico de polarización realizado en los laboratorios de Carbotech AG en Zúrich, Suiza, cuyo método utilizado es el ensayo para determinar asbesto en materiales de construcción⁶, y su firma espectral obtenida en el laboratorio de teledetección del INGEMMET, siendo esta firma la base para relacionar la identificación del asbesto en la imagen satelital WorldView-3 mediante la aplicación de algoritmos de clasificación y análisis espectral, logrando detectar con precisión las áreas con presencia de asbesto.

iv. Identificar la distribución espacial del asbesto en el área industrial y urbana del distrito de Lima para futuras evaluaciones.

Se logró identificar la distribución espacial del asbesto en el área industrial y urbana del distrito de Lima, a partir del muestreo de 96 lotes, que abarcan $1\,323\,298\ \text{m}^2$ de superficie.

Este análisis se desarrolló mediante la superposición de estos lotes y los píxeles identificados con contenido de asbesto, resultando: (i) la identificación de lotes potencialmente contaminados con asbesto y (ii) la clasificación de los lotes según la abundancia de asbesto.

Identificación de lotes potencialmente contaminados con asbesto.

Mediante la superposición de datos, se identificaron píxeles con contenido de asbesto en la muestra abarcando una superficie de $260\,414\ \text{m}^2$ lo que equivale al 20% del total de la muestra.

⁶ U.S EPA/600/R-93/116

Posteriormente, se presenta la consolidación de los resultados en la Tabla 26 y la distribución cartográfica en la Figura 39 (Ver anexo de mapas: M17_MA_25M).

Tabla 26

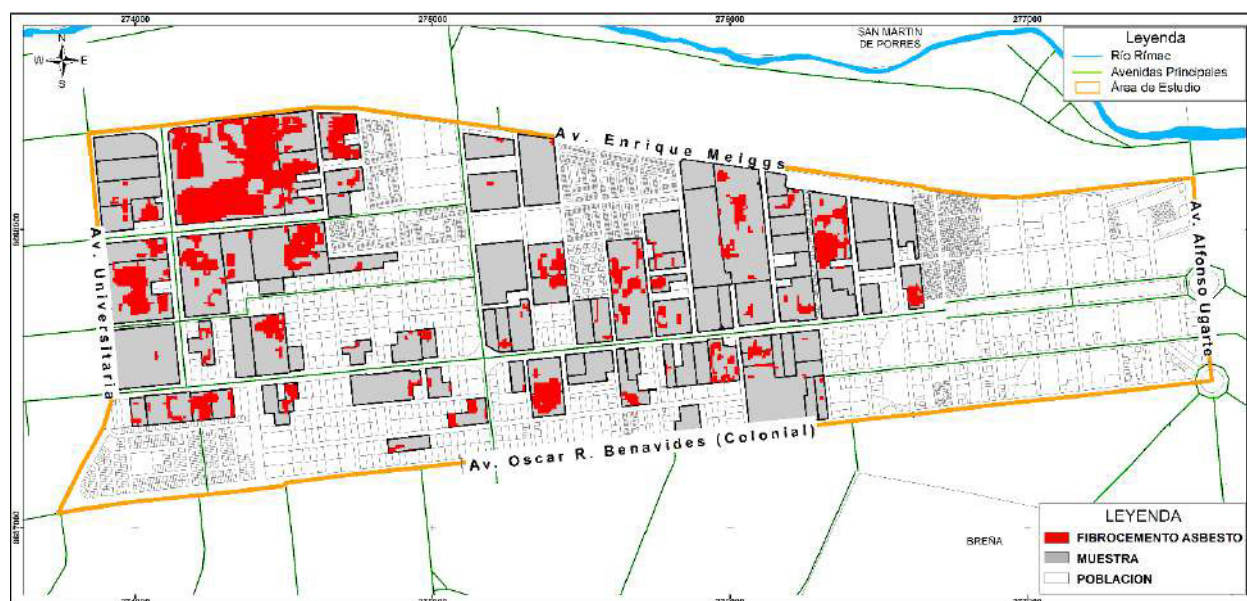
Píxeles con Asbesto identificados en la muestra

Cobertura	Área (m ²)	Porcentaje
Con Asbesto	260 414	20%
Sin Asbesto	1 062 884	80%
Total	1 323 298	100%

Nota. Elaboración propia

Figura 39

Píxeles con Asbesto identificados en la muestra

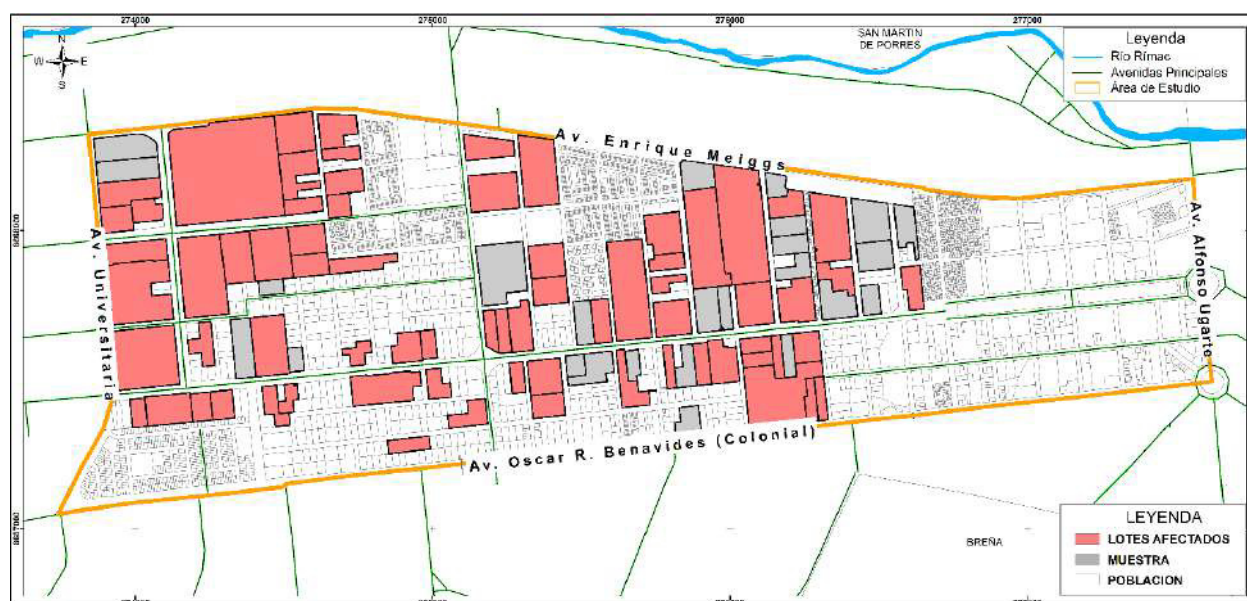


Nota. Elaboración propia

En esa sentido, se identificaron los lotes potencialmente contaminados con asbesto, lo que significa que se contabilizaron aquellos que contienen al menos un píxel con presencia de este material, sumando un total de 71 lotes afectados. Esto representa el 74% del total de la muestra. Posteriormente, se presenta la consolidación de los resultados en la Tabla 27 y la distribución cartográfica en la Figura 40 (Ver anexo de mapas: M18_LA_25M).

Tabla 27*Lotes con Asbesto identificados en la muestra*

Cobertura	Lotes	Lotes Porcentaje	Área (m ²)	Área Porcentaje
Con Asbesto	71	74%	1 081 294	82%
Sin Asbesto	25	26%	242 004	18%
Total	96	100%	1 323 298	100%

Nota. Elaboración propia**Figura 40***Lotes con Asbesto identificados en la muestra**Nota.* Elaboración propia

Clasificación de los lotes según la abundancia de asbesto.

A partir de los píxeles identificados con presencia de asbesto, se aplicó una clasificación estadística, como se describe en el ítem 4.5.1, categorizando la abundancia en tres niveles: baja, media y alta. Posteriormente, se realizó la superposición con la muestra, obteniéndose la distribución espacial de estos píxeles, con una abundancia alta del 1%, media del 5% y baja del

14%. A continuación, se presenta el resumen de los resultados en la Tabla 28 y la distribución cartográfica en la Figura 41 (Ver anexo de mapas: M19_MAC_25M).

Tabla 28

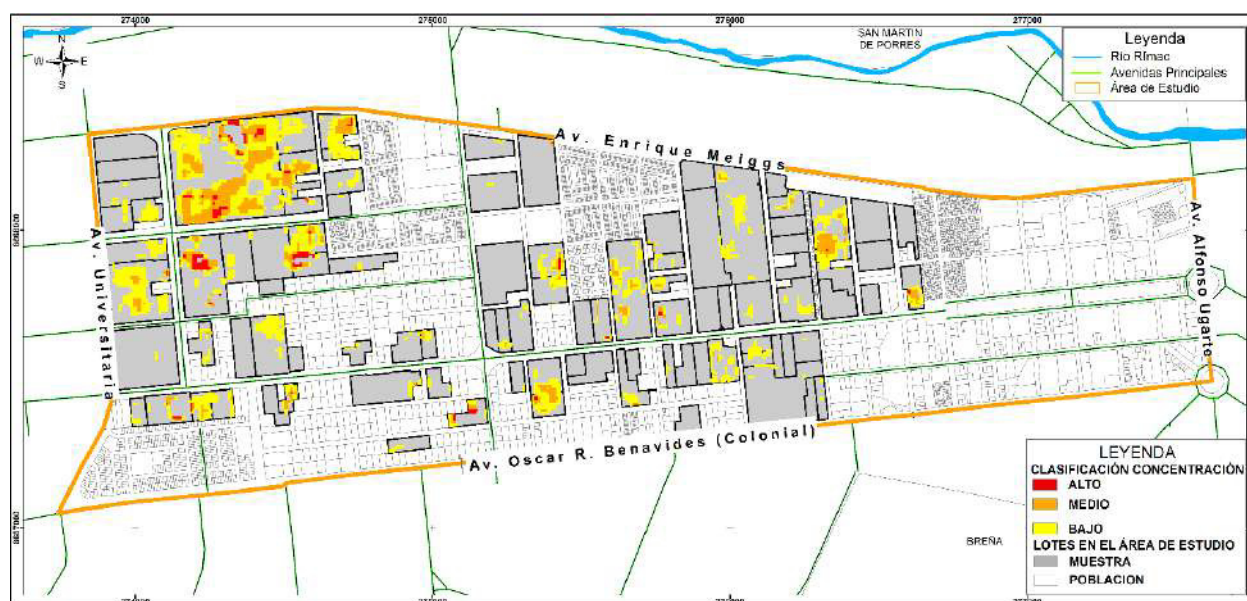
Píxeles clasificados con Asbesto en la muestra

Clasificación	Área (m ²)	Porcentaje
Bajo	183 879	14%
Medio	65 604	5%
Alto	10 931	1%
Vacio	1 062 884	80%
Total	1 323 298	100%

Nota. Elaboración propia

Figura 41

Lotes con Asbesto en la muestra



Nota. Elaboración propia

Previo a la clasificación de los lotes según la abundancia de asbesto, se realizó una jerarquización, asignando prioridad a los píxeles de alto contenido, luego a los de contenido medio y por último a los de contenido bajo. La clasificación de los lotes se llevó a cabo de la siguiente manera: si un píxel priorizado afectaba un lote, este se clasificaba según el nivel de dicho píxel. En caso de que

no hubiera píxeles de un nivel priorizado en ese lote, se avanzaba al siguiente nivel en la jerarquía. Este proceso se repitió hasta que los 71 lotes afectados en la muestra fueran clasificados.

Finalmente, la muestra fue clasificada en 21 lotes con alta abundancia de asbesto, 21 lotes con abundancia media y 29 lotes con abundancia baja. Estos resultados permiten cuantificar los lotes afectados dentro del área de estudio, proporcionando a los tomadores de decisiones una herramienta para evaluar el grado de contaminación potencial por inhalación de asbesto en las construcciones. Asimismo, facilitan la valoración de futuros cambios en la zonificación del distrito y su impacto en la salud pública.

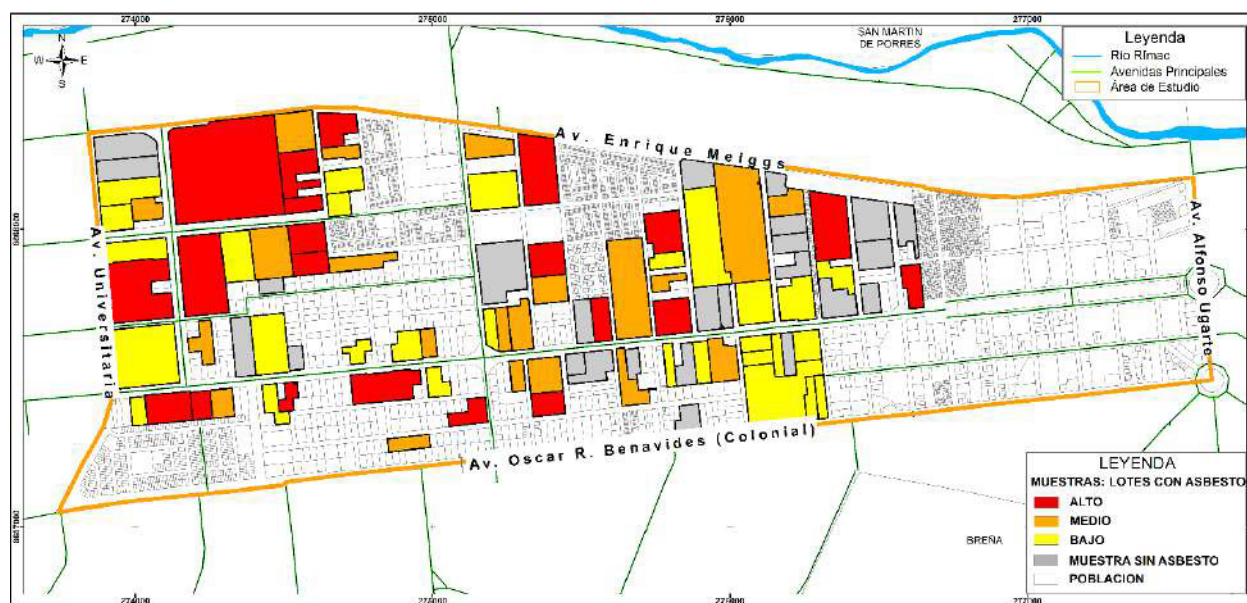
La Tabla 29 presenta un resumen de los resultados obtenidos, mientras que la Figura 42 muestra su distribución cartográfica. (Ver anexo de mapas: M20_LAC_25M).

Tabla 29

Clasificación de Asbesto en la muestra

Clasificación	Lotes	Lotes Porcentaje	Área (m ²)	Área Porcentaje
Bajo	29	30%	366 239	28%
Medio	21	22%	280 509	21%
Alto	21	22%	434 546	33%
Vacio	25	26%	242 004	18%
Total	96	100%	1 323 298	100%
Total, Afectado	71	74%	1 081 294	82%

Nota. Elaboración propia

Figura 42*Lotes con Asbesto en la muestra**Nota. Elaboración propia*

6. DISCUSIONES

La investigación de Basile et al (2012), titulada “Métodos para identificar techos en fibrocemento a través de datos remotos”, logró identificar al asbesto con una precisión del 97% teniendo como imagen el sensor MIVIS (Espectrómetro multiespectral de imágenes infrarrojas y visibles) con una resolución espectral 102 bandas y una resolución espacial de 3 metros por píxel, además de utilizar la técnica MNF y la clasificación MTMF. En la presente investigación, a pesar de tener una resolución espectral de 8 bandas SWIR de WorldView-3 más 7 bandas del Sentinel-2 compiladas y 7.5 metros por píxel, también se utilizaron las técnicas MNF y MTMF, llegando a un 78% de precisión en los resultados. Esto demuestra que, aunque la resolución espectral y espacial influyen en la precisión de la detección, es viable identificar techos con asbesto utilizando diferentes fuentes de imágenes satelitales y técnicas de clasificación.

Según la información de Sotelo (1969), en la investigación “Industria de la Fabricación de Productos de Asbesto-Cemento”, se explica las características del asbesto cemento, su aplicación en la industria de la construcción, y los productos que se elaboraban en la fábrica de Eternit, además contiene una base histórica del uso de asbesto en el Perú. Mediante esta información se pudo verificar que, en el área de estudio, existen techos fabricados con productos de asbesto cemento, además se pudo visualizar que hay una gran variedad de techos de fibrocemento caracterizados por su forma, color, tamaño, y modo de instalación. Dada la antigüedad de estos materiales, muchos de los techos se encuentran cubiertos por partículas de polvo, hollín y otros contaminantes, lo que altera su apariencia y modifica la respuesta espectral al ser analizados mediante técnicas de teledetección.

A partir de la investigación de Casas et al. (2016), donde se aplicó la técnica de clasificación de minerales mediante el método MTMF y complementado con mediciones

espectrales obtenidas a través del espectrorradiómetro FieldSpec 4 Hi-Res para medir firmas espectrales de minerales. Adaptando esta metodología, a partir de la muestra obtenida de fibrocemento con asbesto y la imagen satelital SWIR de WorldView-3, realizando la medición de la firma espectral en el laboratorio del INGEMMET y posteriormente clasificándola, se demostró que es posible realizar una clasificación mediante este método en zonas urbanas.

Uno de los aportes para la presente investigación en materia de salud pública proviene de la investigación de Accinelli, y López (2017), titulada “El Asbesto una epidemia todavía por controlar”, donde se demuestra que el asbesto es responsable de causar diversos tipos de neoplasias y enfermedades fibrosantes, por lo que se pone de manifiesto la urgencia de legislar la prohibición definitiva de todos los tipos de asbesto en el Perú, ya que las normas internacionales están en la línea de prohibir todos los tipos de asbesto que existen. Revisando nuestro marco legal actual se ha podido verificar que existen vacíos e incongruencias y una evasión de responsabilidad de las autoridades, ya que hasta la fecha no existe un plan de retiro seguro de techos con fibrocemento, como está planificado en el País de Polonia según el “*Programa de Eliminación de Asbesto en Polonia para los años 2009-2032*” que incluso lo priorizan como política de Estado, mencionado en Ksiazek, J (2014).

De igual manera Torres Roman, et al (2020) en la investigación “Estudio geográfico de la mortalidad por mesotelioma en el Perú y su evolución”, analizan la incidencia del mesotelioma en el país durante el período 2005-2014, reportando 430 muertes (242 hombres y 188 mujeres) por cada 1 000 000 habitantes. Con los resultados obtenidos en el área de estudio se evidencia la necesidad de implementar un registro de las personas que residen en áreas con alta exposición al asbesto. Esto es crucial debido a la ejecución de proyectos inmobiliarios en antiguas áreas industriales, ahora residenciales, que generan grandes cantidades de residuos de construcción.

El registro permitirá monitorear posibles casos de cáncer y enfermedades relacionadas, facilitando la detección temprana de patologías. Además, contribuirá a la concientización pública sobre los riesgos del asbesto y promoverá medidas preventivas para evitar muertes por inhalación de sus fibras.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

La presente investigación logró desarrollar una metodología basada en la adaptación del método Hourglass o Reloj de Arena, aplicado a imágenes multiespectrales mediante técnicas de teledetección, demostrando que es posible identificar la distribución geográfica del asbesto en techos dentro del área de estudio.

La metodología, sintetizada en la Figura 38, se organiza en una secuencia estructurada de ocho fases interrelacionadas: (1) obtención de la firma espectral del asbesto como patrón de referencia; (2) generación de reflectancia de superficie a partir de las imágenes Sentinel-2 y WorldView-3; (3) compilación e integración de bandas; (4) elaboración de máscaras para excluir coberturas no relevantes; (5) aplicación de la transformación MNF a la imagen para reducir ruido y dimensionalidad; (6) proyección de la firma espectral al espacio MNF para garantizar consistencia analítica; (7) clasificación mediante el algoritmo MTMF para estimar la abundancia relativa del material; y (8) análisis estadístico e integración en entorno SIG para la validación espacial y la generación de resultados cartográficos de identificación de asbesto.

Esta secuencia metodológica, de carácter progresivo y convergente, permitió pasar de un análisis espectral amplio a una detección específica del material, asegurando un proceso sistemático, reproducible y aplicable a otros contextos urbanos o industriales con problemáticas similares.

Luego de una revisión bibliográfica sobre el comportamiento espectral del asbesto y la identificación de sus rasgos característicos, se concluyó que la imagen más adecuada para la detección de asbesto es la proporcionada por el satélite WorldView-3 espectralmente en la banda infrarroja de onda corta SWIR, ya que cuenta con 8 bandas de longitudes de onda que van desde

1.210 μm hasta 2.330 μm , este rango espectral coincide con el canal característico asociado al asbesto, cuyo rasgo distintivo es la absorción en la longitud de onda de 2.327 μm . Además, esta imagen cuenta con una resolución espacial de 7.5 metros de píxel lo que permitió detectar techos industriales en el área de estudio, debido al efecto de mezcla espectral generado por la heterogeneidad de materiales dentro de un mismo píxel, se optó por seleccionar coberturas con áreas de techos mayores a 4 000 m^2 , con el propósito de obtener firmas espectrales más homogéneas y reducir la ocurrencia de falsos positivos en zonas con alta mixtura espectral. En ese sentido, la muestra de estudio se concentró principalmente en áreas industriales, debido a la mayor extensión y continuidad espacial de sus coberturas de techo.

Se logró demostrar que la relación entre las técnicas de teledetección y la identificación del asbesto se da en base a la firma espectral obtenida de una muestra de fibrocemento con asbesto certificada, a partir de la cual se siguieron los procedimientos para lograr la metodología propuesta mediante la aplicación de algoritmos de clasificación y análisis espectral, logrando una precisión del 77.84% de píxeles que coinciden entre la clasificación del modelo y las observaciones realizadas.

En la presente investigación se ha logrado identificar la distribución espacial del asbesto en el área industrial y urbana del distrito de Lima, determinando una extensión de 352 294 m^2 con presencia de asbesto. A través de una superposición entre los píxeles identificados con asbesto y los 96 lotes de la muestra, se encontró que 260 414 m^2 , equivalente al 20% de píxeles identificados, afectan a un total de 71 lotes.

Además, se llevó a cabo la clasificación de estos lotes en función de la abundancia de asbesto, estableciendo una jerarquía de prioridades que permitió identificar 21 lotes con alta

abundancia, 21 lotes con abundancia media y 29 lotes con abundancia baja, lo que representa un área total de 1 081 294 m².

Finalmente, los resultados indican que la mayoría de los lotes identificados con alta abundancia de asbesto se concentran en el noroeste del área de estudio, específicamente entre las avenidas Universitaria y Enrique Meiggs. Este cuadrante destaca por su elevado riesgo ante posibles remociones de techos, especialmente considerando la cambiante zonificación y el uso del suelo para nuevos proyectos de vivienda. Por lo tanto, se resalta la necesidad de una atención prioritaria y la implementación de medidas preventivas para proteger a la población y mitigar los riesgos asociados a la exposición al asbesto.

7.2 Recomendaciones

Se recomienda contar con una biblioteca espectral que incluya todos los tipos de fibrocemento con asbesto, dado que este material, al exponerse, puede sufrir alteraciones al interactuar con otros elementos y al paso del tiempo. Esta investigación solo contó con una muestra certificada, por lo que se sugiere realizar iteraciones con otras muestras y verificar los resultados obtenidos.

Se recomienda recoger muestras de las áreas afectadas, especialmente aquellas con alta abundancia, siguiendo los protocolos adecuados. Estas muestras deben ser llevadas al laboratorio para verificar y certificar la presencia de asbesto, ya que actualmente este es el único método con un 100% de efectividad, validado por la EPA.

Se recomienda aplicar esta metodología utilizando imágenes con mayor resolución espectral, espacial y radiométrica, dado que en esta investigación se tuvo la limitación de contar con solo 8 bandas SWIR y una resolución espacial de 7.5 metros por píxel, lo que impidió la clasificación de techos en áreas urbanas o lotes pequeños. En un escenario futuro, se recomienda

aplicar la metodología propuesta mediante el uso de vehículos RPAS por sus siglas en ingles Remotely Piloted Aircraft Systems o vehículos aéreos no tripulados equipados con sensores multiespectrales que incorporen bandas del espectro SWIR.

Se recomienda compartir los resultados con las autoridades para impulsar políticas de prevención y el retiro seguro de materiales de fibrocemento, ya que estos representan una amenaza para la salud pública en caso de sismos, incendios de gran magnitud o la remoción inadecuada de dichos materiales sin el debido procedimiento, dado que las fibras de asbesto están clasificadas como cancerígenas por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer.

Finalmente, tras la revisión del marco normativo vigente, se recomienda la modificación de la Ley N.º 29662 y su reglamento, con el fin de establecer la prohibición definitiva del uso de asbesto crisótilo, dado que constituye la variedad más empleada en la industria de la construcción. Asimismo, se sugiere impulsar la formulación de un plan nacional para el retiro progresivo del asbesto en todas sus formas, garantizando así la protección de la salud pública y del medio ambiente.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Libros

Chuvieco, E. (1996). Fundamentos De La Teledetección Espacial. MADRID: Tercera Edición. EDICIONES RIALP, S.A

Chuvieco, E. y Congalton, R.G. (1988): Using clúster analysis to improve the selection of training statics in classifying remotely sensed data, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 54, pp. 1275-1281

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación. México D.F.: McGraw-Hill.

Muñoz, P (2013). Apuntes de Teledetección: Índices de Vegetación. Centro de Información de Recursos Naturales (Chile). Disponible en: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/26389>

Núñez, R., Chuvieco, E., Sancho, J., Palou, F. y Casas, J.M. (1983): Mapa de usos del suelo de la región central. Estudio piloto sobre la aplicación del tratamiento de imágenes Landsat a la confección de mapas de usos del suelo, Geographica, vol. 25, pp. 61-78

Documentos de Referencia

Agencia Espacial Europea (ESA), 2017. Marco Teórico Teledetección. Disponible en: <http://www.esa.int/>

Anderson, G. P., Pukall, B., Allred, C. L., Jeong, L. S., Hoke, M., Chetwynd, J. H. Matthew, M. W. (1999). FLAASH and MODTRAN4: state-of-the-art atmospheric correction for hyperspectral data. In 1999 IEEE Aerospace Conference. Proceedings (Cat. No.99TH8403) (pp. 177–181 vol.4). IEEE. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/AERO.1999.792088>.

APN - Administración de Parques Nacionales - Sistema de Información de Biodiversidad (APN – SIB). 2005. Protocolo para el preprocesamiento de imágenes satelitales Landsat para aplicaciones de la administración de parques nacionales. Buenos Aires – Argentina. 21 p.

Asociación frente al Asbesto AFA-PERT. Problema De Salud Pública Necesidad De Prohibición Total. Disponible en: <https://docplayer.es/1550649-Asbesto-problema-de-salud-publica-necesidad-de-prohibicion-total.html>

Casas, J; Gonzales, K; Cutipa, M; Torres, V (2015). Clasificación de Minerales Utilizando imágenes Satelitales ASTER. Revista Institucional INGEMMET. N° 27. Pag 11.

Casas, J; Gonzales, K; Cutipa, M; Zarate, H & Orozco, Y. (2016). Tecnologías hiperespectrales en la identificación y cartografiado de minerales de alteración hidrotermal. INGEMMET. XVIII Congreso Peruano de Geología

Curran, P. J. (1985). Principles of Remote Sensing. Longman.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente - PNUMA. (1992). Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación.

Disponible en:
<https://www.basel.int/portals/4/basel%20convention/docs/text/baselconventiontext-s.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2023). Convenio de Rotterdam sobre el procedimiento de consentimiento fundamentado previo aplicable a ciertos Plaguicidas y productos químicos peligrosos objeto de comercio internacional. Disponible:

<https://www.pic.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/1048/language/es-ES/Default.aspx>

Organización Internacional del Trabajo (1986). Convenio sobre la utilización del asbesto en condiciones de seguridad (núm. 162). Disponible en: https://www.ilo.org/dyn/normlex/es/f?p=NORMLEXPUB:51:0::NO:51:P51_CONTENT_REPOSITORY_ID:2533752

Cuba, V (24 de agosto de 2012). Asbesto en el Perú: Un problema global de repercusiones nacionales. Salud Pública y Sociedad. Disponible en: <http://victorcuba.pe/2012/asbesto-en-el-peru-un-problema-global-de-repercusiones-nacionales-2/>

Organización Internacional del Trabajo (OIT). Posición de la OIT respecto a la seguridad en la utilización del asbesto. Disponible en: https://www.ilo.org/global/topics/safety-and-health-at-work/areasofwork/occupational-health/WCMS_360578/lang--es/index.htm

Organización Mundial de la Salud (OMS), 2006. Eliminación de las enfermedades relacionadas con el amianto. Disponible en: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/69481/WHO_?sequence=1

Organización Mundial de la Salud. Asbesto crisólito. OMS (2015). Departamento de Salud Pública, Medio Ambiente y Determinantes Sociales de la Salud. (PHE)

ENVI Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guid; 2009.

Green, A. A., Berman, M., Switzer, P., and Craig, M. D., (1988), A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 26, no. 1, p. 65-74.

Hoffer, R.M y Fleming, M.D. (1978): Mapping vegetative cover by computer-aided analysis of satellite data, LARS Technical Report 011178, Purdue.

Hoffer, R.M. y Swain, P.H. (1980): Computer processing of satellite data for assessing agriculture, forest, and rangeland resources, en Proc. 14th Intern. Soc. of Photog., Hamburg, pp 437-446.

International Agency for Research on Cancer. IARC, (1987). Monograph on the Evaluation of Carcinogenic risks of Humans. Pg. 40. Disponible en: <https://monographs.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/06/Suppl7.pdf>

Jensen, J. R. (2015). Introductory digital image processing: A remote sensing perspective (4th ed.). Pearson Education.

Justice , C. O. y Townshend, J.R.G (1981): The use of Landsat data for land cover inventories of Mediterranean lands, en Terrain Analysis and Remote Sensing (J.R.G. Townshend, Ed), George Allen & Unwin, London, pp. 135-153.

Kuester, M. (2016) Hoja de datos y especificaciones técnicas WorldView-3. Maxar Technologies. Disponible en: https://dg-cms-uploads-production.s3.amazonaws.com/uploads/document/file/207/Radiometric_Use_of_WorldView-3_v2.pdf

Lachowski, H. M. y Dietrich D. L. (1978): Landsat assisted forest inventory of the Philippine Islands, en Proc. 12th Intern. Symp. Rem. Sen. Of Environment, Ann Arbor, pp. 1401-1405

Lillesand, T.M. & Kiefer, R.W. (2015) Remote Sensing and Image Interpretation. 7th Edition, Wiley, New York.

Mather, P.M. (1987) Computer Processing of Remotely Sensed Images: an introduction, Chichester: Jhon Wiley. 360 pp.

Mitchell, E; Tapley, I; Milne, A; Lowell, K; Mitchell, C; Tapley, I.,Held, A. (2012). Tasmania National Demonstrator Rdar processing methodologies for the generation of wall-to-wall mosaics Prepared by IFCI Reserch Alliance wall to wall mosaics, /.

Perkins, R, Harvey, B, Laboratorio, U.S. Environmental Protection Agency (1993). Method for the Determination of Asbestos in Bulk Building Materials, EPA/600/R-93/116.

Perkins, T., Adler-Golden, S., Matthew, M., Berk, A., Anderson, G., Gardner, J., & Felde, G. (2005). Retrieval of atmospheric properties from hyper and multispectral imagery with the FLAASH atmospheric correction algorithm. In K. Schäfer, A. Comerón, J. R. Slusser, R. H. Picard, M. R. Carleer, & N. I. Sifakis (Eds.) (p. 59790E). Disponible en: <https://doi.org/10.1117/12.626526>

QI, J.; Chehbouni, AL.; Huete, A.R.; Kerr, Y. H. y Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index (MSAVI). Remote Sensing of Environment 48:119-126.

Richards, J. A., & Jia, X. (2006). Remote Sensing Digital Image Analysis. Springer.

Sigmur. (2006). Universidad de Murcia. SIG y Teledetección. Murcia-España [publicación en línea]. Disponible en: <https://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/teledete.html>

Suzuki, S. (2014). Advanced Land Observing Satellite-2 (ALOS-2) DAICHI-2. Disponible en: http://global.jaxa.jp/projects/sat/alos2/pdf/daichi2_e-pdf

U.S. Department of Health and Human Services (2001). Toxicological Profile for Asbestos. Agency for Toxic Substances and Disease Registry-ATSDR. Washington, DC: U.S. Department of Health and Human Services. Disponible en: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp61.pdf>

Virta, R. L. (2003). Asbestos: Geology, Mineralogy, Mining, and Uses. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Open-File Report 02-149. Disponible en: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/asbestos/>

Virta, R. L. (2006). Worldwide Asbestos Supply and Consumption Trends from 1900 through 2003. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Open-File Report 03-083. Disponible en: <https://pubs.usgs.gov/circ/2006/1298/>

Virta, R. L. (2009). Worldwide Asbestos Consumption Trends from 2003 through 2007. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Open-File Report 03-083. Disponible en: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/asbestos-statistics-and-information>

Artículos Científicos

Accinelli A. R, & López L. M (2017). El Asbesto una epidemia todavía por controlar. Gaceta Sanitaria, 31(5), 365-367. Instituto de Investigaciones de la Altura, Universidad Peruana Cayetano Heredia, Lima, Perú. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2017.02.011>

ALOS Data Users Handbook. Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). Marzo del 2008. Disponible en: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/fdata/ALOS_HB_RevC_EN.pdf

Basile Giannini, M; Creta, T; Guglietta,D; Merola, P; & Allegrini, A. (2012) Methodologies to identify asbestos-cement roofing by remote data. Revista Europea de Teledetección. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/263697494_Methodologies_to_identify_asbestos-cement_roofing_by_remote_data

Boardman, J. W., and Kruse, F. A., (1994). Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada: in Proceedings, ERIM Tenth

Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI, pp. I-407 - I-418.

Boardman, J.W. (1998). Leveraging the high dimensionality of AVIRIS data for improved sub-pixel target unmixing and rejection of false positives: Mixture Tuned Matched Filtering. In: Proceedings of the 7th Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, JPL Publication 97-1, pp. 55. Pasadena, CA.

Boardman, J. W., and Kruse, F. A., (2011). Analysis of Imaging Spectrometer Data Using N-Dimensional Geometry and a Mixture-Tuned Matched Filtering Approach. Disponible en: DOI:10.1109/TGRS.2011.2161585

Bruneau, M. y Gautier B. (1981): Cartographie diachronique de l'occupation du sol en milieu tropical densement peuplé (Thaïlande), en 4eme Coll. Inter. du GDTA, Toulouse, pp 230-240

Cilia, C; Panigada, C; Rossini, M; Candiani G; Pepe, M; & Colombo, R. (2015). Mapping of Asbestos Cement Roofs and Their Weathering Status Using Hyperspectral Aerial Images. Revista internacional de información geográfica. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijgi4020928>.

Collegium Ramazzini, (1999). Call for an international ban on asbestos. American Journal of Industrial Medicine. Disponible en: [https://www.collegiumramazzini.org/download/6_SixthCRStatement\(1999\).pdf](https://www.collegiumramazzini.org/download/6_SixthCRStatement(1999).pdf)

Frassy, F; Dalla Vía, G; Maianti, P; Marchesi, A; Rota Nodari, F & Gianinetto, M (2013) Minimum Noise Fraction Transform for Improving the Classification of Airborne Hyperspectral Data: Two Case Studies. Conference paper. Disponible en: DOI: 10.1109/WHISPERS.2013.8080626

Frassy, F; Candiani, G; Rusmini, M; Maianti, P; Marchesi, A; Rota Nodari, F; Dalla Via, G; Albonico, C & Gianinetto, M (2014). Mapping Asbesto-Cemen Roofing with Hyperspectral Remote Sensing over a Large Mountain Region of the Italian Western Alps. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs12030408>

Gilabert M. A., Gonzalez – Piqueiras J., García-Haro J. (1997). Acerca de los Índices de Vegetación, en Revista de teledetección N° 8 Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/39195330_Acerca_de_los_indices_de_vegetacion

Hananiah Z, & Aremu, S (2019). Asbestos: A Silent Potent Killer. Revista Europea de Medio Ambiente y Salud Pública 3(2), em0030. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/335564540_Asbestos_A_Silent_Potent_Killer

Krówczyńska, M; Raczko, E; Staniszevska, N; & Wilk, E. (2019). Asbestos—Cement Roofing Identification Using Remote Sensing and Convolutional Neural Networks (CNNs). Revista Sensores Remotos. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs12030408>

Ksiazek, J (2014). Methods for Detection of Asbestos-Cement Roofing Sheets. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.7494/geom.2014.8.3.59>

Stayner, L; Smith, R; Bailer, J; Gilbert, S; Steenland, K; Dement, J; Brown, D & Lemen, R (1997). Exposure-response analysis of risk of respiratory disease associated with occupational exposure to chrysotile asbestos. Occupational and Environmental Medicine. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1128838/pdf/oenvmed00093-0022.pdf>

Szabo, S; Burai, Peter; Kovács, Z & Szabó, G (2014). Testing algorithms for the identification of asbestos roofing based on hyperspectral data. Revista de Ingeniería y Gestión ambiental. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.7494/geom.2014.8.3.59>

Torres-Roman JS, Gomez-Rubio V, Sanchez-Trujillo L, et al. (2020). Estudio geográfico de la mortalidad por mesotelioma en el Perú y su evolución. *Cáncer Epidemiology*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.canep.2020.101791>

Tesis

Cango, L. (2017). Evaluación de Modelos Digitales de Elevación usando datos LiDAR e imágenes satelitales. Universidad Técnica particular de Loja Ecuador. Disponible en: <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/20.500.11962/20778>

Gonzaga, C. (2014). Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la Caracterización de la Cobertura Vegetal en la Zona Centro de la Provincia De Loja, Ecuador. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina. Disponible en: <https://doi.org/10.35537/10915/34487>

Sotelo, Roberto (1969). Tesis: Industria De La Fabricación De Productos De Asbesto-Cemento. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú.

Base legal

Congreso de la República del Perú. (2000). Ley General de Residuos Sólidos (Ley N.º 27314).

Congreso de la República del Perú. Ley N.º 29662. Ley que prohíbe el asbesto anfíboles y regula el uso del asbesto crisótilo; 2011.

Instituto Geográfico Nacional. Resolución Jefatural N.º 087-2020/IGN/DIG/SDNGC que establece como Marco de Referencia Geodésico Oficial a la Red Geodésica Peruana de Monitoreo Continuo (REGPMOC).

Ministerio de Salud. Directiva N.º 002-2016-EF/50.0. RD N.º 024-2016-EF/50.01. Anexo 2 contenido del programa presupuestal 0024 prevención y control del cáncer.

Ministerio de Salud. Norma técnica de salud que establece el Listado de Enfermedades Profesionales. Aprobado por RM N.º 048-2008-MINSA; 2008

Ministerio de Salud. Reglamento de la Ley que prohíbe el asbesto anfíboles y regula el uso del asbesto crisótilo. Aprobado por DS N.º 028-2014-SA; 2014

Ministerio de Salud (2005). Aprueba el Reglamento sobre Valores límites Permisibles para Agentes Químicos en el ambiente de Trabajo. (Decreto Supremo N.º 015-2005-SA)

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2013). Aprueba el Reglamento de Gestión y Manejo de los Residuos de las Actividades de la Construcción y Demolición. (Decreto Supremo N.º 003-2013-Vivienda)

Ministerio del Ambiente. (2017). Reglamento de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos N°1278. (Decreto Supremo N.º 014-2017-MINAM.)

Perú. (1993). Constitución política del Perú. Artículo 6 y Artículo 67.

Presidencia del Consejo de Ministros (1993). Prevención y control del cáncer profesional (Decreto Supremo N.º 093-93-PCM).

Presidencia de Consejo de Ministros (2004). Reglamento de la Ley General de Residuos Sólidos (Decreto Supremo N.º 057-2004-PCM).

ANEXOS

Costos y Presupuesto:

Cotización Imagen Satelital WordView-3, 8 Bandas SWIR



GEOMATICA SOLUCIONES S.A.C.
 RUC: 20543041139
 DIRECCION: JR. LLOQUE YUPANQUI 7154, LIMA 39
 TELEFONO: 037-0170 / FAX: 037-0171

COTIZACION: GEOSOL/055-2017

Dirigida a:	Ximena Nongrados Córdova	Fecha:	21/06/2017
Producto:	Imagen Satelital Digital Globe Estéreo	Vencimiento:	21/07/2017
Atención:	Ximena Nongrados Córdova		

ITEM	PRODUCTO	DESCRIPCIÓN	CANT. KM ²	TOTAL
1	DG	Imagen satelital WorldView-3 de Catalogo Constelación Digital Globe Bandas: SWIR-1: 1195 - 1225 nm SWIR-2: 1550 - 1590 nm SWIR-3: 1640 - 1680 nm SWIR-4: 1710 - 1750 nm SWIR-5: 2145 - 2185 nm SWIR-6: 2185 - 2225 nm SWIR-7: 2235 - 2285 nm SWIR-8: 2295 - 2365 nm Fecha de toma: 22/02/2017 Resolución espacial: 7.5 metros Cobertura de nubes: 0% Formato: GEOTIF Tiempo de entrega: No mayor de 15 días	25	776.25

Los precios están expresados en dólares americanos y NO incluyen el 18% de I.G.V.

Nota: El área mínima de pedido de imagen de catalogo es de 25 kilometros cuadrados, usando poligono de lados mínimos de 3 kilometros.

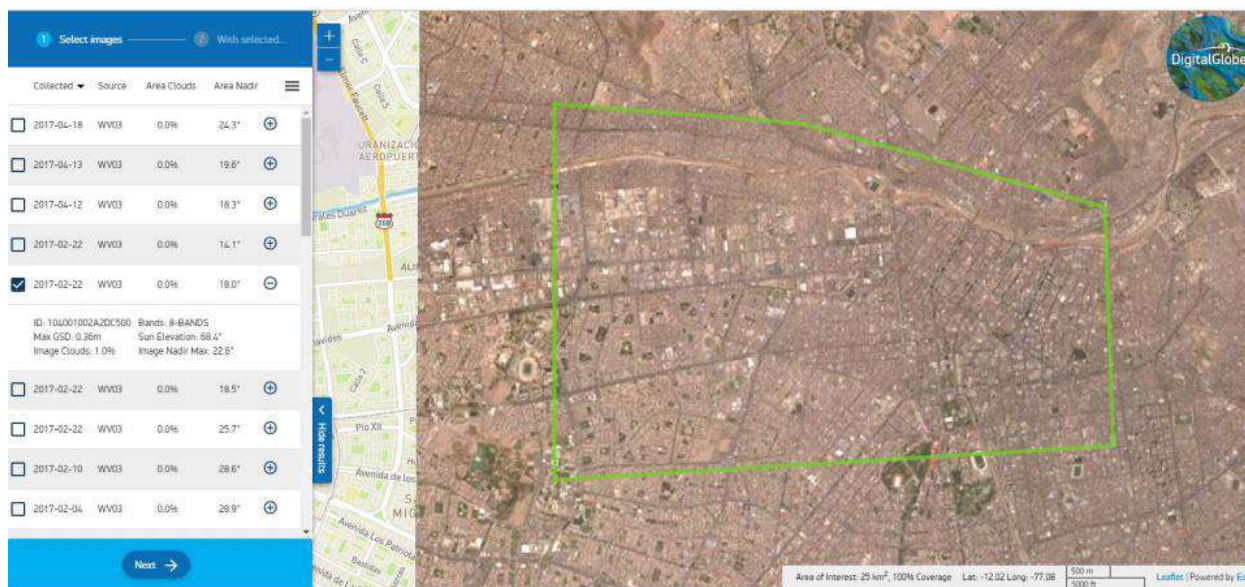
Forma de pago: Adelanto del 70% y saldo contraentrega. Tipo de cambio vigente en la web de SUNAT a la fecha de emisión de la Orden de Servicio.

Datos para el depósito:

Banco	Cuenta Corriente	Moneda	CCI
Banco de Crédito del Perú	192-1947100-0-76	Nacional	00219200194710007630
Banco de Crédito del Perú	192-1906006-1-95	Extranjera	00219200190600619539

informes@geomaticasoluciones.com

Características de la compra Imagen Satelital



The screenshot displays a satellite image selection interface. On the left, a sidebar contains a list of images with columns for 'Collected', 'Source', 'Area Clouds', and 'Area Nadir'. The selected image is from 2017-02-22, with a source of WV03, 0.0% area clouds, and 18.0° area nadir. Below the list, technical details for the selected image are provided: ID: 10x001002A2DC500, Bands: 8-BANDS, Max GSD: 0.36m, Sun Elevation: 88.4°, Image Clouds: 1.0%, and Image Nadir Max: 22.6°. A 'Next' button is at the bottom of the sidebar.

The main area shows a satellite image of a city with a green rectangular area of interest outlined. A map inset on the left shows the location within a larger context. At the bottom right, a scale bar indicates 500 m and 3000 ft, and a status bar shows 'Area of Interest: 25 km², 100% Coverage', 'Lat: -12.02 Long: -77.08', and 'Leaflet | Powered by Esri'.

Collected	Source	Area Clouds	Area Nadir
☐	2017-04-18	WV03	0.0%
☐	2017-04-13	WV03	0.0%
☐	2017-04-12	WV03	0.0%
☐	2017-02-22	WV03	0.0%
☒	2017-02-22	WV03	0.0%
☐	2017-02-22	WV03	0.0%
☐	2017-02-22	WV03	0.0%
☐	2017-02-10	WV03	0.0%
☐	2017-02-04	WV03	0.0%

Technical details for selected image:

- ID: 10x001002A2DC500
- Bands: 8-BANDS
- Max GSD: 0.36m
- Sun Elevation: 88.4°
- Image Clouds: 1.0%
- Image Nadir Max: 22.6°

Map status: Area of Interest: 25 km², 100% Coverage, Lat: -12.02 Long: -77.08, Leaflet | Powered by Esri

Cotización Análisis de Muestra de Asbesto



Lima, 12 de Septiembre 2017

Señores
Oscar Vera Rosales
 Presente.-

Atención: **Ing. Oscar Vera Rosales.**

Asunto: **Cotización para análisis de asbestos en materiales (KLC17060k)**

De mi consideración,

En respuesta a su solicitud, adjunto a continuación la cotización del servicio de análisis de la presencia de asbestos en materiales:

Concepto	Cantidad	Precio en USD
Análisis de la presencia y tipo de asbestos en materiales (según EPA/600, 1993) Incluye sólo análisis de la muestra. No incluye el muestreo ni envío de muestra al laboratorio.	Muestras	
Servicio regular (1 semana)	1	120,00
Servicio express (2 días)		220,00
Total Muestras (sin servicio express)		120,00
Envío de muestras a Suiza Para una cantidad de muestras que no supere los 500g de peso total	<0.5kg	
Envío regular (2 semanas)		85,00
Envío express (1 semana)		200,00
Toma de muestra* Incluye los honorarios del profesional encargado del muestreo, incluyendo los seguros, equipos e implementos necesarios.	0.5 día	122,00
Logística Incluye la preparación y acondicionamiento de las muestras para el envío, incluyendo los equipos y materiales necesarios.	Global	54,00
Informe (1 juego original)* Introducción Informe de la medición y del resultado del análisis en el laboratorio Panel Fotográfico Conclusiones y Recomendaciones	Global	107,00

Resumen:

Concepto	Precio en USD
Análisis de la presencia y tipo de asbesto en materiales	120,00
Envío de muestra a Suiza	85,00
Toma de muestra	122,00
Logística	54,00
Informe con resultados	107,00
Total (Sin IGV)	488,00

**Si el cliente entrega la muestra en la oficina de KLC en Lima, el tamaño de la muestra a entregar es de aprox. 20 gramos (tamaño de una estampilla).*

Consideraciones:

- Los montos están expresados en dólares americanos y no incluyen el IGV.
- El plazo de entrega de los resultados es de tres semanas para servicio normal y 10 días para servicio express, contados a partir de recibida la orden de servicio.
- El precio de la toma de muestra aplica a lugares dentro de Lima Metropolitana.
- De no considerar la toma de muestra, las muestras deben ser entregadas en la oficina de Klepel Consulting SAC.
- Las muestras serán analizadas en nuestro laboratorio **GeoPro de Suiza**. Cada muestra será analizada mediante microscopía de luz polarizada para determinar la presencia de asbesto, cuantificar y calificar el tipo de asbesto según la base del procedimiento semi-cuantitativo desarrollado por la autoridad ambiental de Estados Unidos (**U.S. EPA/600-R-93-116**).
- Nuestro laboratorio GeoPro está participando con éxito en el **"American Industrial Hygiene Association Bulk Asbestos Analytical Testing Program"**, estándar internacional para comprobar la calidad del análisis de Asbesto realizado.

Forma de pago:

- 50% adelantado
- 50% contra entrega del informe con los resultados
- Condiciones de pago: Contra entrega.
- Validez de la propuesta: 15 días calendarios.

Quedamos a su disposición para cualquier consulta.

Atentamente,

Roland Klepel
Gerente General

Resultados de Muestra Negativa de Asbesto



Geopro AG
ZI Pré-Clos
Postfach 48
1852 Roche
Switzerland

Tel. +41 21 960 35 70
Fax. +41 21 960 35 71
www.geopro.ch

Klepel Consulting SAC
Roland Klepel
Grau 412, Miraflores
Lima, Perú

Roche, 18.10.2017

Analysis Report, Determination of asbestos in bulk building materials

Analysis report No.: 7085
Object / reference: Oscar Vera Rosales
No. samples: 1
Sampler: Cliente
Sampling date: -
Sample reception date: 13.10.2017
Analysis date: 18.10.2017

Sample 01: No. 37617	OV-01 Fiber cement - Fibrocemento, Muestra "1" Techo de Almacén	Asbestos not detected
----------------------	--	-----------------------

Analysis method: basis is the semi-quantitative "Method for the determination of asbestos in bulk building materials" (U.S. EPA, 1993). The central element is the polarisation microscopic identification of the asbestos fibers, and the gravimetric sample reduction, by way of low-temperature ashing and acid dissolution. The method allows the asbestos content to be estimated within a range of c. 1 to 100 per cent by weight. An asbestos detection threshold of clearly less than 1 % is possible.

Peter Berner
Dr. rer. nat.

Anexo de Mapas

Mapa 1 Ubicación satelital 1:10 000 (M1_US_10M)

Mapa 2 Ubicación Ortofoto-2012 1:10 000 (M2_U_10M)

Mapa 3 Sectores catastrales Lima 1:10 000 (M3_S_10M)

Mapa 4 Zonificación 1: 10 000 (M4_Z_10M)

Mapa 5 Manzanas y lotes 1:10 000 (M5_MZ_10M)

Mapa 6 Vías Urbanas 1:10 000 (M6_V_10M)

Mapa 7 Ubicación WorldView-3 1: 25 000 (M7_U_25M)

Mapa 8 WorldView-3 Corrección Geométrica y Georreferenciación 1:25,000 (M8_W_25M)

Mapa 9 WorldView-3 Corrección Radiométrica 1:25 000 (M9_W_25M)

Mapa 10 WorldView-3 Corrección Atmosférica 1:25 000 (M10_W_25M)

Mapa 11 Layer Stacking Sentinel-2 + WorldView-3 SWIR 1:25 000 (M11_L_25M)

Mapa 12 Máscara Total 1:25 000 (M12_M_25M)

Mapa 13 Clasificación MTMF con 5 bandas MNF (M13_C_25M)

Mapa 14 Identificación de Asbesto 1:25 000 (M14_IA_25M)

Mapa 15 Identificación de Asbestos Clasificación 1:25 000 (M15_IAC_25M)

Mapa 16 Población y Muestra 1:25 000 (M16_PM_25M)

Mapa 17 Muestra con Asbesto 1:25 000 (M17_MA_25M)

Mapa 18 Lotes con Asbesto 1:25 000 (M18_LA_25M)

Mapa 19 Muestra con Asbesto Clasificación 1:25 000 (M19_MAC_25M)

Mapa 20 Lotes con Asbesto Clasificación 1:25 000 (M20_LAC_25M)