



**ESPE**  
**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**Detección de cambios de cobertura del suelo por incendio forestal en el páramo de  
Mojanda, año 2020, mediante análisis de imágenes satelitales**

Rodríguez Meza, Adrián Gerardo

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Geógrafo y del Medio  
Ambiente

Ing. Kirby Powney, Eduardo Patricio, MSc.

10 de agosto del 2022



RODRÍGUEZ\_ADRIÁN\_TESIS MOJANDA GEE.pdf

Scanned on: 13:59 August 11, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	559
Words with Minor Changes	680
Paraphrased Words	597
Omitted Words	6107





**Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción**  
**Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente**

**Certificación**

Certifico que el trabajo de titulación: *“Detección de cambios de cobertura del suelo por incendio forestal en el páramo de Mojanda, año 2020, mediante análisis de imágenes satelitales”* fue realizado por el señor **Rodríguez Meza, Adrián Gerardo**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

**Sangolquí, 06 de septiembre de 2022**

**Firma:**



Firmado electrónicamente por:  
EDUARDO  
PATRICIO KIRBY  
POWNEY

.....  
**Ing. Kirby Powney, Eduardo Patricio; Mgtr**

C.C.: 0102611811



**Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción**  
**Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente**

**Responsabilidad de Autoría**

Yo, **Rodríguez Meza, Adrián Gerardo**, con cédula de ciudadanía n° 1722975958, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: ***“Detección de cambios de cobertura del suelo por incendio forestal en el páramo de Mojanda, año 2020, mediante análisis de imágenes satelitales”*** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

**Sangolquí, 06 de septiembre de 2022**

**Firma:**

**Rodríguez Meza, Adrián Gerardo**

C.C.: 1722975958



**Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción**  
**Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente**

**Autorización de Publicación**

Yo, **Rodríguez Meza, Adrián Gerardo**, con cédula de ciudadanía n° 1722975958, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: ***“Detección de cambios de cobertura del suelo por incendio forestal en el páramo de Mojanda, año 2020, mediante análisis de imágenes satelitales”*** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

**Sangolquí, 06 de septiembre de 2022**

**Firma:**

**Rodríguez Meza, Adrián Gerardo**

**C.C.: 1722975958**

## Dedicatoria

A todo aquel que se esfuerzan por estudiar y alcanzar sus metas, a pesar de los diferentes obstáculos que se atraviesan en el trayecto, sin importar la edad ni el tiempo y sin buscar el camino fácil.

Con mucho cariño, a mis padres: Cristóbal y Elizabeth quienes han sido, son y serán parte fundamental de mi formación y pensamiento; además, ejemplo del esfuerzo y crecimiento a través del amor de pareja.

A mi hermano Alex, con quien siempre espero contar en buenos y malos momentos al igual que él cuenta conmigo.

A mi prometida Alejandra, a quien amo y admiro por su trabajo y dedicación, pues ha sido un gran apoyo durante mis años de formación académica, inclusive en la culminación del presente proyecto y con quien quiero construir un rumbo de vida en pareja.

## Agradecimiento

A mis padres, Cristóbal y Elizabeth, por haberme formado y apoyado en la decisión de continuar con mis estudios y que, gracias a ellos, no he pasado necesidad alguna.

A mi prometida, Alejandra, gracias por todo el amor que me demuestras día a día, por aceptar ser mi esposa y por todo el apoyo brindado durante mis estudios universitarios.

A mi director de tesis, Ing. Eduardo Kirby Mgs., por su, guía, enseñanzas y paciencia en el desarrollo del proyecto de titulación; gracias por su amistad y profesionalismo.

Al Crnl. de C.S.M. Carlos Estrella gracias por motivarme a llevar un proceso de autoestudio y aprendizaje del procesamiento en la nube y la programación SIG.

Al Ing. Oswaldo Padilla Ph.D., por su labor de investigación, docencia y enseñanzas inculcadas.

A mi abuelito Jorge y mis abuelitas: Ketty y Olguita, por el cariño que me brindan y por grandes recuerdos de mi infancia junto a ellos.

A mis tíos: Paúl, Jorge y Daniel, les agradezco su apoyo, motivación y experiencias compartidas.

A mis padrinos, tía Luqui y tío Esturado, por siempre estar pendientes de mí formación.

A mis amigos de toda la vida: Alex, Edwin, Caro, Daniel, Marbely, Mishelle, Pancho y Melanie por las vivencias y aventuras compartidas desde nuestra infancia.

A mis amigos del colegio: David, Henry e Issac, en quienes encontré mis hermanos de otra familia, simplemente gracias.

A mis compañeros, amigos y futuros colegas de la carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente, gracias por haber compartido vivencias, experiencia y conocimientos.

Un agradecimiento especial a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, y a sus profesionales que forman parte de la carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente, gracias por mantener viva la profesión que considero, es la mejor de todo el Ecuador.

## Tabla de Contenido

<b>Dedicatoria .....</b>	<b>6</b>
<b>Agradecimiento.....</b>	<b>7</b>
<b>Tabla de Contenido.....</b>	<b>8</b>
<b>Índice de Tablas .....</b>	<b>13</b>
<b>Índice de Figuras .....</b>	<b>14</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>20</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>21</b>
<b>Capítulo I: Aspectos Generales .....</b>	<b>22</b>
Antecedentes .....	22
Planteamiento del Problema.....	24
Justificación e Importancia .....	25
Área de Influencia .....	26
<i>Área de Influencia Directa.....</i>	<i>27</i>
Objetivos .....	28
<i>Objetivo General.....</i>	<i>28</i>
<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>28</i>
Metas .....	29
Hipótesis de Investigación .....	30



<b>Capítulo II: Marco Teórico .....</b>	<b>31</b>
Sistemas de Información Geográfica (SIG) .....	31
<i>Componentes de un SIG</i> .....	31
<i>Evolución de los SIG</i> .....	32
Infraestructura de Datos Espaciales (IDE).....	34
<i>Geovisor</i> .....	35
Teledetección Satelital .....	36
<i>El Espectro Electromagnético</i> .....	37
<i>La Teledetección Aplicada a Incendios Forestales</i> .....	39
Imagen Satelital.....	43
<i>Preprocesamiento de las Imágenes Satelitales</i> .....	44
Exactitud Posicional .....	49
<i>Test NSSDA (National Standard for Spatial Data Accuracy of USA)</i> .....	49
Misión Landsat .....	51
<i>Plataforma Landsat 8</i> .....	52
Misión Sentinel .....	59
<i>Plataforma Sentinel 2</i> .....	59
Ocupación, Cobertura y Uso del Suelo.....	64
<i>Ocupación del Suelo</i> .....	64
<i>Cobertura del Suelo (Land Cover, LC)</i> .....	64
<i>Uso del Suelo</i> .....	64

	10
<i>Unidad Mínima Mapeable (UMM)</i> .....	64
<i>Nivel de Detalle Temático</i> .....	66
<i>Leyenda Temática</i> .....	66
Clasificación de Imágenes.....	69
<i>Clasificación no Supervisada (USC)</i> .....	70
<i>Clasificación Supervisada (SC)</i> .....	71
<i>Clasificación Basada en Interpretación/Digitalización</i> .....	73
<i>Control de Calidad y Validación de Información</i> .....	74
<i>Determinación de Puntos de Muestreo</i> .....	75
La Detección de Cambios (CD) y Sus Principales Metodologías .....	78
<i>Detección de Cambio Basada en Álgebra de Mapas</i> .....	80
<i>Detección de Cambios Basada en Clasificación de Imágenes</i> .....	84
Google Earth Engine .....	84
<i>Características Técnicas</i> .....	86
<i>Programación en JavaScript</i> .....	87
<b>Capítulo III: Metodología</b> .....	<b>90</b>
Principios y Entorno de Google Earth Engine .....	92
Recopilación de Información y Estandarización de Datos Válidos .....	93
<i>Determinación del Área de Estudio</i> .....	95
<i>Descarga de Imágenes Satelitales y Cartografía Base</i> .....	95
<i>Proceso/Análisis Radiométrico</i> .....	97

<i>Validación de la Posición Geométrica (exactitud posicional)</i> .....	99
<i>Cálculo del Índice Normalizado del Área Quemada (NBR)</i> .....	102
<i>Exportación de Imágenes y Generación de Identificadores</i> .....	103
Clasificación de Imágenes y Detección de Cambios.....	103
<i>Detección De Cambios Basada en la Clasificación de Imágenes (DCBCI)</i> . .....	103
<i>Detección de Cambios Basada en Algebra de Mapas (DCBAM)</i> . .....	113
Generación de Mapas de Cambio y Creación del Geovisor.....	115
<i>Áreas de Cambio de Cobertura</i> .....	116
<i>Creación del Geovisor</i> .....	120
<b>Capítulo IV: Resultados y Análisis de Resultados</b> .....	<b>124</b>
Resultados de la Recopilación de Información y Estandarización de Datos Válidos.....	124
<i>Resultados del Análisis Radiométrico</i> .....	124
<i>Resultados de la Validación Geométrica</i> .....	125
<i>Resultados del Cálculo del Índice de Calcinación Normalizado (NBR)</i> .....	127
<i>Resultados de la Exportación de Imágenes y Generación de Identificadores</i> . .....	128
Resultados de la Clasificación de Imágenes y Detección de Cambios. ....	130
<i>Resultados de la Visita de Campo a la Zona de Estudio</i> . .....	130
<i>Resultados de la Clasificación de Imágenes</i> .....	134
<i>Resultados de la Detección de Cambios Basada en Álgebra de Mapas (DCBAM)</i> . .....	155
Resultados Estadísticos de Validación .....	159
Resultados de la Generación de Imágenes de Cambios .....	161

Resultados de la Creación del Geovisor .....	162
<b>Capítulo IV: Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>164</b>
Conclusiones.....	164
Recomendaciones.....	165
<b>Bibliografía .....</b>	<b>167</b>

## Índice de Tablas

Tabla 1: Valores de clasificación para el NBR .....	42
Tabla 2: Características de las bandas de las imágenes Landsat 8 .....	52
Tabla 3: Colecciones de Landsat Nivel-1, Niveles de procesamiento.....	53
Tabla 4: Características de las imágenes satelitales ESA Sentinel 2A y 2B.....	60
Tabla 5: Unidad mínima mapeable acorde a diferentes criterios. ....	65
Tabla 6: Nomenclatura estándar del CORINE Land Cover .....	68
Tabla 7: Estructura de una matriz de confusión. ....	77
Tabla 8: Valores de aceptación del Índice Kappa .....	78
Tabla 9: Requisitos mínimos de los programas utilizados en el presente proyecto.....	93
Tabla 10: Imágenes satelitales usadas en el presente proyecto.....	95
Tabla 11: Archivos vectoriales utilizados en el presente proyecto. ....	96
Tabla 12: Puntos de muestreo por cobertura del suelo.....	111
Tabla 13: Estadísticos para la evaluación de la exactitud posicional.....	125
Tabla 14: Estadísticos para la evaluación del corregistro. ....	126
Tabla 15: Identificadores de acceso al repositorio Assets de GEE.....	130
Tabla 16: Registro fotográfico de la visita de campo.....	131
Tabla 17: Leyenda temática propuesta en base al Corine Land Cover .....	134
Tabla 18: Resultados del análisis visual sobre las clasificaciones de cobertura generadas mediante la USC en GEE .....	137
Tabla 19: Resultados del análisis visual sobre las clasificaciones de cobertura generadas mediante la USC en ENVI. ....	140

Tabla 20: Estadísticos de calidad de muestras para de las coberturas generadas mediante SC en GEE. .....	144
Tabla 21: Áreas o superficies de las coberturas generadas mediante SC en GEE .....	145
Tabla 22: Estadísticos de calidad de muestras para de las coberturas generadas mediante SC en ENVI. .....	149
Tabla 23: Áreas o superficies de las coberturas generadas mediante SC en ENVI .....	150
Tabla 24: Superficies de las coberturas generadas a través de la interpretación/digitalización pre y post incendio .....	152
Tabla 25: Estadísticos y validación de los modelos de cobertura del suelo.....	154
Tabla 26: Resultados de la C2VA para la plataforma Sentinel 2.....	157
Tabla 27: Resultados de la C <sup>2</sup> VA para la plataforma Landsat 8. ....	157
Tabla 28: Superficie afectada por el incendio forestal, obtenida de diferentes fuentes y metodologías. ....	159
Tabla 29: Estadísticos de validación.....	161

### Índice de Figuras

Figura 1: Mapa de la Zona de estudio. ....	27
Figura 2: Componentes principales de un SIG .....	32
Figura 3: Evolución de los SIG .....	33
Figura 4: Componentes de una IDE .....	34
Figura 5: Espectros de reflectancia generalizados .....	36
Figura 6: Teledetección pasiva y activa .....	37

Figura 7: Componentes eléctricos (E) y magnético (M) de la radiación electromagnética. ....	38
Figura 8: Regiones del Espectro electromagnético .....	39
Figura 9: Áreas quemadas en la región mediterránea europea entre 2000 y 2009. ....	41
Figura 10: Mapas del dNBR de (a) la cicatriz del incendio de Batamay (2017) y (b) la cicatriz del incendio de Yert (2018) en Siberia, Rusia.....	43
Figura 11: Matriz imagen $f(x, y)$ .....	44
Figura 12: Diferencia visual entre los productos del procesamiento de las imágenes Landsat en GEE. a) Sin procesar (RAW), b) radiancia escalada, c) Techo de la atmosfera (TOA) y d) reflectancia superficial en la base de la atmosfera (BOA).....	45
Figura 13: Esquema de aplicación de un filtro.....	48
Figura 14: Misiones Landsat.....	51
Figura 15: Clasificación de las imágenes Landsat acorde a su tipo de procesamiento.....	55
Figura 16: Ejemplo visual de la diferencia entre las Colecciones 1 (izquierda) y Colección 2 (derecha) ..	56
Figura 17: Datos de imagen de nivel 1C (izquierda) y nivel 2A (derecha). ....	61
Figura 18: Representación gráfica de una clasificación por k-means (k = 3).....	71
Figura 19: Modelo teórico del SVM.....	72
Figura 20: Explicación gráfica del vector del vector de cambio.....	81
Figura 21: Representación bidimensional del dominio de los múltiples cambios para el C <sup>2</sup> VA.....	83
Figura 22: Entorno de desarrollo de Google Earth Engine.....	85
Figura 23: Diagrama de flujo de la metodología a empleada en el proyecto de investigación. ....	91
Figura 24: Principales componentes del editor de código de GEE. ....	92
Figura 25: Flujograma de la recopilación de información y estandarización de datos válidos.....	94

Figura 26: Imágenes de la plataforma Landsat 7: a) sin corrección de bandeo, b) con corrección de bandeo. ....	97
Figura 27: Pixeles perdidos en las imágenes Sentinel 2 descargadas. ....	98
Figura 28: Ejemplo de creación de puntos de verificación y validación de la exactitud posicional. ....	99
Figura 29: Herramienta “Image Registration Workflow” de ENVI, generación de puntos de amarre.....	101
Figura 30: Herramienta “Image Registration Workflow” de ENVI, verificación de puntos de amarre. ....	101
Figura 31: Evidencias fotográficas de afectaciones al área de estudio producto del incendio forestal. ..	104
Figura 32: Mapa de ruta de acceso a la laguna de Mojanda.....	105
Figura 33: Herramienta “K-means Clasification” de ENVI. ....	107
Figura 34: Creación de archivos de entrenamiento en GEE. ....	108
Figura 35: Ventana de configuración de reglas topológicas accedida desde el “Panel de comprobación de topología” del programa QGIS.....	110
Figura 36: Distribución de los puntos de muestreo sobre el área de estudio.....	112
Figura 37: Flujograma para la DCBAM.....	113
Figura 38: Procedimiento a llevar a cabo para la DCBAM en el programa ENVI .....	115
Figura 39: Ejemplo de la imagen de interacción generada a partir de la interacción entre dos coberturas (pre incendio y post incendio) en ENVI.....	116
Figura 40: Flujograma de programación del algoritmo para la creación de la imagen de interacción dentro de GEE.....	117
Figura 41: Ejemplo de una zona de interacción entre coberturas. ....	118
Figura 42: Ejemplo de la imagen de interacción generada a partir de dos coberturas (pre incendio y post incendio) en GEE. ....	119
Figura 43: Configuración, mapa base del geovisor. ....	121



Figura 44: Representación del panel de capas en la fase beta del geovisor. ....	122
Figura 45: Panel para administración de aplicaciones en GEE.....	123
Figura 46: Pestañas de instrucciones para la publicación de geovisores dentro de GEE. ....	123
Figura 47: Análisis visual de la corrección de píxeles perdidos, imagen St2 pre incendio. ....	124
Figura 48: Análisis visual de la corrección de píxeles perdidos, imagen St2 post incendio.....	125
Figura 49: Representación visual de la validación del corregistro entre: a) St2_pre y b) St2_post .....	127
Figura 50: Representación visual de la validación del corregistro entre: a) Lt8_pre y b) St2_post .....	127
Figura 51: Representación visual en pseudocolor del NBR. ....	128
Figura 52: Archivos ráster de la plataforma Sentinel 2 a exportar desde GEE, visualmente representados en diferentes combinaciones de bandas .....	129
Figura 53: Archivos ráster de la plataforma Landsat 8 a exportar desde GEE, visualmente representados en diferentes combinaciones de bandas .....	129
Figura 54: Cobertura del suelo generada a partir de la imagen St2_pre mediante clasificación no supervisada en GEE (Cob 1 GEE). ....	135
Figura 55: Cobertura del suelo generada a partir de la imagen St2_post mediante clasificación no supervisada en GEE (Cob 2 GEE). ....	135
Figura 56: Cobertura del suelo generada a partir de la imagen Lt8_pre mediante clasificación no supervisada en GEE (Cob 3 GEE). ....	136
Figura 57: Cobertura del suelo generada a partir de la imagen Lt8_post mediante clasificación no supervisada en GEE (Cob 4 GEE). ....	136
Figura 58: Área clasificada como incendio forestal en: a) Cob 2 GEE y b) Cob 3 GEE .....	138
Figura 59: Cobertura del suelo generada a partir de la imagen St2_pre mediante clasificación no supervisada en ENVI (Cob 1 ENVI).....	138

Figura 60: Cobertura del suelo generada a partir de la imagen St2_post mediante clasificación no supervisada en ENVI (Cob 2 ENVI).....	139
Figura 61: Cobertura del suelo generada a partir de la imagen Lt8_pre mediante clasificación no supervisada en ENVI (Cob 3 ENVI).....	139
Figura 62: Cobertura del suelo generada a partir de la imagen Lt8_post mediante clasificación no supervisada en ENVI (Cob 4 ENVI).....	140
Figura 63: Área clasificada como incendio forestal en: a) Cob 2 ENVI y b) Cob 3 ENVI.....	141
Figura 64: Cobertura del suelo generada a partir de la imagen St2_pre mediante clasificación supervisada en GEE (Cob 5 GEE). ....	142
Figura 65: Cobertura del suelo generada a partir de la imagen St2_post mediante clasificación supervisada en GEE (Cob 6 GEE). ....	143
Figura 66: Cobertura del suelo generada a partir de la imagen Lt8_pre mediante clasificación supervisada en GEE (Cob 7 GEE). ....	143
Figura 67: Cobertura del suelo generada a partir de la imagen Lt8_post mediante clasificación supervisada en GEE (Cob 8 GEE). ....	144
Figura 68: Área clasificada como incendio forestal en: a) Cob 6 GEE y b) Cob 8 GEE .....	146
Figura 69: Cobertura del suelo generada a partir de la imagen St2_pre mediante clasificación supervisada en ENVI (Cob 5 ENVI).....	147
Figura 70: Cobertura del suelo generada a partir de la imagen St2_post mediante clasificación supervisada en ENVI (Mod 6 ENVI). ....	147
Figura 71: Cobertura del suelo generada a partir de la imagen Lt8_pre mediante clasificación supervisada en ENVI (Mod 7 ENVI). ....	148
Figura 72: Cobertura del suelo generada a partir de la imagen Lt8_post mediante clasificación supervisada en ENVI (Mod 7 ENVI). ....	148
Figura 73: Área clasificada como incendio forestal en: a) Cob 6 ENVI y b) Cob 8 ENVI.....	151

Figura 74: Vector de cobertura pre incendio generado a partir de interpretación/digitalización (Cob 1 QGIS). .....	151
Figura 75: Vector de cobertura post incendio generado a partir de interpretación/digitalización (Cob 2 QGIS). .....	152
Figura 76: Área clasificada como incendio forestal, por vía de la interpretación digitalización.....	153
Figura 77: Representación visual de la imagen de diferencia en: a) Landsat 8 y b) Sentinel 2.....	155
Figura 78: Representación visual de la imagen módulo en: a) Landsat 8 y b) Sentinel 2. ....	156
Figura 79: Representación visual de la imagen dirección en: a) Landsat 8 y b) Sentinel 2. ....	156
Figura 80: Imagen de cambio de cobertura mediante el método C <sup>2</sup> VA generado en GEE para las plataformas satelitales: a) Landsat 8 y b) Sentinel 2. ....	158
Figura 81: Cambio de cobertura mediante “Image change workflow” generado en ENVI para las plataformas satelitales: a) Landsat 8 y b) Sentinel 2. ....	158
Figura 82: Diagrama de cajas y bigotes para la validación de resultados .....	160
Figura 83: Gráfico de barras donde se representa la dispersión del cálculo del área quemada. ....	160
Figura 84: Imagen de cambio, generara a partir de la comparación entre: a) Cob 5 GEE vs Cob 6 GEE y b) Cob 5 ENVI vs Cob 6 ENVI. ....	161
Figura 85: Imagen de cambio, generara a partir de la comparación entre: a) Cob 1 QGIS vs Cob 2 QGIS y b) Cob 7 GEE vs Cob 8 ENVI. ....	162
Figura 86: Geovisor creado para la representación visual en nube de los resultados.....	163
Figura 87: Código QR para el acceso al geovisor web .....	163

## Resumen

Las técnicas de teledetección satelital son ideales para cuantificar zonas afectadas por incendios forestales mediante la detección de cambios. En las cercanías a la laguna principal del “Complejo Lacustre Mojanda”, el 02 de agosto del 2020 se produjo un incendio forestal en el que, según el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencia (SNGRE), se consumió entre 573 y 635 ha de vegetación de Páramo, sin embargo, se desconoce la metodología y el intervalo de confianza de cálculo. En adición, se propone el procesamiento en la nube de imágenes satelitales Landsat 8 y Sentinel 2, a través de la plataforma de Google Earth Engine (GEE); en esta, se trabajó los procesos de: análisis espectral, corrección, cálculo de índices espectrales, clasificación de imágenes y detección de cambios; estos resultados fueron comparados con los obtenidos en software copyright, llegando a disminuir el tiempo de procesamiento y anulando el costo de adquisición de licencia; sin embargo, fue necesario poseer conocimientos medio/alto en lenguaje de programación JavaScript. Por otro lado, a través de las varias técnicas de detección de cambios, se obtuvo diferentes cálculos de afectación, destacando la detección de cambios basada en álgebra de mapas (DCBAM) con 631.34 ha y la de Interpretación/digitalización con 636.06 ha al ser los valores que más se aproximan a la fuente oficial, sin concluir un valor absoluto. La comparación entre las superficies determinadas mediante diferentes técnicas de detección de cambios, concluyó que la afectación del incendio forestal a escala de 1:100 000, es de 620.45 +/- 7.27 ha con un 90% de nivel de confianza. Finalmente, se demuestra la factibilidad de crear geovisores en GEE para la publicación y descarga de resultados, ingresando a este, a través de la web mediante un enlace URL o código QR.

*Palabras clave:* teledetección satelital, incendio forestal, detección de cambios, procesamiento en la nube, Google Earth Engine.

## Abstract

Satellite remote sensing techniques are extremely ideal for quantifying areas affected by forest fires through detecting changes. Nearby the main lagoon of the “Complejo Lacustre Mojanda”, a forest fire broke out on August 2, 2020, in which, according to the National Risk and Emergency Management Service (SNGRE) between 573 and 635 ha of vegetation were consumed, however, the methodology and the calculation confidence interval are unknown. In one hand, the processing in the cloud of Landsat 8 and Sentinel 2 satellite images is proposed through the Google Earth Engine (GEE) platform; in this, the processes of: spectral analysis, co-registration, calculation of spectral index, image classification, and detecting changes were worked on; these results were compared with those obtained in copyright software, reducing the processing time and canceling the cost of license acquisition; however, it was necessary to have medium/high knowledge of the JavaScript programming language. On the other hand, through several detecting changes techniques, different affectation calculations were obtained, highlighting the map algebra-based change detection (DCBAM) with 631.34 ha and the interpretation/digitization with 636.06 ha, being the values that are closest to the official source, without concluding an absolute value. The comparison between the surfaces determined by different detecting changes techniques concluded that the impact of the forest fire at a scale of 1:100 000 is  $620.45 \pm 7.27$  ha with a 90% confidence level. Finally, the feasibility of creating a geoviewer in GEE for the publication and download of results is demonstrated, entering it through the web by means of a URL link or QR code.

*Keywords:* satellite remote sensing, forest fire, change detection, cloud processing, Google Earth Engine.

## Capítulo I: Aspectos Generales

En el presente capítulo, se describe una breve introducción del proyecto y se detalla la problemática a solucionar, misma que engloba los antecedentes a nivel nacional e internacional. Adicional, la importancia de generar una metodología apropiada para el análisis digital de imágenes satelitales en Google Earth Engine (GEE) aplicable en diferentes proyectos geoespaciales, como es el caso de la detección de zonas afectadas por incendios forestales.

### Antecedentes

El sector conocido como Zona Lacustre de Mojanda, es un espacio en el que se identifican seis lagunas, de las cuales, dos son estacionarias y cuatro permanentes, estas son: Caricocha (la más grande), Huarmicocha, Chiriyacu y Yanacocha o Laguna Negra. Además, según (Ruiz Azurduy, 2017), la zona es la principal fuente de abastecimiento de agua potable para los cantones del noroccidente de la provincia de Pichincha y del sur de la provincia de Imbabura. Por su importancia, el 23 de junio del año 2021, el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, en su boletín N°233, declara a Mojanda como Área de Protección Hídrica, llegando a ser la N°11 a nivel nacional (MAE, 2021).

Por otra parte, en los últimos años los incendios representan una amenaza para los ecosistemas forestales, ya sean éstos originados por factores naturales y/o antropogénicos; a su vez, existe un aumento en la frecuencia y la gravedad en estos flagelos que se ven potenciados por el cambio climático, el aumento de la temperatura, la pérdida de humedad, los cambios en el uso del suelo, la pérdida de ecosistemas y las intensas actividades antropogénicas (Motazeh et al., 2013) (Crimmins, 2006) (Hantson et al., 2015) (Reyes-Bueno & Balcazar-Gallegos, 2021).

Así, según (Ruiz Azurduy, 2017), en el sector persiste la práctica agrícola errónea de las quemas para una supuesta atracción del agua lluvia, por lo cual, se conoce que el 70% de los

casos de incendios tienen causas intencionadas, siendo la principal, las quemas no autorizadas y no controladas para ampliar superficies agrícolas, que tienen como objetivo provocar el rebrote de la plantas o eliminar rastrojos y matorrales; además, los incendios por negligencia ha aumentado en Mojanda por la afluencia de turistas y visitantes que deciden acampar y prender fuego en la zona; estadísticamente, éstos representan entre un 15% y 25% de los casos.

Una de las aportaciones más destacadas de la teledetección espacial al estudio del medio ambiente, es su capacidad para seguir procesos dinámicos como inundaciones, deforestación, agricultura, incendios forestales, entre otros; dado que las imágenes que son captadas por un sensor que observa la Tierra desde el espacio pasan por una órbita estable y repetitiva con sus respectivas cadencias, las cuales dependerán del ciclo orbital de la plataforma y del campo de visión del sensor; los sensores pasivos también limitan su frecuencia real de adquisición en función de la cobertura nubosa (Chuvienco Salinero, 2008).

Cabe destacar que, en el desarrollo del presente proyecto de investigación, se empleará el uso de la herramienta para el análisis de imágenes satelitales llamada Google Earth Engine (GEE), la cual consiste en una plataforma de servicio (platform of service, POS) que trabaja a través de una interfaz de programación de aplicaciones (application programming interface, API) codificable mediante internet y un entorno de desarrollo interactivo asociado (editor de código) basado en la web, la cual, permite la creación rápida de prototipos y la visualización de resultados. Posee un catálogo de datos de varios petabytes que, junto con un servicio de computación intrínsecamente en los servidores de Google, lo convierten en una potente alternativa de análisis de imágenes satelitales y geoinformación procedente de las mismas (Gorelick et al., 2017).

## Planteamiento del Problema

De acuerdo al Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencia, en su *“Informe de Situación – Incendios Forestales”* del 08 agosto del 2020 (SNGRE, 2020a), el 02 de agosto del 2020 se originó un incendio forestal en las cercanías a la Laguna de Mojanda, del cual, se estima una afectación total de 573 ha de ecosistema de páramo, dividido en 441 ha en Pichincha y 132 ha en Imbabura; sin embargo, en el informe presentado el 31 de agosto del 2020 (SNGRE, 2020b) la cantidad de área afectada por el incendio fue de 635 ha, dividido en 516,4 ha en Pichincha y 118,6 ha en Imbabura; por lo tanto, se observa que, a pesar de ser la misma fuente, la estimación de superficie afectada difiere y no se sabe cuál es la que mejor se aproxima al desconocer la metodología de cálculo utilizada. De igual forma, según (Mataix-Solera & Guerrero, 2007), el suelo descubierto tras el incendio posee una reflexión energética inferior al de una superficie cubierta de vegetación, aumentando así la temperatura y la evaporación, al tiempo que disminuyen la absorción y retención de agua, la porosidad, la aireación y la capacidad de infiltración; en ese sentido, es importante identificar y cuantificar los cambios producidos por este evento y una de las alternativas es el análisis de la cobertura del suelo por medio de sensores remotos.

Las imágenes satelitales y software de procesamiento avanzado de sensores remotos tienen un elevado costo de adquisición, así se lo demuestra en (MAGAP, 2014); sin embargo, existen imágenes que son de libre descarga que, en función de su área de abarcamiento resultan menos costosas que otras técnicas de adquisición de datos existentes, además, se pueden aprovechar en otros campos de estudio, ya que las mismas poseen varias longitudes de onda del espectro electromagnético; así mismo, se han creado importantes programas informáticos en software libre, con ciertas limitaciones en procesamientos de mayor exigencia, así como también, hay algunos software copyright liberados (libre descarga) por ser versiones antiguas o impartidos a los usuarios como demo de prueba, entre otros; en ese sentido, se



propone en este proyecto, utilizar una nueva alternativa, para realizar análisis digital de imágenes llamada Google Earth Engine (GEE), el cual, a pesar de ser una plataforma copyright, su uso es libre y se puede programar, procesar en la nube, entre otros (Perilla & Mas, 2020). De esta manera, se intentará obtener las superficies afectadas por un incendio forestal a través de la técnica de detección de cambios; además, se presentará una variante de procesamiento de imágenes con GEE dirigida a diferentes usuarios internos y externos a la Universidad de Las Fuerzas Armadas - ESPE.

### **Justificación e Importancia**

En primera lugar, el presente proyecto de investigación tiene como principal beneficio cuantificar la superficie afectada por el incendio forestal, estandarizando y generando el procedimiento mediante la plataforma de GEE, por lo cual, se disminuirá el costo y la velocidad de la corrección de imágenes satelitales, generación de los clases de cobertura de suelo, validación de la información y detección de cambios al usar una plataforma de libre acceso que trabaja en los servidores de Google y así, eliminar ciertas limitantes como la incapacidad de analizar gran cantidad de datos producidos por las principales misiones satelitales como Landsat, Sentinel, Modis, entre otros. (Perilla & Mas, 2020) (Google Developers, 2021b).

En segundo lugar y de acuerdo a (Mataix-Solera & Guerrero, 2007), al someter al suelo a un aumento de temperatura, puede sufrir cambios en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, además, una nueva situación micro climática después de la pérdida de la cubierta vegetal y generación de una cubierta de cenizas; por otro lado, una mayor susceptibilidad a la erosión tanto hídrica como eólica. Es por ello que, el mapeo preciso y consistente del flagelo, es un recurso vital para la investigación ecológica y del cambio climático (Flannigan et al., 2009) (Gibson et al., 2020). Por otro punto, el detectar y cuantificar la zona afectada posterior al desastre se vuelve necesario para llevar a cabo acciones de protección y mitigación con el fin

de evitar un mayor impacto tanto al suelo, como a la vegetación de Páramo (Díaz-Granados Ortiz et al., 2005).

En tercer lugar y según el Plan Nacional de Creación de Oportunidades 2021 -2025 (SNP, 2021); conforme al Objetivo N°11 del Eje Transición Ecológica hace referencia a: *“Conservar, restaurar, proteger y hacer uso sostenible de los recursos naturales”*; el presente proyecto se alinea a la política 11.2 *“fomentar la capacidad de recuperación y restauración de los recursos naturales renovables”*, al proporcionar una metodología validada y replicable del uso de imágenes satelitales y software libre para cuantificar los cambios de cobertura del suelo, los cuales pueden ser producto de incendios forestales (caso de estudio), inundaciones, deforestación, erupciones volcánicas, expansión de la frontera agraria, entre otros.

Finalmente, de este estudio se desprende la metodología y procedimientos necesarios para la detección de cambios mediante GEE, la misma que es validada, documentada y plasmada en un manual de usuarios. Documento que beneficiará a los estudiantes y profesionales de la carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente, Ingeniería en Tecnologías Geoespaciales y carreras afines, al encontrar una alternativa válida, a fin de procesar información generada mediante sensores remotos; así mismo, se beneficiará al país al proponer el uso de una plataforma de libre acceso para el análisis de imágenes satelitales, por lo cual se pueden llegar a disminuir los costos en comparación al uso de software copyright.

### **Área de Influencia**

Políticamente, la zona está administrada por las provincias de Pichincha e Imbabura, compartiendo territorio entre tres gobiernos municipales: Pedro Moncayo, Otavalo y el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) (Ruiz Azurduy, 2017). La zona de Mojanda está conformada por un macizo montañoso con temperaturas menores a 18°C, en el centro de la cordillera de los Andes, posee un relieve de estructuras volcánicas y contiene los paisajes glaciares del volcán

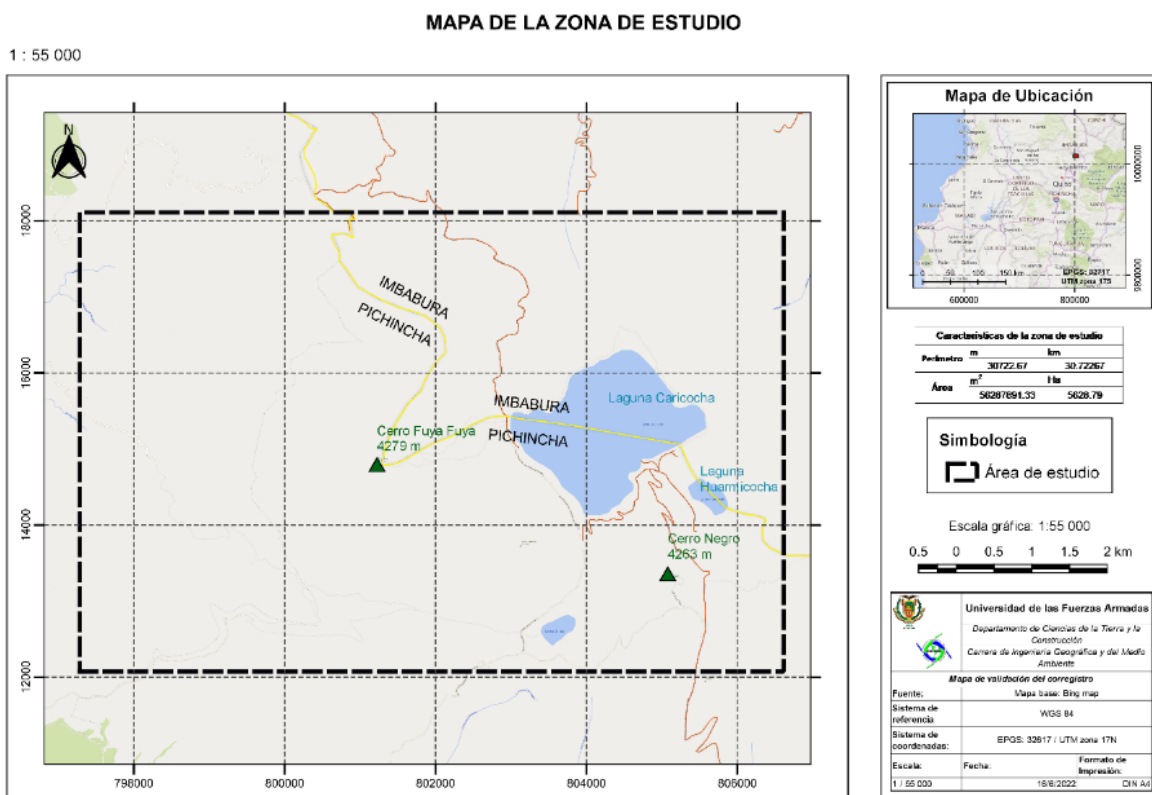
Mojanda (Ruiz Azurduy, 2017). Además, según la clasificación de los Ecosistemas Naturales en Ecuador Continental del Ministerio de Ambiente, año 2013, Mojanda cuenta con cuatro ecosistemas: Arbustal Siempreverde Montano del Norte de los Andes, Bosque Siempreverde del Páramo, Herbazal del Páramo y Herbazal inundable del Páramo (MAE, 2013).

### Área de Influencia Directa

La zona de influencia directa o zona de estudio comprende un área aproximada de 5600 ha, la misma que se encuentra representada en la figura 1.

### Figura 1

Mapa de la Zona de estudio.



## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

Analizar la detección de cambios de cobertura del suelo por incendio forestal 2020 en las cercanías a la laguna de Mojanda a través de programación con JavaScript en Google Earth Engine con la finalidad de contabilizar las áreas afectadas y obtener procedimiento de uso de la plataforma destinada al análisis digital de imágenes.

### ***Objetivos Específicos***

- Procesar la información satelital de las misiones Landsat 8, Sentinel 2 u otras, a través de la programación en Google Earth Engine con la finalidad de corregir radiométricamente y registrar las imágenes satelitales para la clasificación de cobertura y análisis de cambios en la zona de estudio.
- Clasificar las imágenes satelitales aplicando diferentes métodos como la interpretación / digitalización y la clasificación automática (no supervisada y supervisada) con GEE y un software copyright, con la finalidad de comparar sus resultados y obtener mapas de cobertura del suelo a escala 1:100 000 antes y después del flagelo.
- Evaluar la calidad de las clases de cobertura vegetal clasificadas a partir del índice Kappa obtenido de las muestras de campo y de una matriz de confusión de signaturas, con el propósito de validar las áreas clasificadas que servirán para los mapas de cobertura del suelo.
- Aplicar diferentes técnicas de detección de cambios de cobertura por incendio forestal mediante la programación con GEE para cuantificar las áreas afectadas y generar los algoritmos necesarios en su procesamiento.

- Desarrollar un geovisor web en GEE que permita representar las coberturas y áreas de cambio para escala 1:100 000 con la finalidad de visualizar los resultados y que los usuarios tengan una alternativa de representación.

### **Metas**

- Dos imágenes satelitales Landsat 8 y dos Sentinel 2 de diferentes periodos (pre y post evento), corregidas y registradas.
- Diez ejemplos de imágenes clasificadas basada en la leyenda temática del “*Corine Land Cover*”, utilizando las técnicas manuales y automáticas de clasificación para las imágenes Landsat 8 y Sentinel 2 antes y después del evento.
- Un informe que compare los resultados de la clasificación obtenida por la aplicación de GEE y software de copyright.
- Un registro con coordenadas y fotografías de las muestras de campo.
- Dos matrices de confusión con los cálculos del índice Kappa para evaluar los resultados de las clasificaciones obtenidos con GEE y software copyright.
- Cuatro mapas escala 1:100 000 de cobertura del suelo, antes y después del incendio.
- Un informe con el análisis de la detección de cambios basado en álgebra de mapas y basada en clasificación de imágenes, de las imágenes Landsat 8 y Sentinel 2.
- Una tabla con las áreas afectadas por el incendio forestal.
- Dos mapas escala 1:100 000 de detección de cambios.
- Un geovisor acorde a los estándares de información geográfica elaborado por el Consejo Nacional de Geoinformática (CONAGE), para la representación de la cobertura del suelo y resultados relevantes de la detección de cambios.
- Un manual detallado de las líneas de código y programación fuente para la creación de los algoritmos en GEE donde se detalle: visualización, tratamiento y corrección

de imágenes satelitales; clasificación automática y manual de imágenes detección de cambios y creación del geovisor.

### **Hipótesis de Investigación**

En el presente proyecto de investigación se plantean dos hipótesis:

#### **Hipótesis 1:**

La clasificación y detección de cambios en imágenes satelitales mediante programación con GEE es igual, similar o mejor que la implementada a partir de uso de software copyright.

#### **Hipótesis 2:**

Es posible crear un geovisor web mediante GEE que permita la visualización y descarga de las imágenes corregidas y registradas, los modelos de clasificación automáticos tanto supervisados como no supervisados y la detección de áreas de cambio producto del incendio forestal.

## **Capítulo II: Marco Teórico**

El presente capítulo, detalla la base teórica fundamental para el desarrollo del proyecto de investigación, la cual se aborda desde la temática inicial para el entendimiento del contexto básico de la teledetección satelital y el análisis digital de imágenes, enfocando el mismo a la metodología para desarrollar la detección de cambios de cobertura del suelo. Adicionalmente, se especifica los conceptos básicos para un correcto uso de la plataforma de GEE.

### **Sistemas de Información Geográfica (SIG).**

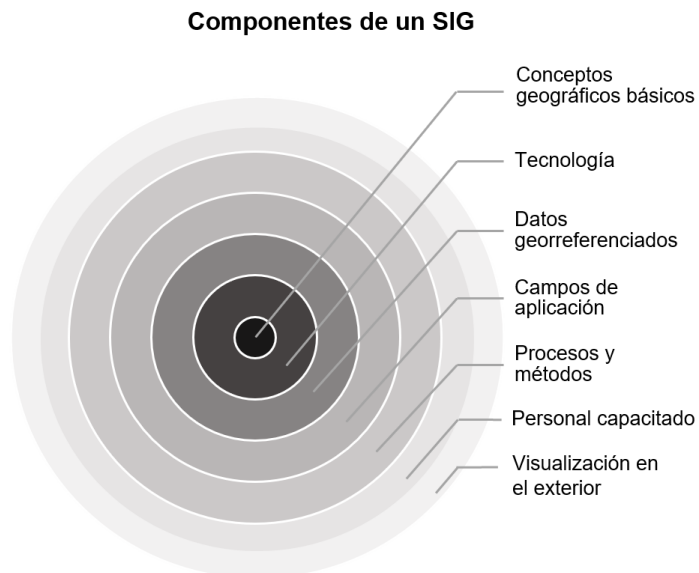
Según (Chang, 2016), un sistema de información geográfica, SIG o GIS por sus siglas en inglés, es un conjunto ordenado de normas y procedimientos informáticos para: capturar, almacenar, consultar, analizar y mostrar datos geoespaciales. Los datos geoespaciales describen tanto la ubicación como características espaciales o atributos. Por ejemplo: para describir una carretera, se hace referencia a su localización dentro de un sistema de referencia y a sus características (longitud, nombre, límite de velocidad y dirección). Un GIS permite al usuario gestionar datos de carreteras, cuerpos de agua, edificaciones y muchos otros datos geoespaciales, lo que lo distingue de los sistemas de gestión empresarial que se ocupan de datos no espaciales.

### ***Componentes de un SIG***

Tradicionalmente, los SIG se componen de: hardware, software, personas y organización, además de datos geoespaciales. Sin embargo, según (García, 2021), una definición moderna para reflejar los elementos de un SIG es de dentro hacia fuera en un esquema circular, tal como se observa en la figura 2, el cual parte desde el núcleo en el que se encuentran los conceptos geográficos básicos, le sigue la tecnología, los datos georreferenciados, los campos de aplicación, los procesos y métodos, el personal capacitado y la visualización en el exterior.

## Figura 2

### Componentes principales de un SIG



*Nota:* Adaptado de (Garcia, 2021)

### **Evolución de los SIG**

La evolución de los SIG se puede representar en varias etapas. La primera, se centra en un desarrollo para resolver problemas geoespaciales concernientes a un solo proyecto y se caracterizaban por un reducido número de usuarios (Mejia Avila, 2009) (Y. Q. Chen & Lee, 2012).

El siguiente paso, se trata de una articulación de la información que debe manejar una oficina o departamento al interior de una organización, lógicamente se amplía el número de usuarios (Y. Q. Chen & Lee, 2012).

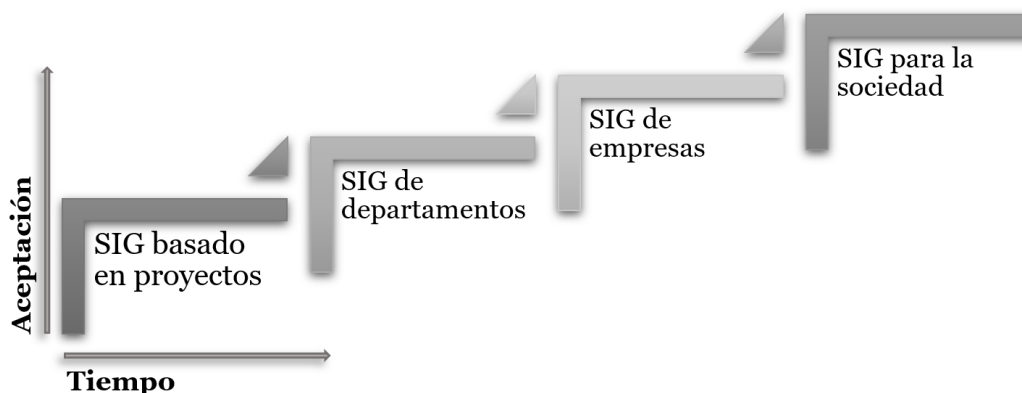
A continuación, aparecen los SIG de empresas o llamados SIG corporativos, los cuales y dada su complejidad, deben enfatizar en el trabajo concertado entre analistas y usuarios; además, en la aplicación de metodologías de construcción de Sistemas de Información.



El último peldaño de evolución de los SIG (ver figura 3), al menos hasta la actualidad, mencionado por (Y. Q. Chen & Lee, 2012) corresponde a los SIG para la sociedad, que se caracterizan por soportarse en sólidas tecnologías informáticas, el uso de Internet para la salidas de resultados y un número ilimitado de usuarios, generalmente desconocidos, los cuales, conforman un amplio abanico en términos de manejo de las tecnologías informáticas desde aquellos conocedores de gran parte de los procesos que sustentan la información consultada, hasta los que simplemente se concentran en obtener el dato o información resultante (Mejia Avila, 2009).

### Figura 3

*Evolución de los SIG*



*Nota:* Adaptado de (Mejia Avila, 2009)

La mayor ventaja de los SIG para la sociedad se encuentra en la posibilidad de intercambio de datos entre diferentes usuarios; lo que requiere que, todas las organizaciones que sean capaces de generar información geográfica, lo realicen a través de metodologías que permitan la consulta de datos en forma transparente; es decir, que exista una interoperabilidad. No obstante, en el proceso de transición a los SIG para la sociedad, la interoperabilidad fue la mayor limitante, porque lo que se heredó de las etapas anteriores, fue una cultura de no

homogenización de la información, en la cual, no se documentaban las características de los datos, se utilizaban diferentes formatos de salida, diferentes plataformas y diferentes sistemas de referencia para los datos espaciales.

### Infraestructura de Datos Espaciales (IDE)

Al problema de interoperabilidad en el ámbito de los SIG surge como solución la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE), la cual, corresponde a un sistema informático integrado por: un conjunto de recursos, catálogos, servidores, programas, datos y aplicaciones web (ver figura 4), dedicados a gestionar información geográfica (mapas, fotos, imágenes satélite, topónimos, entre otros), disponibles a través de la Internet, que cumplen una serie de condiciones de interoperabilidad (normas, especificaciones, protocolos, interfaces, entre otros) y que permiten a un usuario utilizarla a través de un navegador según sean sus necesidades (Mejia Avila, 2009) (Calle & Jiménez, 2021).

### Figura 4

*Componentes de una IDE*



*Nota:* Extraído de (Ramos López, 2018)

En 1993, el término Infraestructura de Datos Espaciales fue acuñado por primera vez por el U.S. National Research Council para referirse a un marco de tecnologías, políticas y disposiciones institucionales que, trabajando conjuntamente, facilitan la creación, el intercambio y el uso de datos geoespaciales y recursos relacionados, mediante una comunidad de usuarios potenciales. Es decir, una IDE se define como un sistema informático que integra y organiza una red descentralizada de servidores (Maguire & Longley, 2005) (Valencia Martínez de Antoñana, 2017) (A. J. S. García, 2018).

Es así que, la IDE tiene por objetivo facilitar el acceso y la integración de la información espacial, tanto a nivel institucional público, empresarial, de educación, de investigación y de los propios ciudadanos; a su vez, permitirá extender el conocimiento y el uso de la información geográfica para la optimización de la toma de decisiones. Por otro lado, promueve la estandarización de los metadatos como método para documentar la información espacial, lo que permite reducir costos y evitar la duplicación de esfuerzos. Finalmente, anima a la cooperación entre los agentes, favoreciendo un clima de confianza para el intercambio de datos y geoinformación (Subirana, 2004).

Cabe destacar que, según (Martorell Guerrero, 2019), es importante la calidad de la información y tiene que estar en equilibrio con los usuarios, en otras palabras, es necesario definir los procesos, requisitos, necesidades y sus expectativas con respecto al proyecto de índole geográfico, y beneficio que significa para el cliente (Calle & Jiménez, 2021).

### **Geovisor**

Un geovisor es una herramienta de software que permite la publicación de mapas por Internet, tiene por objetivo principal contribuir y facilitar la distribución de forma rápida y accesible a los datos espaciales a través de la web; este tipo de aplicaciones permite de una

manera visual la interacción con capas georreferenciadas de una región específica (Domínguez Palacios & Gómez Jaramillo, 2016).

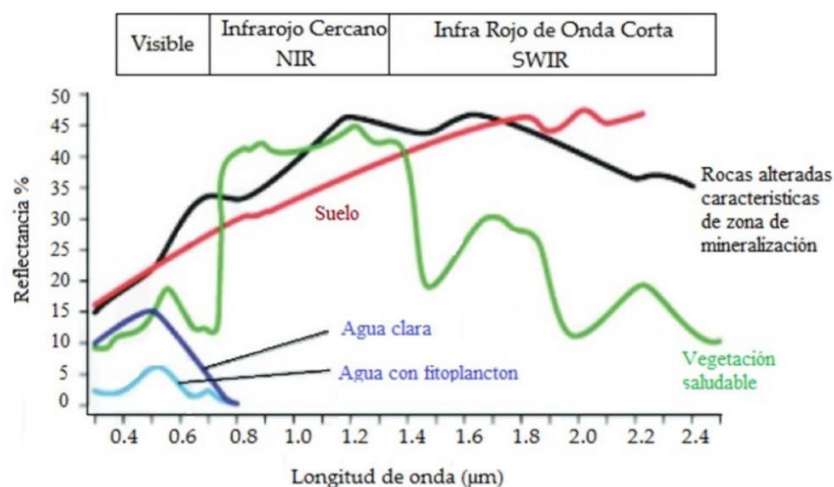
### Teledetección Satelital

La Teledetección mediante satélites se basa en un sistema de adquisición de datos a distancia sobre la biosfera, que depende de las propiedades de la radiación electromagnética y en su interacción con los materiales de la superficie terrestre. Cabe destacar que todos los elementos de la naturaleza tienen una respuesta espectral o reflectancia (capacidad de un cuerpo a reflejar luz) propia que se denomina *signatura espectral*, tal como se visualiza en la figura 5; de allí la importancia de conocer las condiciones de toma de las mediciones. El estudio acerca de las firmas espectrales de materiales frecuentes en el plano terrestre, ofrecen una muy importante información para el entendimiento e interpretación de imágenes obtenidas a través de sensores remotos (Fajardo Reina, 2018).

### Figura 5

#### *Espectros de reflectancia generalizados*

Espectro de reflectancia generalizado de algunos materiales de la superficie de la tierra



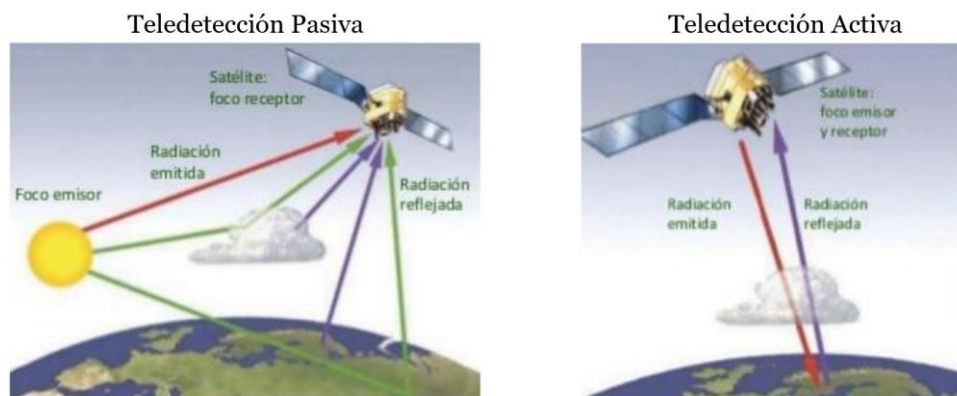
*Nota:* Imagen tomada de (Fajardo Reina, 2018)

La Teledetección estudia las variaciones espectrales, espaciales y temporales de las ondas electromagnéticas, y pone de manifiesto las correlaciones existentes entre éstas y las características de los diferentes materiales terrestres. Su objetivo, esencialmente se centra en la identificación de los diferentes objetos de la superficie terrestre y los fenómenos que en ella operan (Romero, 2016).

Dependiendo de la fuente de energía radiante de la cual el sensor capta la información, puede clasificarse en teledetección pasiva, emitida por un factor externo como el sol; y teledetección activa, emite su propia fuente de energía. Las mismas se encuentran representadas en la figura 6 (Montecinos, 2018).

## Figura 6

### *Teledetección pasiva y activa*



*Nota:* Extraído de (Montecinos, 2018)

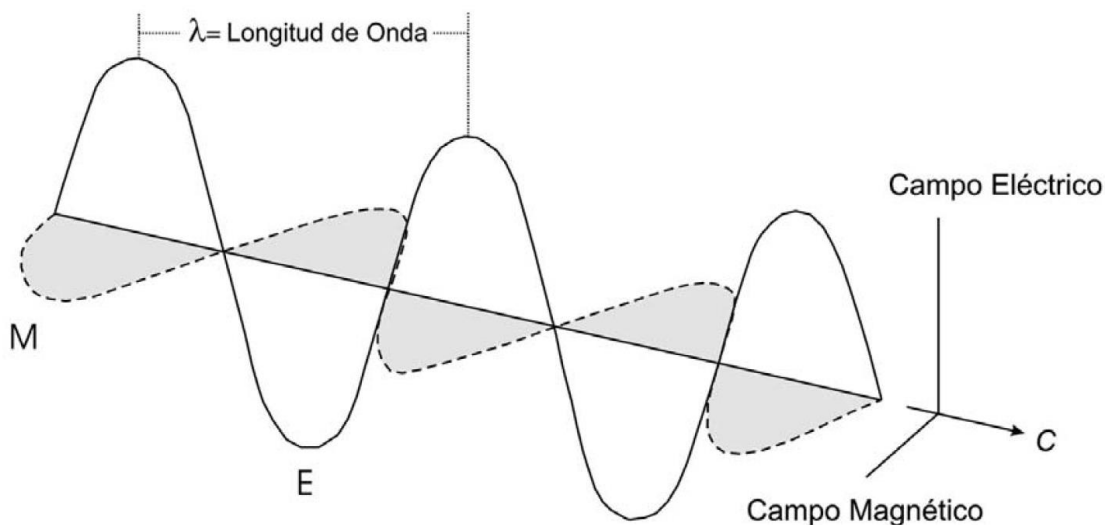
### ***El Espectro Electromagnético***

Se define a este como, un continuo de longitudes de onda y frecuencias que van desde las ondas cósmicas hasta las ondas de radio y telecomunicaciones; se compone de la combinación de ondas eléctricas y magnéticas, representadas en la figura 7, producidas por la

oscilación o aceleración de cargas eléctricas que se desplazan a la velocidad de la luz y que pueden viajar por el vacío (Bautista et al., 2011).

### Figura 7

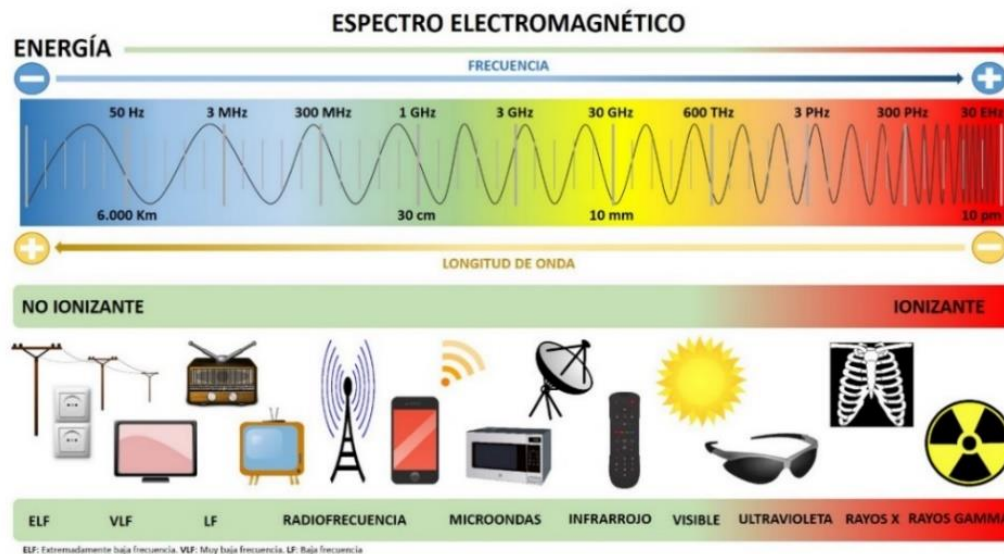
*Componentes eléctricos (E) y magnético (M) de la radiación electromagnética.*



*Nota:* Extraído de (Bautista et al., 2011)

La energía radiada desde el Sol a la superficie del planeta, básicamente se comporta acorde con la teoría ondulatoria de la luz; es decir, es un continuo de ondas que se caracterizan por su tamaño ( $l$ ), cuya unidad son los micrómetros ( $\mu m$ ), y frecuencia o número de ondas por unidad de tiempo ( $n$ ), cuya unidad son los Hertz ( $Hz$ ). Además, la longitud de onda es la distancia entre cresta y cresta de la onda y la frecuencia es el número de ciclos, mientras más pequeña es la longitud de onda más alta es la frecuencia. El espectro electromagnético abarca longitudes de onda cuyo rango va desde las muy cortas, del orden de  $3 \text{ \AA}$  ( $1 \text{ \AA} = 10^{-7} \text{ m}$ ), los rayos X, hasta los 30 km ( $1 \text{ km} = 10^3 \text{ m}$ ), ondas de radio (ver figura 8). (Bautista et al., 2011).

Figura 8

*Regiones del Espectro electromagnético*

Nota: Extraído de (Bautista et al., 2011).

**El Espectro Visible.** Comprende las bandas elementales que normalmente percibe a simple vista el ser humano. En función de su longitud de onda, se encuentran en rango de 400 a 700 nm, partiendo de los colores azul, verde y rojo; el espectro visible coincide la máxima radiación solar con las longitudes de onda presentes en este rango (Chuvieco Salinero, 2008).

**El Espectro Infrarrojo.** Las imágenes del infrarrojo térmico, captan la radiación emitida por la Tierra cuya longitud de onda comprende desde los 760 o 780 nm, limitando con el color rojo en la zona visible del espectro, hasta los 10.000 o 15.000 nm (según autores), limitando con las microondas. Depende de la temperatura, por lo tanto a mayor temperatura mayor energía es aptada por el sensor (Chuvieco Salinero, 2008).

### **La Teledetección Aplicada a Incendios Forestales**

Los paisajes quemados por el fuego, son objetos adecuados para la investigación de sensores remotos, debido a los cambios físicos que este fenómeno tiene en la cubierta

terrestre. Los cambios característicos del área quemada incluyen: el consumo del dosel, la carbonización del suelo y la alteración del color del suelo. Estos, son detectables usando sensores satelitales, siempre y cuando, el tamaño del parche de la quemadura esté dentro del rango de resolución del sensor satelital (Jakubauskas et al., 1990) (White et al., 1996).

La teledetección es una herramienta útil para mapear la extensión de la quema, comprender las respuestas biológicas, debidas al calentamiento diferencial de la superficie (es decir, la gravedad del incendio); además, cuantificar la extensión y el patrón de estas áreas quemadas (White et al., 1996).

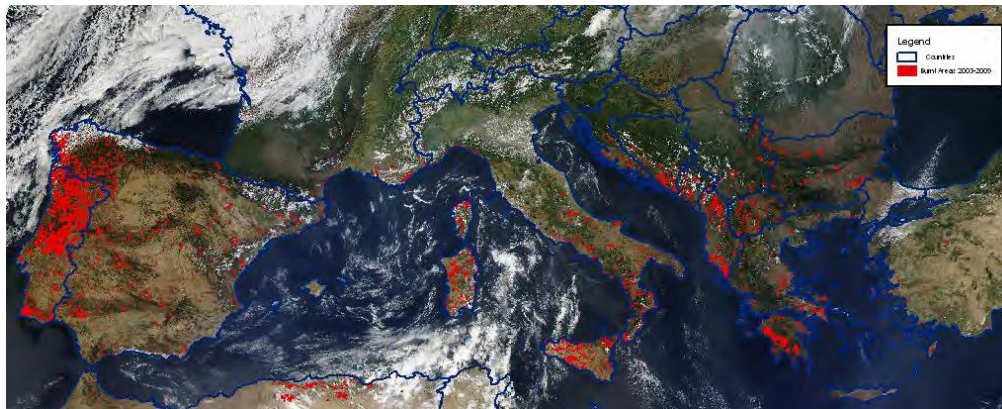
La clasificación y el análisis de incendios forestales mediante sensores remotos, requiere cierto conocimiento del efecto en la perturbación de la cobertura terrestre, sobre la reflectancia de la energía electromagnética. La variación de la respuesta espectral después de un incendio, se encuentra en función de la severidad y el tipo de vegetación (White et al., 1996).

En la actualidad, la detección remota se ha utilizado ampliamente para el mapeo de áreas quemadas, casi en tiempo real, a escala regional y global (figura 9), por ejemplo, las imágenes proporcionadas por el sensor MODIS a bordo de los satélites TERRA y AQUA, generan datos para la discriminación de áreas quemadas en estas escalas. La simultaneidad en la operación de ambos satélites proporciona una mayor frecuencia en la adquisición de datos, además, un suficiente tiempo de revisita para el mapeo preciso de las áreas quemadas. A escala mundial, el programa MODIS ha lanzado un producto estándar sobre áreas quemadas que se basa en un enfoque de detección de cambios multitemporales para analizar las diferencias entre la reflectancia modelada y la real (Roy et al., 2002) (Leblon et al., 2012).



## Figura 9

*Áreas quemadas en la región mediterránea europea entre 2000 y 2009.*



*Nota:* Extraído de (Leblon et al., 2012)

**Índices Espectrales.** Los índices espectrales son ampliamente utilizados en el campo de los sensores remotos, ya sea para el mapeo o clasificación de imágenes debido a que recuperan información sobre las propiedades biofísicas de la vegetación; estos, se definen como una ecuación matemática que se aplica a las distintas bandas de una imagen por píxel (Ceccato et al., 2002).

**Índice De Calcínación Normalizado (NBR).** El índice de quemado o calcínación normalizada (NBR), se presenta como un medio confiable en mapear o detectar áreas quemadas; por ejemplo, esto se lo demuestra en: (Loboda et al., 2007), (Picotte & Robertson, 2011), (Kolden et al., 2012) y (Hawbaker et al., 2020) citado en (Riet & Veraverbeke, 2022). El NBR, se calcula como la diferencia entre la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR) y del infrarrojo de onda corta (SWIR) dividida por su suma (ecuación 1) (Key & Benson, 2005) citado en (Gibson et al., 2020).

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad [1]$$

Según (USGS, 2021), los valores de clasificación para el NBR, se los representa en la tabla 1.

**Tabla 1**

*Valores de clasificación para el NBR.*

<b>Valor Inferior</b>	<b>Valor Superior</b>	<b>Descripción</b>
1	0,25	Alto crecimiento de vegetación posterior al fuego
0,25	0,1	Bajo crecimiento de vegetación posterior al fuego
0,1	- 0,1	Zonas estables o sin quemar
- 0,1	- 0,27	Zonas quemadas con gravedad baja
- 0,27	- 0,44	Zonas quemadas con gravedad moderada-baja
- 0,44	- 0,66	Zonas quemadas con gravedad moderada-alta
- 0.66	- 1	Zonas quemadas con gravedad alta

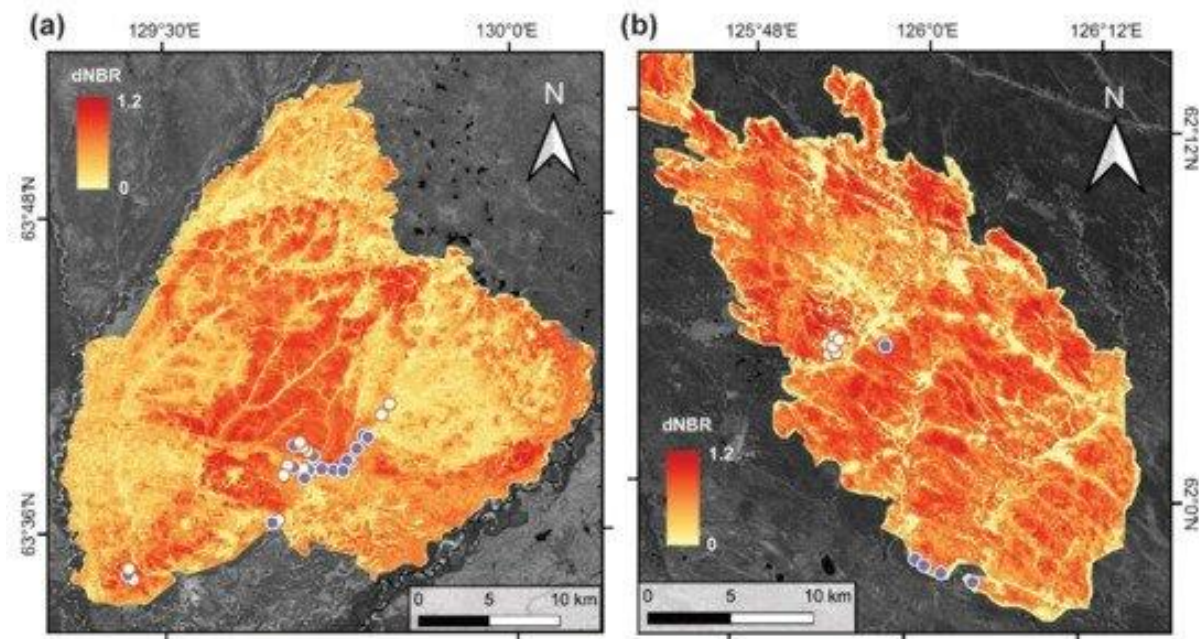
*Nota:* Extraído de (USGS, 2021).

Al hacer un análisis de detección de cambios producto de un incendio forestal, se presenta la alternativa de calcular el índice diferenciado de calcinación (dNBR), el cual, se define como la diferencia entre el NBR pre incendio y el NBR post incendio (ecuación 2), el mismo ayuda a producir un mapeo razonable de la variación espacial en la severidad dentro de un solo incendio, es decir, aproximadamente 60-70% de precisión en comparación con validación de campo (ver figura 10) (Miller & Thode, 2007) (Gibson et al., 2020) (Delcourt et al., 2021).

$$dNBR = NBR_{pre} - NBR_{post} \quad [2]$$

## Figura 10

Mapas del dNBR de (a) la cicatriz del incendio de Batamay (2017) y (b) la cicatriz del incendio de Yert (2018) en Siberia, Rusia



Nota: Extraído de (Delcourt et al., 2021)

Adicionalmente, en (Miller et al., 2009) se demostró que para mejorar la precisión del mapeo, se puede relativizar el dNBR con el NBR pre incendio, generando así el RdNBR o índice de calcinación normalizado diferenciado y relativizado (ecuación 3) (Gibson et al., 2020).

$$RdNBR = \frac{dNBR}{\sqrt{|NBR_{pre}|}} \quad [3]$$

## Imagen Satelital

Una imagen satelital es un archivo ráster generado por un sensor montado en una plataforma satelital, que representa visualmente, la información reflejada por la superficie de la Tierra, es decir, desde el punto de vista matemático, es una función bidimensional de la

intensidad de la luz  $f(x,y)$ , dónde el valor de la amplitud  $f$  para las coordenadas  $(x,y)$  da la intensidad (brillo) de la imagen en ese punto (pixel), cabe destacar que, como la luz es energía, el valor de  $f(x,y)$  no podrá ser nunca negativo (Menendez, 2009). Así, para un muestreo rectangular regularmente distribuido en el espacio (georreferenciado) y con igual distancia entre muestras en las direcciones  $x$  e  $y$ , tendremos una matriz de dimensiones  $N \times M$ , tal cual la figura 11, en la que cada elemento de la matriz es una cantidad discreta (Menendez, 2009).

### Figura 11

*Matriz imagen  $f(x, y)$ .*

$$f(x, y) = \begin{pmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0,M-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(N-1,0) & f(N-1,1) & \dots & f(N-1,M-1) \end{pmatrix}$$

*Nota:* La función  $f(x, y)$  representa lo que se conoce como imagen digital. Cada elemento de la matriz se conoce como "elemento de la imagen", en inglés "picture element" o píxel. (Menendez, 2009).

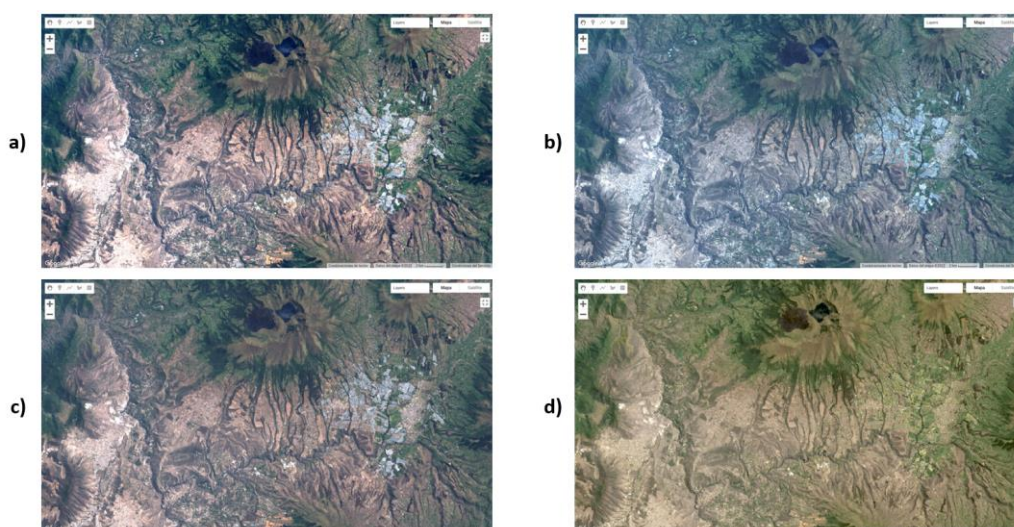
### **Preprocesamiento de las Imágenes Satelitales**

Los valores de los píxeles en las imágenes satelitales, expresan la cantidad de energía radiante recibida por el sensor en la forma de valores relativos no calibrados, llamados Números Digitales (ND) o brillo. En gran parte de las aplicaciones de la teledetección, como la clasificación de una imagen de fecha única usando métodos no supervisada, no es necesario convertir estos valores (Eastman, 2004). Cabe mencionar que, la dispersión y absorción provocada por los aerosoles resulta difícil corregir debido a su variación en el tiempo y el espacio, constituyendo la limitación más severa en la corrección radiométrica de los datos satelitales; la comparación visual entre los cambios que se producen en el procesamiento de

una imagen Landsat 8 con fecha 2020-08-11, centrada en el Cantón Pedro Moncayo, provincia de Pichincha – Ecuador, se la observa en la figura 12 (Song et al., 2001) (Brizuela et al., 2007).

### Figura 12

*Diferencia visual entre los productos del procesamiento de las imágenes Landsat en GEE: a) Sin procesar (RAW), b) radiancia escalada, c) Techo de la atmosfera (TOA) y d) reflectancia superficial en la base de la atmosfera (BOA).*



Dentro del preproceso de las imágenes satelitales, forman parte los siguientes subprocesos:

**Corrección Radiométrica.** Idealmente, cualquier superficie capturada en dos diferentes imágenes de satélite (con el mismo sensor) deberían aparecer con los mismos valores de intensidad. En la práctica, esto no suele llegar a cumplirse debido a las inevitables y diferentes condiciones atmosféricas y de iluminación, por lo que se hace necesaria la corrección radiométrica de las imágenes.

Para ello, se han estudiado dos alternativas: la corrección absoluta utilizando un modelo analítico, y la corrección relativa mediante una transformación de niveles basada en el

histograma. La primera fue descartada porque el modelo requerido es extremadamente complejo y con multitud de parámetros, algunos de ellos desconocidos, relativos a la órbita del satélite, las condiciones atmosféricas locales, variaciones estacionales y geométricas, nubosidad, lluvia, entre otros (Riaño et al., 2000). Por lo tanto, se ha implementado el segundo enfoque, denominado especificación de histograma, que consiste en modificar el nivel de intensidad de un pixel de la imagen a corregir mediante una transformación tal que el histograma de la imagen resultante sea similar al de la imagen de referencia (Ambrosio et al., 2002).

**Corrección Atmosférica.** La corrección atmosférica busca recuperar la radiancia intrínseca del objeto de estudio, obtenida de la señal recibida por el sensor. Para ello se requiere: 1) convertir los ND de cada banda a valores de radiancia, 2) la radiancia se transforma a valores de reflectividad en el tope o techo de la atmósfera (TOA, por sus siglas en inglés) y 3) se obtiene la conversión a valores de reflectancia en la base de la atmósfera (BOA) (Brizuela et al., 2007).

Los valores en ND son proporcionales a la radiancia capturada originalmente por el sensor, por lo que es posible recuperar la escala original de radiancia aplicando la fórmula de conversión respectiva de cada banda de la imagen, la cual es calculada durante la calibración inicial del sensor y, por lo general, la misma está disponible junto con la información técnica del sensor. Los efectos de dispersión y distorsión atmosféricos se compensan por medio de fórmulas matemáticas. En términos generales, la corrección atmosférica requiere la recodificación de la imagen, transformación a radiancia e identificación de las bandas y parámetros del sensor (Brizuela et al., 2007).

La ecuación 4, transforma valores de reflectancia a radiancia TOA, esta es descrita en (Ariza, 2013) de la siguiente manera:

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{cal} - A_L \quad [4]$$

Donde:

- $L_{\lambda}$  = Valor de radiancia espectral en el techo de la atmosfera (TOA) medida en valores de (Watts /m2 \* srad \*  $\mu$ m))
- $M_L$  = Banda – Factor multiplicativo de escalado especifico obtenido del metadato (RADIANCE\_MULT\_BAND\_x, donde x es el número de la banda)
- $Q_{cal}$  = Producto estándar cuantificado y calibrado por valores de pixel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.
- $A_L$  = Banda – Factor aditivo de escalado especifico obtenido del metadato (RADIANCE\_ADD\_BAND\_x, donde x es el número de la banda)

**Corrección Geométrica.** Este proceso conlleva la transformación de las coordenadas de los pixeles a fin de que la información, que es captado por el sensor, calce de manera casi perfecta con su representación sobre la superficie terrestre. Se realiza mediante una transformación polinomial de segundo grado que se obtiene a partir de un conjunto de pares de puntos de control en Tierra (GCP) (Brizuela et al., 2007).

**Registro o Corregistro Geométrico.** El registro geométrico es una parte inevitable en la mayoría de las técnicas de detección de cambios, la cual, se utiliza si las imágenes que se van a procesar se adquieren con diferentes sensores, dado que puede haber desplazamientos debido a la diferencia en el ángulo de visión del sensor (Zhang et al., 2016). El corregistro es de suma importancia ya que dichos desplazamientos de imagen pueden desarrollar ciertos cambios falsos en el resultado, lo que afecta la precisión de la detección de cambios y conduce a píxeles mal clasificados (Asokan & Anitha, 2019).

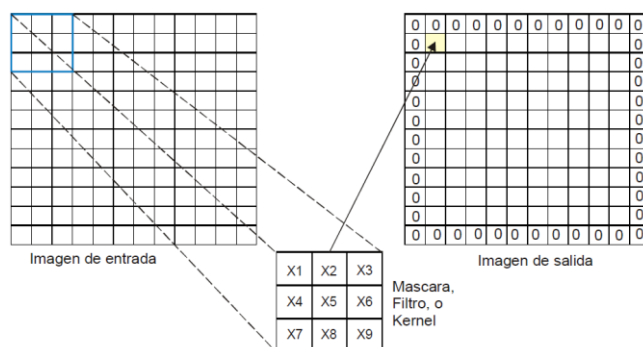
Hay tres pasos principales en el procedimiento de registro de imágenes: 1) recopilación de pares de puntos coincidentes, 2) estimación del modelo de transformación, 3) transformación de imágenes y remuestreo (Zhang et al., 2016).

Cabe destacar que, el proceso de registro de imágenes está diseñado para ser un paso final, post ortorectificación y detallado en la alineación de imágenes. Con lo cual, se supone que las imágenes que se van a ser registradas ya han pasado por las etapas iniciales de alineación; por ende, se encuentran dentro de unos pocos grados de rotación entre sí y difieren solo en pequeñas traslaciones (Google Developers, 2021a).

**Filtros.** Estos, son funciones que se suelen aplicar a las imágenes digitales para acentuar o suavizar las variaciones o contrastes de la frecuencia en los ND de los píxeles. Estas, hacen un realce visual de la imagen para mejorar su interpretación (D. J. Pérez, 2007). Los filtros operan mediante una matriz móvil, llamada máscara o kernel, la cual es de tamaño variable y contiene un coeficiente o factor de ponderación (figura 13). Cabe destacar que, el filtrado modifica los valores de los ND originales, por ende, se tiene que considerar que dichos cambios no alteren los resultados posteriores (D. J. Pérez, 2007).

### Figura 13

*Esquema de aplicación de un filtro.*



*Nota:* Extraído de (D. J. Pérez, 2007).



## **Exactitud Posicional**

La exactitud posicional hace referencia a la proximidad que tiene un producto cartográfico, a su verdadera posición en el terreno; cabe señalar que, el valor verdadero, estadísticamente, siempre es desconocido, por lo cual, se tiene que tener de fuentes fiables de información cartográfica, la base sobre la que se va a evaluar, para que las coordenadas de un objeto geográfico sean aceptadas como verdaderas dentro de un determinado sistema de referencia (Ariza López et al., 2020) citado en (Aingla & Gavilanez, 2022).

Referente a la metodología de evaluación de la exactitud posicional, existen diferentes estándares o normas a nivel internacional, de las cuales se destacan las siguientes: NMAS (National Map Accuracy Standard, 1947), EMAS (Engineering Map Accuracy Standard, 1983) y NSSDA (National Standard for Spatial Data Accuracy, 1998); esta última, fue desarrollada en los Estados Unidos y lo utilizan las agencias federales de dicho país que producen información geográfica y que están obligadas a cumplir con los estándares del FGDC (Federal Geographic Data Comitee). (Ariza López et al., 2020) citado en (Aingla & Gavilanez, 2022).

### ***Test NSSDA (National Standard for Spatial Data Accuracy of USA)***

El test NSSDA, fue publicado en el año de 1998 como remplazo del NMAS, teniendo de obligado cumplimiento a todas las agencias nacionales en los Estados Unidos que generen información cartográfica (Ariza López et al., 2020) (Castro, 2019). Mediante estadísticos, este estándar estima la precisión posicional de puntos en mapas y datos geoespaciales, con relación a información terrestres georreferenciada de mayor precisión (Aingla & Gavilanez, 2022). Con respecto al procedimiento, según (Castro, 2019), se lo lleva a cabo de la siguiente manera:

Primero, se seleccionan y se extraen las coordenadas sobre una muestra de al menos 20 puntos de control dobles perfectamente empatados tanto en el producto cartográfico, como en la fuente de mayor exactitud posicional.

Segundo, se extraen los desplazamientos tanto en Este (eje x) como en Norte (eje y) de cada uno de los puntos de control, con su respectivo homólogo de mayor exactitud posicional; esto se lo lleva a cabo mediante la ecuación 5.

$$d_x = (X_{dato} - X_{control}) \text{ and } d_y = (Y_{dato} - Y_{control}) \quad [5]$$

Donde:

$d_x$  = Desplazamiento en el eje Este.

$d_y$  = Desplazamiento en el eje Norte.

Tercero, se determina el error cuadrático medio (RMSE) para cada uno de los desplazamientos, es decir, tanto en X ( $RMSE_x$ ) como en Y ( $RMSE_y$ ); esto se lo lleva a cabo mediante la ecuación 6 y está en función del número de puntos de control ( $n$ ).

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{dato,i} - X_{control,i})^2}{n}} \text{ and } RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{dato,i} - Y_{control,i})^2}{n}} \quad [6]$$

Cuarto, se determina el error cuadrático medio real ( $RMSE_r$ ), el cual es la raíz de la suma de los cuadrados del ( $RMSE_x$ ) y el ( $RMSE_y$ ), tal cual la ecuación 7.

$$RMSE_r = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2} \quad [7]$$

Y quinto, se calcula el coeficiente de exactitud posicional real ( $Exactitud_r$ ), este posee un nivel de confianza del 95% y varía dependiendo de la igualdad o no, entre el  $RMSE_x$  y el  $RMSE_y$ , generando así las ecuaciones 8 y 9:

$$\text{Si } RMSE_x = RMSE_y \rightarrow Exactitud_r = 1.7308 * RMSE_r \quad [8]$$

$$\text{Si } RMSE_x \neq RMSE_y \rightarrow Exactitud_r = 1.22385 * (RMSE_x + RMSE_y) \quad [9]$$

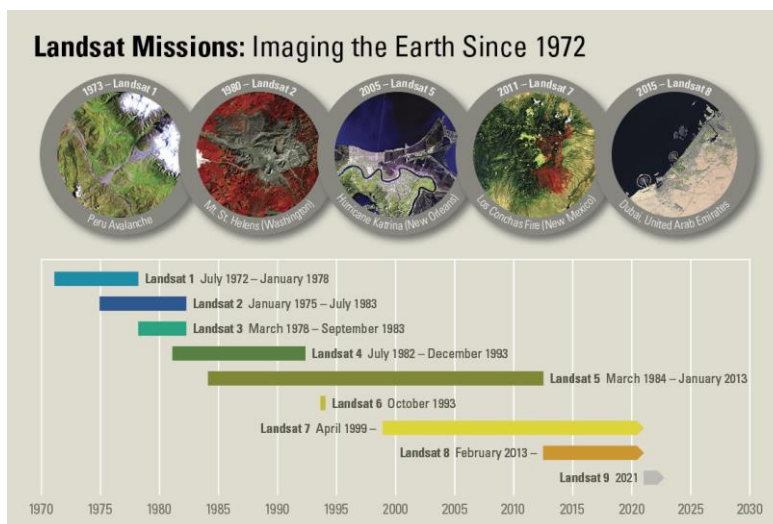
Cabe destacar que, del presente test se obtiene un índice de calidad de la cartografía en unidades reales sobre el terreno, por lo que, le corresponde al usuario el establecer los márgenes de aceptación en función de las bases de su proyecto (Castro, 2019).

### Misión Landsat

El 23 de julio de 1972, se produjo el lanzamiento del Satélite de Tecnología de Recursos Terrestres (ERTS-1), rebautizado como Landsat 1. Los lanzamientos de Landsat 2, Landsat 3 y Landsat 4 siguieron en 1975, 1978 y 1982, respectivamente (figura 14). Landsat 5 se lanzó en 1984 y proporcionó datos superficies terrestres de la Tierra durante 28 años debido a las fallas de Landsat 6 y 7; por último, Landsat 8 en 2013 y Landsat 9 en septiembre de 2021 (USGS, 2016).

### Figura 14

*Misiones Landsat.*



*Nota:* Extraído de (USGS, 2016).

La continuidad de la misión Landsat está respaldada por la Ley de teledetección terrestre de EE.UU. de 1992, esta sostiene que el gobierno de EE.UU. debe garantizar un

archivo de imágenes Landsat global y permanente para permitir el monitoreo a largo plazo de la superficie terrestre y el clima cambiantes de la Tierra, tanto naturales como inducidos por el hombre (Wulder et al., 2008) extraído de (Wulder et al., 2019).

### **Plataforma Landsat 8**

La colección de imágenes Landsat 8 (anteriormente Landsat Data Continuity Mission, o LDCM) fue lanzado en un cohete Atlas-V desde la Base de la Fuerza Aérea de Vandenberg, California, el 11 de febrero de 2013 (USGS, 2016).

A bordo del satélite Landsat 8, se encuentran los sensores: Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS). Dentro de las principales características de la plataforma se encuentran: que alcanza una altitud sobre la superficie terrestre de 705 km, completa la órbita terrestre cada 99 minutos, tiene un ciclo de repetición de 16 días con un tiempo de cruce ecuatorial de 10:00 am +/- 15 minutos, adquiere alrededor de 740 escenas por día con una superposición de franjas (o superposición lateral) que varía desde el 7% en el ecuador hasta un máximo de aproximadamente el 85 % en latitudes extremas (USGS, 2016).

Los archivos de datos de imágenes Landsat 8 y 9, constan de 11 bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las bandas 1-7 y las bandas 9-11; 15 metros para la banda pancromática o banda 8 (tabla 2) (USGS, 2016).

#### **Tabla 2:**

*Características de las bandas de las imágenes Landsat 8.*

<b>Resolución espacial</b>	<b>Bandas</b>	<b>Descripción</b>	<b>Longitud de onda (µm)</b>
30	Banda 1	Aerosol costero	0.43 - 0.45
30	Banda 2	Azul	0.45 - 0.51
30	Banda 3	Verde	0.53 - 0.59
30	Banda 4	Rojo	0.64 - 0.67

Resolución espacial	Bandas	Descripción	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )
30	Banda 5	Infrarrojo cercano	0.85 - 0.88
30	Banda 6	Infrarrojo de onda corta 1	1.57 - 1.65
30	Banda 7	Infrarrojo de onda corta 2	2.11 - 2.29
15	Banda 8	Banda 8 Pancromática	0.52 - 0.90
30	Banda 9	Cirro	1.36 - 1.38
30	Banda 10	Infrarrojo térmico 1, remuestreado de 100m a 30m	10.60 - 11.19
30	Banda 11	Infrarrojo térmico 2, remuestreado de 100 m a 30m	11.50 - 12.51
30	QA pixel	Máscara de control de calidad Landsat Colección 2	

*Nota:* Modificado de (Google Developers, 2021b)

**Nivel de Procesamiento.** El nivel de procesamiento se encuentra en función de la existencia de puntos de control en tierra (GCP), datos de altura proporcionados por varios modelos digitales de elevación (MDE) y/o datos recopilados por la nave espacial y el sensor (Datos de corrección de carga útil) (Wulder et al., 2019).

**Nivel 1.** Los datos nivel 1 cumplen ciertas características descritas en la tabla 3 y están disponibles para descargar desde la página “EarthExplorer” perteneciente al USGS, la cual se encuentra en la dirección <https://earthexplorer.usgs.gov/>, cumpliendo así con la política de datos abiertos sin costo de USGS Landsat (EROS, 2020).

### Tabla 3

*Colecciones de Landsat Nivel-1, Niveles de procesamiento.*

Nivel de procesamiento	Descripción
Corrección de precisión del terreno (L1TP)	Calibrado radiométricamente y ortorrectificado utilizando puntos de control terrestre (GCP) y datos del modelo de elevación digital (DEM) para corregir el desplazamiento del relieve.

Nivel de procesamiento	Descripción
<b>Corrección sistemática del terreno (L1GT)</b>	Calibrado radiométricamente con correcciones geométricas sistemáticas aplicadas utilizando los datos de efemérides de la nave espacial y los datos DEM para corregir el desplazamiento del relieve.
<b>Corrección Sistemática Geométrica (L1GS)</b>	Calibración radiométrica con solo correcciones geométricas sistemáticas aplicadas utilizando los datos de efemérides de la nave espacial.

*Nota:* Extraído de (USGS, 2019).

**Nivel 2.** Los productos científicos Landsat nivel 2 se generan a partir de las entradas de nivel 1 que cumplen con la restricción del ángulo cenital solar de < 76 grados e incluyen las entradas de datos auxiliares necesarias para generar un producto científicamente viable (USGS, 2020).

En el procesamiento de la temperatura y la reflectancia de la superficie de Landsat nivel 2, se requiere la entrada de datos auxiliares atmosféricos de fuentes de datos externas del USGS. Este, recupera información de la fuente de datos y extrae parámetros específicos del procesamiento de nivel 2 de Landsat Colección 2. Estos subconjuntos están disponibles para descargar para los usuarios que deseen realizar un procesamiento de nivel 2. No es necesario que los usuarios descarguen datos auxiliares atmosféricos para utilizar los productos Colección 2 Level-2 (USGS, 2020).

Los productos de temperatura y reflectancia superficial de nivel 2 suelen estar disponibles en un plazo de 24 a 72 horas después de que una escena se haya procesado en el nivel 1 o el nivel 2 (USGS, 2020).

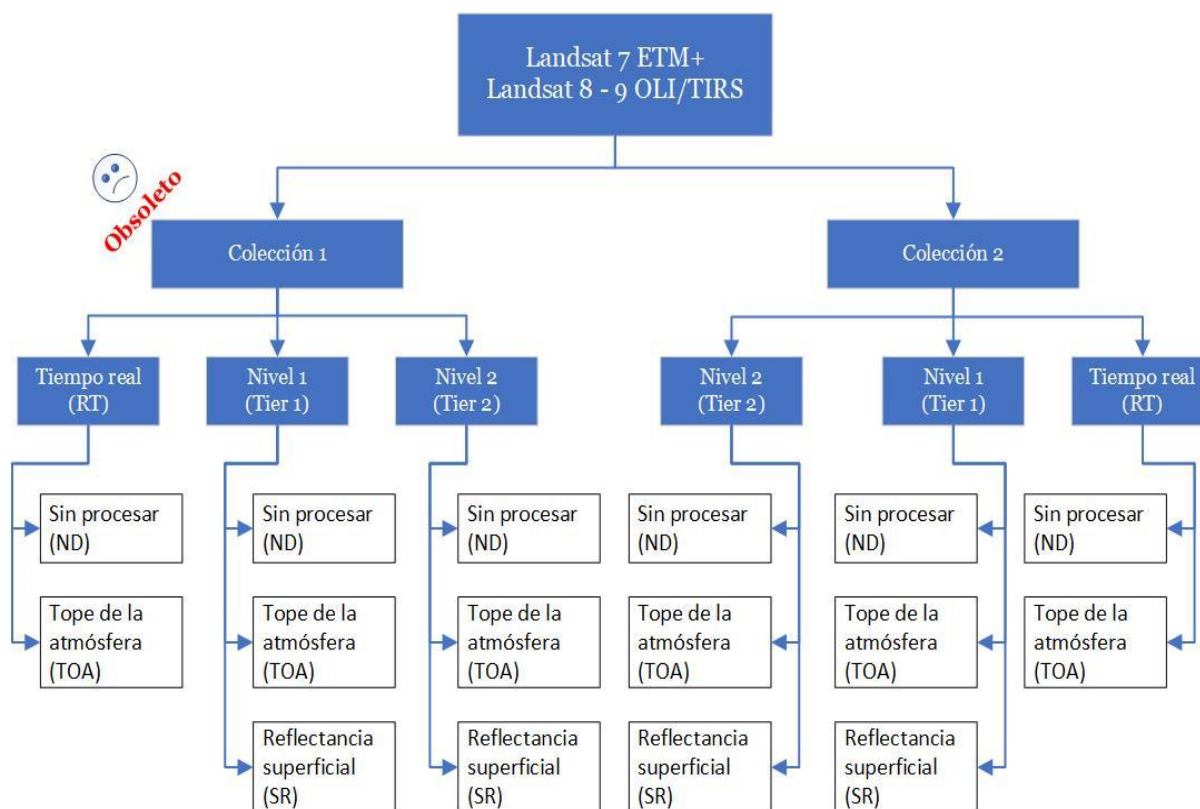
Para Landsat 8 OLI/TIRS, se tarda aproximadamente 14-16 días en procesarse a un producto de nivel 1 o nivel 2, mientras que los parámetros refinados del modelo de línea de visión del instrumento TIRS se aplican a las escenas en tiempo real (USGS, 2020).

Para Landsat 9 OLI/TIRS, toma aproximadamente de 4 a 6 horas procesar a un producto de Nivel 1 o Nivel 2 y aproximadamente 3 días procesar a un producto de Nivel 2 (USGS, 2020).

**Tipos de Productos Landsat 8 y 9.** Las imágenes Landsat 8 -9 OLI/TIRS proporcionadas por la USGS generan diferentes productos, los cuales se pueden clasificar acorde a la colección, nivel de recopilación o categoría, y nivel de procesamiento; tal como se representa en la figura 15.

**Figura 15**

*Clasificación de las imágenes Landsat acorde a su tipo de procesamiento.*



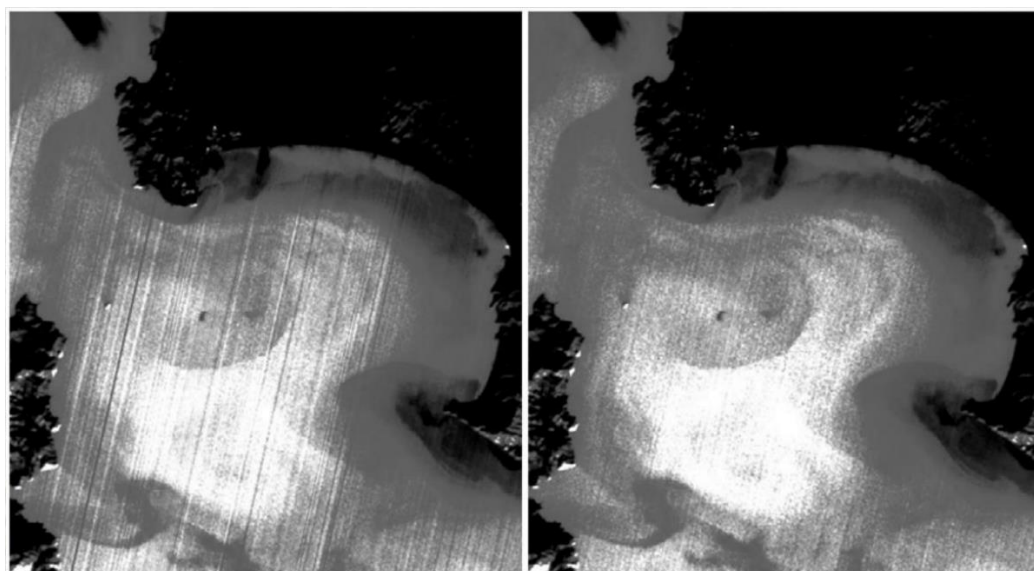
*Nota:* Los productos de la Colección 1 permanecerán disponibles para su búsqueda y descarga hasta el 31 de diciembre de 2022 (Wulder et al., 2019).

**Tipo de Colección.** El manejo de colecciones es una manera de trabajar dentro de los datos Landsat, la cual garantiza la calidad de las imágenes a lo largo del tiempo y entre los instrumentos.

El objetivo de las colecciones es calibrar las escenas Landsat y determinar la calidad de cada pixel, proporcionando más datos usables (USGS, 2016). La figura 16, representa una diferencia visual entre una imagen de banda 10 Landsat 8 con franjas radiométricas, cuando se procesa en la Colección 1 (izquierda) y la reducción visible de las franjas en la Colección 2 (derecha).

### Figura 16

*Ejemplo visual de la diferencia entre las Colecciones 1 (izquierda) y Colección 2 (derecha)*



*Nota:* Extraído de (USGS, 2021)

**Colección 1.** Los datos de Colección 1 constan de productos de nivel 1 desde 1972 a 2021 y se generan a partir de los sensores OLI y TIRS de Landsat 8. Los algoritmos utilizados para la generación de la Colección 1 Landsat se enumeran a continuación:



- Reflectancia de la superficie terrestre (LaSRC): versión 1.3.0
- Landsat 4-8 Temperatura superficial provisional (ST): Versión 1.3.0
- Extensión dinámica de aguas superficiales de Landsat (DSWE): versión 2.3.0
- Landsat Fractional Snow Covered Area (fSCA): Versión 1.2.0
- Landsat Burned Area (BA): Versión 1.2.0 (USGS, 2019).

El procesamiento basado en Landsat Colección 1 finalizó el 31 de diciembre de 2021. A partir del 1 de enero de 2022, todas las nuevas adquisiciones de Landsat se procesan únicamente en la estructura de inventario de Colección 2. Los productos de la Colección 1 permanecerán disponibles para búsqueda y descarga hasta el 31 de diciembre de 2022 (USGS, 2019).

*Colección 2.* Landsat Colección 2 incluye productos científicos de temperatura de superficie y reflectancia superficial global de nivel 2, basados en escenas. Los productos de reflectancia superficial Landsat 8/9 Operational Land Imager (OLI) se generan utilizando el algoritmo Land Surface Reflectance Code (LaSRC), Versión 1.5.0. Los productos de temperatura superficial Landsat 4-9 se generan utilizando el algoritmo de temperatura superficial Landsat, Versión 1.3.0, desarrollado en cooperación con el Instituto de Tecnología de Rochester y el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA (USGS, 2021).

Las principales mejoras de los datos de la Colección 2 incluyen: un rediseño de las operaciones del sensor Landsat 8 (OLI), puntos de control en tierra (GCP) en cooperación con la Unión Europea y la Agencia espacial Copernicus Sentinel 2, referencia global Imagen (GRI) para mejorar la interoperabilidad de la red global Archivo Landsat espacial y temporalmente; actualización de fuentes de modelado de elevación digital global; y mejorar la accesibilidad desde una nube comercial (USGS, 2021).

**Nivel de Recopilación.** Los niveles de recopilación de Landsat son la estructura del inventario para los productos generados a partir de los sensores OLI/ TIRS, estos, se basan en la calidad de los mismos y el nivel de procesamiento.

El propósito de la definición de niveles de recopilación, es generar una identificación más sencilla de las escenas para el análisis de series temporales y proporcionar datos que se procesen inmediatamente después de la toma para una distribución rápida en situaciones de respuesta de emergencia con calibración limitada (USGS, 2021).

*Tiempo Real (Real Time, RT).* Los datos Landsat 8 y Landsat 9 OLI/TIRS recién adquiridos se procesan en el enlace descendente, pero utilizan los parámetros iniciales del modelo de línea de visión TIRS. Estos datos se colocan en el nivel de tiempo real y están disponibles para su descarga en menos de 12 horas, normalmente de 4 a 6 horas (USGS, 2021).

Una vez que los datos han sido reprocesados y actualizados con los parámetros refinados, los productos se transfieren al Tier 1 o Tier 2 y se eliminan del nivel de tiempo real. El retraso de transición de Tiempo Real a Tier 1 o Tier 2 de entre 14 y 26 días. Los datos OLI y TIRS de Landsat 9 están disponibles en menos de 12 horas (normalmente de 4 a 6 horas) para un Tier 1 o Tier 2 directamente después del procesamiento (USGS, 2021).

*Tier 1.* Las escenas de Landsat con la calidad de datos más alta disponible se colocan en Tier 1 y se consideran adecuadas para el análisis de series temporales. Esta categoría incluye datos corregidos de precisión y de terreno en Nivel 1 (L1TP) que tienen una radiometría bien caracterizada y están intercalibrados entre los diferentes instrumentos Landsat. El georregistro de las escenas Tier 1 es coherente y se encuentra dentro de las tolerancias prescritas de imagen a imagen, es decir, posee un error cuadrático medio de la (RMSE) menor o igual a 12 metros (USGS, 2021).

*Tier 2*. Las escenas de Landsat que no cumplen con los criterios de Tier 1 durante el procesamiento se asignan al Tier 2. Las escenas del Tier 2 se adhieren al mismo estándar radiométrico que las escenas del Tier 1, pero no cumplen con la especificación de geometría debido a la información orbital menos precisa, una nubosidad significativa, GCP insuficientes y/u otros factores. Esto incluye datos procesados L1GT y L1GS. Los usuarios interesados en escenas de Tier 2 pueden consultar el RMSE y otras propiedades para determinar la idoneidad de su aplicación (USGS, 2021).

### **Misión Sentinel**

Las misiones Sentinel, de la Agencia Espacial Europea (ESA), están coordinadas por el Programa Copernicus, que a su vez, forma parte del programa de observación de la Tierra de la Unión Europea (UE), las mismas se encuentran financiadas por los estados miembros de la UE y las agencias de la UE (Drusch et al., 2012) . El Programa Copernicus tiene tres objetivos principales: (1) producir y difundir información para apoyar las políticas globales de la UE para el medio ambiente y la seguridad, (2) proporcionar una plataforma para accionistas, proveedores y usuarios para el diálogo y la colaboración, y (3) proporcionar un marco legal, financiero, organizativo e institucional para el buen funcionamiento de las misiones satelitales de la ESA (Phiri et al., 2020).

### **Plataforma Sentinel 2**

Sentinel 2 (S2) es una misión de imágenes multispectrales de alta resolución y amplia franja, con una frecuencia de revisión global de 5 días en el ecuador debido a que la plataforma se basa en la constelación de dos satélites (Sentinel 2A y Sentinel 2B), los cuales, reducen el tiempo de revisita; por lo tanto, proporcionan una imagen en un menor tiempo que su principal competencia. El instrumento multispectral (MSI) a bordo del S2 muestrea 13 bandas espectrales desde VNIR hasta SWIR (Phiri et al., 2020).

Los datos de Sentinel 2 tienen una cobertura de la superficie terrestre desde la latitud 56° S a 84° N, las aguas costeras y todo el Mar Mediterráneo (Immitzer et al., 2016) (Phiri & Morgenroth, 2017) extraído de (Phiri et al., 2020). La misión Sentinel 2 tiene un campo de visión de 290 km aproximadamente (Yan et al., 2016). Posee una órbita helio sincrónica a una altitud de 786 km, y un total de 14,3 revoluciones por día, con un nodo descendente a las 10:30 am en el ecuador (Xu et al., 2019); esta hora local se selecciona para minimizar la cobertura de nubes y garantizar una iluminación solar adecuada. El tiempo de paso por el ecuador del satélite Sentinel 2 coincide con el de las plataformas Landsat y SPOT, por lo cual, al combinar los datos de Sentinel 2 con imágenes históricas de otras plataformas se pueden generar series temporales a largo plazo, las cuales, son necesarias para el monitoreo de los recursos naturales (Immitzer et al., 2016) extraído de (Phiri et al., 2020). En cuanto a la descripción del tamaño de pixel (resolución espacial), longitud de onda y el número de bandas (resolución espectral), se las describe en el mediante la tabla 4.

**Tabla 4**

*Características de las imágenes satelitales ESA Sentinel 2A y 2B.*

Resolución espacial (m)	Bandas	Sentinel 2A		Sentinel 2B	
		Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)
10	Banda 2—Azul	492.4	66	492.1	66
	Banda 3—Verde	559.8	36	559	36
	Banda 4: roja	664.6	31	664.9	31
	Banda 8—NIR	832.8	106	832.9	106
20	Banda 6: borde rojo	740.5	15	739.1	15
	Banda 7: borde rojo	782.8	20	779.7	20
	Banda 8A: NIR estrecha	864.7	21	864	22

Resolución espacial (m)	Bandas	Sentinel 2A		Sentinel 2B	
		Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)
60	Banda 11 - SWIR	1613.7	91	1610.4	94
	Banda 12 - SWIR	2202.4	175	2185.7	185
	Banda 1 - Aerosol costero	442.7	21	442.2	21
	Banda 9 - Vapor de agua	945.1	20	943.2	21
	Banda 10 - SWIR - Cirro	1373.5	31	1376.9	30

Nota: Las 13 bandas para imágenes Sentinel 2 tienen resoluciones espaciales que van desde 10 a 60 m. Extraído de (Phiri et al., 2020).

**Tipos de Productos Sentinel 2.** Los productos son una compilación de: mosaicos elementales de tamaño fijo o llamados gránulos, junto con una órbita única. Un gránulo es la mínima partición indivisible de un producto (que contiene todas las bandas espectrales posibles) (ESA, 2015). Los tipos de productos de Sentinel 2, se clasifican acorde a su nivel de procesamiento en la que se tienen ciertas mejoras, tal como se observa en la figura 17.

### Figura 17

*Datos de imagen de nivel 1C (izquierda) y nivel 2A (derecha).*



Nota: Extraído de (ESA, 2015).

**Nivel 0.** El producto de nivel 0 son datos de imagen sin procesar y en tiempo real, comprimidos en formato de paquete de fuente de instrumento (ISP). Al igual que el producto de nivel 1B, un producto de nivel 0 cuenta con un mosaico de 25 km de ancho por 23 km de longitud; una órbita promedio contendrá aproximadamente 3500 mosaicos de nivel 0. Los productos nivel 0 no se encuentran disponibles a los usuarios (ESA, 2015).

**Nivel L1A.** El producto L1A se obtiene descomprimiendo los datos de imagen sin procesar de nivel 0, sobre el cual, se desarrolla un modelo geométrico que permite localizar cualquier píxel de la imagen. Cada producto de nivel 1A es un mosaico de 25 km de ancho de vía (AC) por 23 km de largo de vía (AL); una órbita promedio contendrá aproximadamente 3500 mosaicos de nivel 1A. Las coordenadas de píxel de nivel 1A se refieren al centro de los mismos. Los productos nivel L1A no se encuentran disponibles a los usuarios (ESA, 2015).

**Nivel L1B.** El producto Level-1B proporciona imágenes corregidas radiométricamente en valores de radiancia de la parte superior de la atmósfera (TOA) y georreferenciada en la geometría del sensor, además, este producto incluye el modelo geométrico refinado.

Las correcciones radiométricas aplicadas al L1B son: señal oscura, respuesta de píxeles sin uniformidad, corrección de diafonía, interpolación de píxeles defectuosos, restauración de bandas de alta resolución espacial y filtrado espacial para las bandas de 60m; adicionalmente se lleva a cabo un remuestreo en la cuadrícula de geometría común para el registro entre la Imagen de Referencia Global (GRI) y la banda de referencia (B4 por defecto).

L1B están compuestos por un conjunto de mosaicos que tienen 25 km de ancho de vía (AC) por 23 km de largo de vía (AL). Cada mosaico tiene un tamaño aproximado de 27 MB. Los productos nivel L1B no se encuentran disponibles a los usuarios (ESA, 2015).

**Nivel L1C.** El producto L1C está compuesto por mosaicos de 100x100 km<sup>2</sup> (ortoimágenes en proyección UTM/WGS84). El producto L1C resulta del uso de un MDE para

proyectar la imagen en una cartografía geométrica. Las mediciones radiométricas por píxel se proporcionan en las reflectancias al Tope de la Atmósfera (TOA), junto con los parámetros para transformarlas en radiancias. Los productos de nivel 1C se vuelven a muestrear con una distancia de muestreo terrestre (GSD) constante de 10, 20 y 60 m según la resolución nativa de las diferentes bandas espectrales. En los productos de L1C, las coordenadas geométricas de cada píxel se refieren a la esquina superior izquierda de los mismos (ESA, 2015).

El procesamiento de nivel 1C se lleva a cabo siguiendo los siguientes pasos: (1) Selección de mosaicos predefinidos que se cruzan con la huella de la imagen requerida. (2) Cálculo de cuadrícula de remuestreo: permite vincular la imagen de geometría nativa a la imagen de geometría de destino (ortorrectificada). (3) Remuestreo de cada banda espectral en la geometría de la ortoimagen utilizando las rejillas de remuestreo y un filtro de interpolación. El cálculo de las reflectancias TOA también ocurre en este paso. (4) Cálculo de máscaras: se generan máscaras de nubes y tierra/agua. (5) Compresión de imágenes de las imágenes de nivel 1C resultantes a través del algoritmo (ESA, 2015).

**Nivel L2A.** El producto L2A proporciona imágenes de reflectancia en la base de la atmósfera (BOA) derivadas de los productos L1C asociados. Cada producto de Nivel 2A está compuesto por mosaicos de 100x100 km<sup>2</sup> (proyección UTM/WGS84). Los productos L2A se generan sistemáticamente en Europa desde marzo de 2018, y la producción se amplió a nivel mundial en diciembre de 2018. El usuario también puede realizar la generación de nivel 2A a través de Sentinel 2 Toolbox utilizando como entrada el L1C (ESA, 2015).

Los resultados adicionales son: un mapa de espesor óptico de aerosoles (AOT), un mapa de vapor de agua (WV), un mapa de clasificación de escenas (SCM) junto con indicadores de calidad (QI) para probabilidades de nubes y nieve; estos datos, son generados a

una resolución de 60m. Los productos de imagen de salida de nivel 2A se volverán a muestrear y generar con una resolución espacial igual para todas las bandas (ESA, 2015).

## **Ocupación, Cobertura y Uso del Suelo**

### ***Ocupación del Suelo***

La ocupación del suelo, es el estudio de la superficie terrestre teniendo como objetivo clasificar y describir la cubierta, el uso del suelo y demás características susceptibles en la gestión territorial, cuyos resultados son las coberturas del suelo (LC) y uso del suelo (US) (IGN, 2014).

### ***Cobertura del Suelo (Land Cover, LC)***

La cobertura del suelo es la categorización de la superficie terrestre en distintas unidades según sus propiedades biofísicas, como: superficie urbana, cultivos, arbolado forestal, etc. Se puede obtener a través de: simple observación, ortoimágenes aéreas, imágenes satélites, bases topográficas, entre otras; las mismas se pueden clasificar a través de técnicas automáticas de procesamiento, fotointerpretación o visita a campo (IGN, 2014).

### ***Uso del Suelo***

El uso del suelo, es la caracterización del territorio de acuerdo con su dimensión funcional o su dedicación socioeconómica; puede ser clasificado como: uso industrial, comercial, recreativo, etc. Adicionalmente, el uso tiene que estar normado y plasmado en los planes de ordenamiento territorial, es por ello que, este no se obtiene por observación directa y requiere recurrir a: inventarios sociales, planes urbanísticos y fuentes diversas de actividades económicas (IGN, 2014).

### ***Unidad Mínima Mapeable (UMM)***

Se define como el detalle geométrico mínimo que contiene información, a ser representada como área, estas pueden ser:



- Tamaño mínimo de polígono permitido (25 ha, 5 ha etc.).
- Resolución de la imagen ráster (30m, 5m, etc.).
- Distancia mínima entre puntos si es un sistema de puntos por muestreo (5km, 500m etc.) (IGN, 2014).

La tabla 5 define los parámetros normalmente respetados para la unidad mínima mapeable, acorde a la escala trabajo.

**Tabla 5**

*Unidad mínima mapeable acorde a diferentes criterios.*

<b>Escala</b>	<b>Error máximo admisible lineal [m]</b>	<b>Mínima resolución de la imagen de referencia [m]</b>	<b>Tamaño mínimo aprox. de polígono [ha]</b>
1:5.000	1	0.5	0.05
1:10.000	2	1	0.25
1:25.000	5	2.5	1.5
1:50.000	10	5	6.25
1:100.000	20	10	25
1:250.000	50	25	150
1:1.000.000	200	100	2500

*Nota:* Extraído de (IGN, 2014).

Existe la posibilidad de que los detalles dentro del área de estudio, sean menores al del polígono mínimo de representación, para ello se plantean las siguientes soluciones:

- Obviar los detalles menores. De esta forma sólo se representarán dentro de la unidad mínima la clase más predominante. La desventaja de esta práctica, es que

acarrea pérdida de información, pero por el contrario resulta sencilla y rápida (Blaschke & Hay, 2001).

- Generar clases mixtas. En este caso se generará una clase especial que represente un conjunto de varias clases, sin embargo, también acarrea cierta pérdida de información, pero menos que en el caso anterior. Aunque, se corre el riesgo de hacer muchas clases mixtas sin utilidad real (Blaschke & Hay, 2001).
- Identificación y medida de todas las clases. Se identifican todas las clases presentes dentro de la unidad mínima y se registran alfanuméricamente asociadas a la geometría. Implica identificar qué clases se observan dentro de las unidades y asociar la superficie de cada una de ellas. De esta forma no se tiene casi pérdida de información, pero por el contrario su producción es más costosa (Blaschke & Hay, 2001).

### ***Nivel de Detalle Temático***

Se define como la manera jerárquica y ordenada en la que se detallan las clases de coberturas de suelo para que se ajusten lo mayor posible a la realidad del terreno. Cuan más detallada sea la definición de clases, mejor se ajustará a las posibles aleatoriedades del territorio. Las relaciones que tienen las clases entre si también pueden ser elaboradas para crear un sistema más robusto (IGN, 2014).

### ***Leyenda Temática***

La leyenda temática en cartografía se denomina a la explicación que se provee sobre los símbolos y colores que se presentan en el mapa (Dávila & TEMÁTICOS, 2016). Normalmente, en cualquier proyecto que tenga como salida un producto cartográfico de ocupación, uso de la tierra o modelación de coberturas, requiere disponer como elemento de partida de una leyenda de clases informacionales apropiada al estudio en cuestión. Es así que, La función de esta leyenda temática es disponer de manera organizada y sintetizada el

conjunto de clases potenciales que los especialistas en imágenes satelitales y cartógrafos intentarían, discriminar y luego representar en sus mapas, proceso que llevan a cabo interpretando las imágenes satelitales y cotejando el resultado de la interpretación con las clases de las leyendas, y además, tomando en consideración las características del territorio objeto de estudio, la escala de representación seleccionada, la complejidad paisajística del mismo, y la información geográfica disponible; entre los factores más importantes (Ponvert-Delisle, 2013).

**Corine Land Cover (CLC).** La metodología CLC se especificó para estandarizar la recopilación de datos sobre la tierra en Europa para apoyar el desarrollo de políticas ambientales. La misma ha ido evolucionando y creando diferentes inventarios (1990, 2000 y 2006). CLC se usa ampliamente en el desarrollo de indicadores, modelado ambiental y análisis de cambios en el uso del suelo/cubierta terrestre en el contexto europeo (Büttner, 2014).

Los parámetros técnicos básicos de CLC (es decir, nomenclatura, unidad cartográfica mínima de 25 ha y ancho cartográfico mínimo de 100 m) no han cambiado desde el comienzo del proyecto; por lo que los resultados de los diferentes inventarios son comparables; sin embargo, para el mapeo de CORINE Land Cover Change (CLCC), fue necesario reducir la unidad mínima mapeable (UMM) para los cambios a 5 ha para producir información política relevante a escala europea. Esto resultó en una capa CLCC mucho más detallada de lo que es posible en las capas de estado CLC (Büttner, 2014).

La nomenclatura estándar de CLC es jerárquica e incluye tres niveles y 44 clases de detalle temático, las cuales se las detalla en la tabla 6; estas son agrupadas de la siguiente manera: (1) superficies artificiales; (2) tierras agrícolas; (3) bosques y áreas seminaturales; (4) humedales; y (5) cuerpos de agua (Feranec et al., 2016).

Tabla 6

*Nomenclatura estándar del CORINE Land Cover.*

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
<b>1. Superficies artificiales</b>	1.1. Tejido urbano	1.1.1. Tejido urbano continuo 1.1.2. Tejido urbano discontinuo
	1.2. Unidades industriales, comerciales y de transporte	1.2.1. Unidades industriales o comerciales 1.2.2. Redes viarias y ferroviarias y terrenos asociados 1.2.3. Zonas portuarias 1.2.4. aeropuertos
	1.3. Minas, basureros y sitios de construcción	1.3.1. Sitios de extracción de minerales 1.3.2. Vertederos o Basurales 1.3.3. Sitios de construcción
	1.4. Áreas con vegetación artificial no agrícola	1.4.1. Áreas verdes urbanas 1.4.2. Instalaciones deportivas y de ocio
<b>2. Tierras agrícolas</b>	2.1 Tierra cultivable	2.1.1. Tierra cultivable de secano 2.1.2. Tierra permanentemente irrigada 2.1.3. Campos de arroz
	2.2. Cultivos permanentes	2.2.1. Viñedos 2.2.2. Plantaciones de árboles frutales y bayas 2.2.3. Olivares
	2.3 Pastorales	2.3.1. Pastos
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	2.4.1. Cultivos anuales asociados a cultivos permanentes 2.4.2. Patrones de cultivo complejos 2.4.3. Terreno ocupado principalmente por la agricultura, con importantes áreas de vegetación natural 2.4.4 Tierras agro-forestales
<b>3. Bosques y áreas seminaturales</b>	3.1 Bosques	3.1.1. Bosque de hoja ancha 3.1.2. Bosque de coníferas 3.1.3. Bosque mixto

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
	3.2. Matorrales y/o asociaciones herbáceas	3.2.1. Pastizales naturales 3.2.2. Páramos y brezales 3.2.3. Vegetación esclerófila 3.2.4. Matorrales boscosos de transición
	3.3. Espacios abiertos con poca o ninguna vegetación.	3.3.1. Playas, dunas, arenas 3.3.2. rocas desnudas 3.3.3. Áreas escasamente vegetadas 3.3.4. Áreas quemadas 3.3.5. Glaciares y nieves perpetuas
<b>4. Humedales</b>	4.1 Humedales interiores	4.1.1. Marismas interiores 4.1.2. Turberas
	4.2 Humedales marinos	4.2.1. Marismas saladas 4.2.2. Salinas 4.2.3. Planicies intermareales
<b>5. Cuerpos de agua</b>	5.1 Aguas continentales	5.1.1. Cursos de agua (ríos) 5.1.2. Cuerpos de agua
	5.2 Aguas marinas	5.2.1. Lagunas costeras 5.2.2. Estuarios 5.2.3. Mar y océano

*Nota:* Extraído de (Büttner, 2014).

### **Clasificación de Imágenes.**

Se puede definir a la clasificación de imágenes como una manera de agrupar conjuntos de objetos en clases a través del uso de técnicas de inteligencia artificial o estadísticas, al poseer un aspecto en común, es decir, según (Chuvieco Salinero, 2008) el objetivo principal de la clasificación de imágenes satelitales es producir mapas consistentes de cobertura y uso de la tierra sobre la base de la leyenda temática propuesta.

De acuerdo con el proceso de construcción, a los métodos de clasificación de imágenes se los puede dividir en dos grupos: (1) supervisado: método de reconocimiento de patrones basado en la existencia de un conjunto de prototipos predefinidos; (2) no supervisado; no requiere conocimiento previo de la zona de estudio y desarrolla la clasificación en forma automática, aprovechando las características espectrales de la imagen para definir las agrupaciones con valores similares (Hart et al., 2000) (Bow, 2002) (Chuvienco Salinero, 2008).

Cabe destacar que, para validar la clasificación de la imágenes es necesario determinar el índice Kappa, el cual es un estadístico que define una medida de la diferencia entre la exactitud lograda en la clasificación y el valor verdadero sobre el terreno (Boca & Rodríguez, 2012).

### ***Clasificación no Supervisada (USC)***

La clasificación no supervisada consiste en un proceso de agrupación de píxeles con valores digitales similares para todas las bandas espectrales y cada una de estas agrupaciones son llamadas clases espectrales, las cuales se supone corresponden a un tipo de cubierta de terreno. Los métodos usados para desarrollar esta clasificación son del tipo agrupamiento (clustering), aunque recientemente se ha trabajado con los modelos neuronales (Arango Gutiérrez et al., 2005).

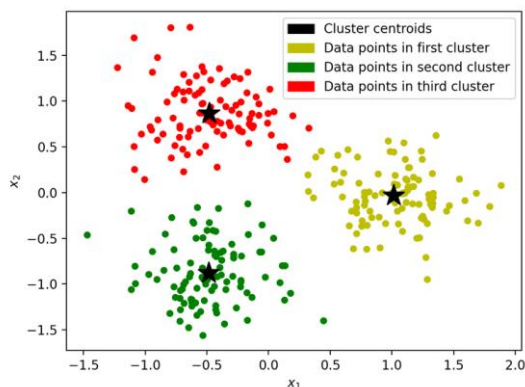
Los algoritmos de clasificación se subdividen en dos grupos: con número de clases conocido y desconocido. El primer grupo incluye el método de las k-means, el algoritmo de agrupamiento secuencial y el algoritmo ISODATA. En los métodos con número de clases desconocidas se encuentran el adaptativo y el de Batchelor y Wilkins, conocido como de máxima distancia (Bow, 2002) (Macedo-Cruz et al., 2010).

*El algoritmo k-means.* Este, es un algoritmo de clasificación no supervisada que divide objetos en  $k$  grupos basándose en sus características. El agrupamiento se realiza minimizando

la suma de distancias entre cada objeto y el centroide de su grupo o clúster (ver figura 18) (Bock, 2007).

### Figura 18

*Representación gráfica de una clasificación por k-means (k = 3).*



*Nota:* Extraído de (Bock, 2007)

En este procedimiento, se suele usar la distancia cuadrática. Por lo mismo, en la ecuación 10, se representa matemáticamente lo mencionado (Bock, 2007).

$$\min_S E(u_i) = \min_S \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} \|x_j - u_i\|^2 \quad [10]$$

Donde  $S$  es el conjunto de datos cuyos elementos son los objetos  $x_j$ , representados por vectores; cada uno de sus elementos representa una característica o atributo en donde tendrán  $k$  grupos o clusters con su correspondiente centroide  $u_i$  (Bock, 2007).

### **Clasificación Supervisada (SC)**

La clasificación supervisada se basa en la existencia a priori de áreas de entrenamiento. Se trata de áreas de las que se conoce la clase a la que pertenecen y que servirán para generar una signatura espectral característica de cada una de las clases. Se denominan clases

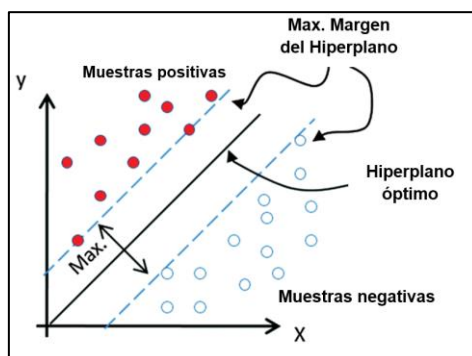
informativas en contraposición a las clases espectrales que se generan en la clasificación no supervisada (Chuvieco Salinero, 2008) (SIGMUR, 2010).

El objetivo de la misma es primero desarrollar una descripción o modelo para cada clase espectral usando las características disponibles en los datos de muestra. Tales descripciones de las clases son entonces usadas para clasificar futuros datos de prueba en la base de datos o para desarrollar mejores descripciones (llamadas reglas de descripción) para cada clase en la base de datos (A. García et al., 1998).

**Support Vector Machine (SVM).** Se basa en el concepto de planos de decisión que definen los límites de separación entre las clases; en otras palabras, es aquel que separa un conjunto de objetos que tienen diferentes clases de pertenencia. Un hiperplano se construye a partir de datos de entrenamiento, los mismos, separan los píxeles con diferentes clases de pertenencia, lo que se denomina clasificador lineal (Prasad et al., 2011) (Tangthaikwan et al., 2017). Cuan mayor es la distancia entre el hiperplano a los datos de entrenamiento más cercanos, más buena es la separación lograda por el hiperplano. Los vectores de soporte son aquellos puntos de datos contra los que empuja el margen de separación (ver figura 19).

**Figura 19**

*Modelo teórico del SVM.*



*Nota:* Extraído de (Tangthaikwan et al., 2017).



El hiperplano normalmente está representado por pesos  $w$  y sesgo  $b$ , donde,  $b$  representa a un elemento en los números reales y  $x$  corresponde a los valores de los datos (ver ecuación 11). SVM generalmente maximiza el margen entre los valores de datos de clases opuestas (Tangthaikwan et al., 2017).

$$w * x + b = 0 \quad [11]$$

El hiperplano se lo representa en un espacio bidimensional y para trasladarlo a un espacio tridimensional o mayor, es necesario aplicar un kernel, el cual es una función que corresponde a un producto escalar vectorial en el nuevo espacio de características (Tangthaikwan et al., 2017). Existen muchos modelos de kernel, de los cuales, destaca la función de base radial (The Radial Basis Function, RBF) (ver ecuación 12); que, según (Tangthaikwan et al., 2017), posee mayor precisión en su clasificación que el lineal, cuadrático y polinomial.

$$K(x_i, x_j) = \exp \left[ \frac{(x - x_i) * (x_i - x_j)}{2\sigma^2} \right] \quad [12]$$

### ***Clasificación Basada en Interpretación/Digitalización***

La interpretación se refiere a el proceso de generar información de la superficie terrestre a través de la observación sobre una imagen, esto se lo lleva a cabo mediante diferentes criterios de interpretación, que, según (Chuvieco, 1991), son: tono, color, textura, situación espacial, sombras, patrón espacial, contorno y formas. A fin de reconocer las características del terreno, la resolución espacial es la mayor limitante al momento de interpretar, debido a que, a mayor tamaño de pixel sobre el suelo, menor detalle sobre la superficie terrestre se puede plasmar (IGN, 2014) (Aingla & Gavilanez, 2022).

Cabe señalar, que no existen reglas fijas para interpretar, por ende, se es sumamente dependiente de la experticia del digitalizador y su conocimiento de la zona de estudio; además,

del análisis visual para poder discretizar zonas que, aparentemente, tienen un mismo tipo de cobertura (IGN, 2014).

Para la digitalización, la cual hace referencia al trazado y registro en formato vectorial de los objetos de la superficie mediante puntos, líneas o polígonos, existen ciertas pautas que se suelen considerar, estas son: 1) Dividir toda el área a digitalizar en áreas de trabajo manejables, 2) Trazar ordenadamente los polígonos de grupos en grupos o en forma de espiral, 3) Se recomienda iniciar el trazando áreas artificiales o la hidrografía por ser estas más distinguibles, 4) De ser posible, realizar una visita a campo para reconocer el área de trabajo y para resolver dudas, y 5) Mantener una válida topología, para no tener conflictos de solapamiento, saltos o espacios huecos, geometrías múltiples y geometrías no válidas (IGN, 2014) (Aingla & Gavilanez, 2022).

### ***Control de Calidad y Validación de Información.***

Una vez llevada a cabo la clasificación y determinado el modelo de cobertura del suelo, es necesario llevar a cabo el proceso de control de calidad y validación de resultados (IGN, 2014).

El control de calidad hace referencia al análisis de la presencia de errores durante la producción de la información, es decir, aseguramiento de que los datos cumplen las especificaciones técnicas del proyecto. Los procesos de control de calidad son propios de cada institución. En cambio, la validación se refiere al análisis de la fiabilidad del dato una vez producido, es decir, son estimaciones realizadas a posteriori para determinar que tanto se asemejan a la realidad del terreno las clases de cobertura del suelo (IGN, 2014). Para llevar el control de calidad y la validación se pueden seguir los siguientes pasos:

- Obtención de puntos de control en geometría y temática más detallados que los datos a chequear. Mediante visitas a campo, ortofotografías, inventarios, etc.

- Detección de errores mediante comparación manual o pseudo-automática. Si es en control de calidad se corregirán los datos.
- Obtención de estadísticas de error y desviaciones con los datos de referencia. Si es una validación se pueden obtener índices de confianza, porcentajes de omisiones y comisiones, etc.

**Determinación de Puntos de Muestreo.** Para determinar los puntos de muestreo, es necesario conocer el tamaño de la población ( $N$ ) mediante la ecuación 13, esta, se encuentra en función del área de estudio y de la cobertura mínima cartografiable:

$$N = \frac{a}{Pmin} \quad [13]$$

Donde:

$a$  = Área de estudio en ha

$Pmin$  = Tamaño del polígono mínimo cartografiable en ha

Una vez determinado el tamaño de la población, se calcula el tamaño de la muestra ( $n$ ) mediante la ecuación 14:

$$n = \frac{N * Z_{\alpha}^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z_{\alpha}^2 * p * q} \quad [14]$$

Donde:

$N$  = Tamaño de la población

$Z_{\alpha}$  = Parámetro estadístico que depende del Nivel de Confianza (NC)

$e$  = Error de estimación máximo aceptado

$p$  = Probabilidad de que ocurra el evento estudiado (éxito)

$q = 1 - p$  = Probabilidad de que no ocurra el evento estudiado

Posteriormente, se lleva a cabo el muestreo estratificado, el mismo, depende del número de coberturas (estrato) que se observen en la zona de estudio; para ello se tiene que determinar el peso del estrato mediante de la ecuación 15:

$$Pe_i = \frac{N_i}{N} \quad [15]$$

Donde:

- $Pe_i$  = Peso del estrato i  
 $N$  = Tamaño de la población  
 $N_i$  = Tamaño de la población del estrato i

Finalmente se determina el número de muestras por estrato mediante la ecuación 16:

$$n_i = n * Pe_i \quad [16]$$

(IGN, 2014) (Aingla & Gavilanez, 2022).

**Matriz de Confusión.** En la matriz de confusión, se representan las diferencias que existen entre las distintas categorías de cobertura del suelo y su verdadero valor sobre el terreno; esto, a través de un conteo de muestras. Las columnas en la matriz representan la verdad en el terreno y las filas indican el resultado en el modelo de cobertura del suelo. Esta, es una matriz cuadrada ( $n \times n$ ), donde  $n$  surge del número de categorías. El objetivo de esta matriz es plasmar los conflictos entre las categorías de uso de suelo; con ello, se sabe la exactitud conseguida para todas las clases, además de conflictos entre ellas (Mejía & Moncayo, 2012) (Aingla & Gavilanez, 2022).

En la tabla 7, se representa la matriz de confusión, en donde, la diagonal expresa el número de puntos de verificación que permite consenso entre 2 fuentes (modelo y realidad), en cambio, los marginales, suponen un error de asignación. Los residuales en columna indican tipos de cubierta real que no se incluyeron en el mapa (errores de comisión), a medida que, los residuales en filas, involucran cubiertas del mapa que no se ajustan a la verdad (errores de omisión). La relación entre el número de puntos correctamente designados y el total expresa la confiabilidad universal del mapa (Chuvieco Salinero, 2008) (Aingla & Gavilanez, 2022).

**Tabla 7**

*Estructura de una matriz de confusión.*

		Valor verdadero				
		Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase n	Total
Valor en el modelo	Clase 1	$X_{1,1}$				$X_{1+}$
	Clase 2		$X_{2,2}$			$X_{2+}$
	Clase 3			$X_{3,3}$		$X_{3+}$
	Clase n				$X_{n,n}$	$X_{n+}$
	Total	$X_{+1}$	$X_{+2}$	$X_{+3}$	$X_{+n}$	$\sum X_{i,j}$

*Nota:* Modificado de (Chuvieco Salinero, 2008)

Según (Chuvieco, 1991) a través de la matriz de confusión, se pueden generar varios estadísticos para conocer la fiabilidad del producto cartográfico, entre los cuales destaca la fiabilidad global del mapa y el índice Kappa, descritos a continuación.

**Fiabilidad Global del Mapa.** Es la manera más simple de concluir con el proceso de validación ya que relaciona los elementos de la diagonal con el total de puntos muestreados, en otros términos, obtiene el porcentaje de puntos correctamente clasificados. La obtención del mismo, se lo lleva a cabo mediante la ecuación 17 (Chuvieco, 1991) (Aingla & Gavilanez, 2022).

$$F = \frac{\sum X_{i,i}}{\sum X_{i,j}} * 100 \quad [17]$$

**Índice Kappa.** Este, es un estadístico que mide la diferencia entre el modelo cartográfico y la realidad, el cual sirve para verificar la aceptabilidad de la clasificación de una imagen.

Se genera a partir de los datos existentes en la matriz de confusión y está dado por la ecuación 18 en donde  $N$  es el número total de observaciones en la matriz (Chuvieco, 1991).

$$\hat{k} = \frac{N \sum X_{i,i} - \sum X_{i+} \sum X_{+j}}{N^2 - \sum X_{i+} \sum X_{+j}} \quad [18]$$

En la tabla 8, se representa la clasificación del índice kappa organizada según intervalos de aceptación propuesta por Landis y Koch (1977), citado en (Aingla & Gavilanez, 2022).

**Tabla 8**

*Valores de aceptación del Índice Kappa*

Valor de $\hat{k}$	Calidad
$\leq 0$	Pésima
0.0 – 0.2	Mala
0.2 – 0.4	Razonable
0.4 – 0.6	Buena
0.6 – 0.8	Muy buena
0.8 – 1.0	Excelente

*Nota:* Extraído de (Aingla & Gavilanez, 2022)

### **La Detección de Cambios (CD) y Sus Principales Metodologías**

Dado un conjunto de imágenes de la misma ubicación capturadas en diferentes momentos, el objetivo principal del método de detección de cambios es identificar la superficie que ha sufrido un cambio significativo que dentro de una serie de imágenes de diferentes intervalos de tiempo. Es así que, estos cambios significativos contribuyen a la generación del mapa de cambio. La precisión del mapa de cambios también puede verse afectada por los contenidos de ruido en las imágenes de origen, además de un incorrecto preprocesamiento (Asokan & Anitha, 2019).

Cabe destacar que el concepto de cambio significativo varía según la aplicación. La evaluación del mapa de cambio es la parte más crítica para comprender los cambios significativos. Es decir, es de extrema importancia elegir la técnica de detección de cambios adecuada dependiendo de la aplicación para la que se va a utilizar. Es por ello que no es fácil seleccionar un algoritmo para un aplicativo de detección de cambios (Asokan & Anitha, 2019).

En cuanto al procedimiento para realizar CD, se lo puede resumir de la siguiente manera:

En primera instancia, se lleva a cabo la recopilación de información y estandarización de datos válidos, ya que, al trabajar con imágenes satelitales, es necesario considerar la aplicación a la que se le quiere dar uso, la plataforma satelital sobre la que trabaja el sensor, la resolución temporal, la resolución espectral y sobre todo la resolución espacial, dado que, de la misma depende el tamaño de pixel de la imagen satelital y, como resultado, la precisión de los coberturas generados (Verbyla, 1995) (Schott, 2007).

Cabe destacar que, en la actualidad, las plataformas satelitales proporcionan imágenes con nivel de procesamiento adecuado a las condiciones del presente proyecto de investigación; adicionalmente, se debe que llevar a cabo la validación del corregistro geométrico para garantizar que cada pixel se geolocalice en el mismo lugar sobre el que se capturó la información (Lunetta & Christopher, 1998), en teoría, si el preproceso ha sido satisfactorio, todos los cambios en el valor espectral en un pixel dado entre dos imágenes se pueden atribuir a cambios reales en las condiciones de la superficie representada por aquel pixel (Kennedy et al., 2009).

A continuación, se define la fase del algoritmo para el análisis geoespacial, esta puede implicar métodos discretos, difusos o continuos. Los métodos discretos son atractivos porque los cambios se definen en términos de clases de cubierta terrestre. Los métodos difusos

reconocen la confusión potencial entre las coberturas en el espacio espectral, y pueden ser diseñados para capturar cambios sutiles dentro de una imagen. Los enfoques de variables continuas permiten la captura de distinciones sutiles entre dos fechas, pero se debe hacer un esfuerzo para desarrollar métodos robustos para definir qué nivel de cambio es realmente significativo (Foody & Boyd, 1999) (J. Chen et al., 2003) (Kennedy et al., 2009).

Finalmente, se lleva a cabo la etapa de validación y entrega de resultados, en la que la calidad de la información debe ser evaluada. Además, los procedimientos utilizados para crearla se deben reportar de manera que las partes externas puedan validar, o, de ser el caso, refutar, los resultados generados (Kennedy et al., 2009).

### ***Detección de Cambio Basada en Álgebra de Mapas.***

La detección de cambios basada en álgebra comprende la aplicación de operaciones matemáticas en cada píxel para obtener la imagen de diferencia, es decir, se considera todo tipo de cambios como una única clase; por lo tanto, su objetivo es encontrar los píxeles cuyas características hayan sido modificadas, ignorando el significado semántico de los diferentes tipos de cambios posibles (Liu et al., 2015).

Algunos de los métodos de detección de cambios basados en álgebra utilizados popularmente incluyen la diferenciación de imágenes (Ke et al., 2018), la relación de imágenes y el análisis de vector de cambio (Liu et al., 2015) (Ferraris et al., 2018). Un apartado común de la detección de cambios basada en algebra de mapas es la selección del umbral para encontrar las áreas de cambios. Cabe destacar que las técnicas mencionadas son más fáciles de implementar pero no suelen proporcionar la información completa sobre los cambios originados (Asokan & Anitha, 2019).

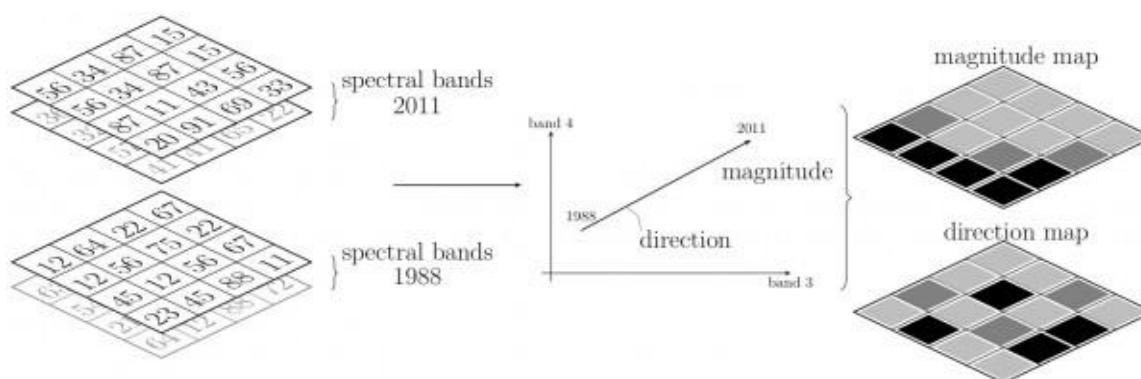


**Análisis de Vector de Cambio Comprimido (C<sup>2</sup>VA).** El vector de cambio comprimido, parte del concepto del vector de cambio polar (CVA). Este, consiste en que, dado un par de mediciones espectrales (imágenes) en fechas diferentes, se calcula el vector de cambio espectral (SVC) y se compara su magnitud con un criterio de umbral especificado.

La decisión de que se ha producido un cambio, se toma si se supera dicho umbral (ver figura 20). Posteriormente y habiendo enmascarado el área de cambio, se puede diferenciar entre la dirección del vector, la cual, teóricamente contiene información sobre el tipo de cambio; por ejemplo, la dirección debido a la cosecha debe ser diferente a la que es producto de un incendio forestal (Malila, 1980) (Bovolo & Bruzzone, 2006).

## Figura 20

*Explicación gráfica del vector del vector de cambio*



*Nota:* Extraído de (Wegmann et al., 2016)

A diferencia del CVA, el C<sup>2</sup>VA permite la visualización y detección de múltiples cambios al considerar todos los canales espectrales disponibles dentro de una representación 2-D. Por lo tanto, el método C<sup>2</sup>VA, teóricamente, permite detectar todas las posibles clases de cambio ocurridas entre las imágenes consideradas, sin descuidar ninguna banda espectral, ni trabajar en su selección. A pesar de que la representación C<sup>2</sup>VA explora una compresión con pérdida

de la información, ha demostrado ser exitosa para abordar problemas de detección de cambios en imágenes multiespectrales (MS) debido a que la variable de dirección, generalmente, es efectiva para representar los cambios abruptos que son visibles en los datos MS y no sufre demasiada pérdida de información asociada con la representación comprimida. (Bruzzone & Bovolo, 2012) (Bovolo et al., 2011) (Bovolo & Bruzzone, 2011) (Liu et al., 2015).

Según (Bovolo et al., 2011) citado en (Liu et al., 2015), el procedimiento para llevar a cabo el C<sup>2</sup>VA se lo realiza de la siguiente manera y mediante las siguientes ecuaciones:

Se determina la imagen de diferencia temporal múltiple ( $X_D$ ), la cual, se calcula restando dos imágenes píxel por píxel, es decir, sean  $X_1$  y  $X_2$  imágenes multi/hiperespectrales coregistradas y adquiridas sobre la misma área geográfica en los tiempos  $t_1$  y  $t_2$  respectivamente,  $X_D$  se genera mediante la ecuación 19.

$$X_D = X_2 - X_1 \quad [19]$$

En segundo lugar, se determina la magnitud y la dirección del cambio, es decir, el módulo de la imagen vector o imagen de diferencia (ecuación 20) y el desplazamiento angular (ecuación 21), en donde  $B$  representa el número de bandas de una imagen MS.

$$\rho = \sqrt{\sum_{b=1}^B (X_D^b)^2} \quad [20]$$

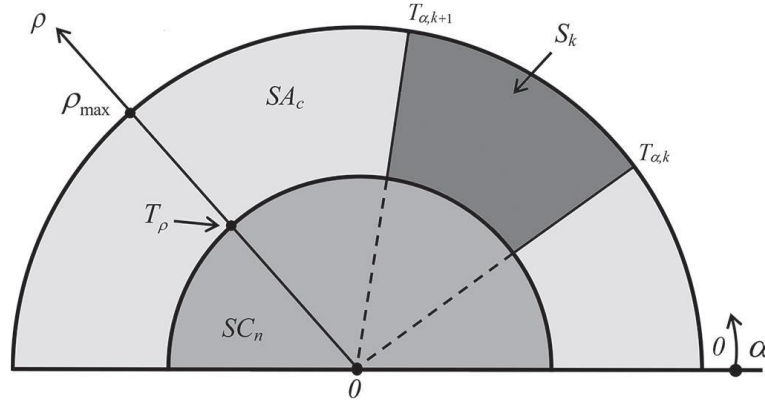
$$\alpha = \arccos \left[ \frac{1}{\sqrt{B}} \left( \frac{\sum_{b=1}^B (X_D^b)}{\rho} \right) \right] \quad [21]$$

Según (Bovolo et al., 2011), las variables  $\rho$  y  $\alpha$  definen un dominio ( $\mathbf{D}$ ) de coordenadas bidimensionales donde  $\rho_{max}$  es el valor máximo de cambio, el cual varía acorde a la ecuación 22 y se representa gráficamente en la figura 21.

$$\mathbf{D} = \{\rho \in [0, \rho_{max}] \text{ and } \alpha \in [0, \pi]\} \quad [22]$$

Figura 21

Representación bidimensional del dominio de los múltiples cambios para el  $C^2VA$



Nota: Extraído de (Bovolo et al., 2011).

Finalmente, se realiza la compresión de información para diferenciar las múltiples áreas de cambio; esto se lo lleva a cabo en 2 pasos:

1. Se establece el umbral  $T_\rho$  a lo largo de la variable  $\rho$  para dividir todo el semicírculo del dominio de representación  $C^2VA$  (figura 21) en dos partes (ecuación 23 y 24), las cuales, representan el espacio sin cambios ( $SCn$ ) y espacio modificado ( $SAc$ ) respectivamente.

$$SCn = \{\rho, \alpha \mid 0 \leq \rho < T_\rho \text{ and } 0 \leq \alpha \leq \pi\} \quad [23]$$

$$SAc = \{\rho, \alpha \mid T_\rho \leq \rho \leq \rho_{max} \text{ and } 0 \leq \alpha \leq \pi\} \quad [24]$$

2. Se separa el  $SAc$  en múltiples clases de cambio a lo largo de la dirección  $\alpha$ , teniendo así, múltiples umbrales de cambio  $T_{\alpha,k}$  ( $k = 1, \dots, K - 1$ ) que pueden ser definidos, acorde a la ecuación 25, como un sector o área de cambio específico ( $Sk$ ) dentro del  $SAc$ .

$$Sk = \{\rho, \alpha \mid T_\rho \leq \rho \leq \rho_{max} \text{ and } T_{\alpha,k} \leq \alpha < T_{\alpha,k+1}\} \text{ donde } 0 \leq T_{\alpha,k} < T_{\alpha,k+1} \leq \pi \quad [25]$$

Cabe destacar que, según (Liu et al., 2015) para la detención de los umbrales,  $T_\rho$  y  $T_\alpha$ , se lo suele realizar de forma manual o automática de acuerdo con uno de los diversos métodos propuestos en bibliografía (Ridd & Liu, 1998) (Bruzzone & Serpico, 1997) (Du et al., 2012) (Ghosh et al., 2011).

### ***Detección de Cambios Basada en Clasificación de Imágenes.***

Esta categoría de detección de cambios implica una comparación posterior a la clasificación y generación de coberturas de la superficie terrestre, por ende, se obtienen las áreas de detección de cambios supervisadas y no supervisadas; es por ello que la calidad de la detección de la superficie de cambio dependerá de la selección de los datos de entrenamiento.

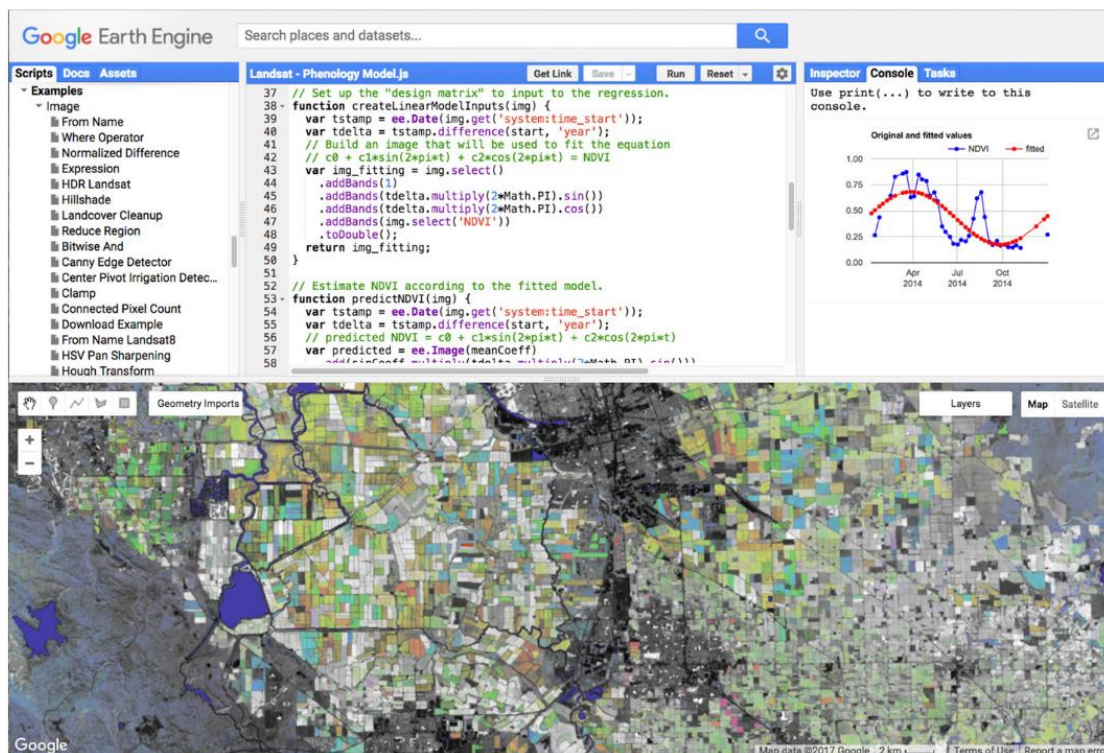
La principal ventaja de este método, es que puede proporcionar información de cambio precisa que no se ve muy afectada por factores externos como las interferencias atmosféricas; sin embargo, la selección de muestras de entrenamiento para la clasificación suele ser difícil y lleva tiempo obtenerla, más aún si se trabaja a escalas pequeñas que abarquen grandes hectáreas por clasificar. Además, en ausencia de datos de entrenamiento de buena calidad, la precisión de la clasificación será pobre y la detección de cambios insatisfactoria (Asokan & Anitha, 2019).

### **Google Earth Engine**

Google Earth Engine es una plataforma basada en la nube, definido al análisis geoespacial a escala planetaria (ver figura 22), que aporta las capacidades computacionales masivas de Google para influir en una variedad de problemas sociales de alto impacto, incluida la deforestación, sequía, desastres, enfermedades, seguridad alimentaria, gestión del agua, vigilancia del clima y protección del medio ambiente (Gorelick et al., 2017).

Figura 22

Entorno de desarrollo de Google Earth Engine.



Nota: Extraído de (Gorelick et al., 2017).

Es único en el campo, como una plataforma integrada diseñada para empoderar no solo a los científicos tradicionales de teledetección, sino también a una audiencia mucho más amplia que carece de la capacidad técnica necesaria para utilizar supercomputadoras tradicionales o recursos de computación en la nube a gran escala (Gorelick et al., 2017).

Es así que, GEE proporciona una alternativa a la IDE debido a que su catálogo contiene un vasto repositorio de conjuntos de datos geospaciales disponibles públicamente, que incluyen: observaciones de una variedad de sistemas de imágenes aéreas y satelitales tanto de sensores pasivos como activos, variables ambientales, pronósticos y retrovisores meteorológicos y climáticos, cobertura terrestre, topográficos y sociodemográficos; los mismos

que se encuentran en el Dataset o repositorio digital de GEE conservando la información original, aunque manipulable mediante el editor de código, lo que permite un acceso eficiente y elimina las barreras asociadas con la gestión de datos (Gorelick et al., 2017).

El catálogo, se actualiza continuamente a una velocidad de casi 6000 escenas por día de misiones activas, con una latencia típica de, aproximadamente, 24 horas desde el momento de adquisición de la escena. Los usuarios pueden solicitar la adición de nuevos conjuntos de datos al catálogo público, o pueden cargar sus propia información privada y georreferenciada, a través del repositorio Assets. Toda información procedente o generada en GEE, se puede compartir mediante un URL (Localizador de Recursos Uniforme) (Gorelick et al., 2017).

### ***Características Técnicas***

Earth Engine se basa en una colección de tecnologías habilitadoras que están disponibles en el entorno del centro de datos de Google, la biblioteca aprovecha varios juegos de herramientas de aprendizaje automático preexistentes para proporcionar un fácil acceso a más de 20 tipos de clasificación supervisada, regresión y agrupamiento no supervisado, así como operaciones en matrices de confusión para la evaluación de la precisión (Gorelick et al., 2017).

En lo que respecta a tareas de visión artificial, se encuentran disponibles operaciones comunes de ventanas basadas en kernel, convoluciones, operaciones morfológicas, análisis de distancia y textura, así como operaciones simples basadas en vecino, como gradiente, pendiente, aspecto y conexión. Otras capacidades incluyen operaciones de metadatos de imagen y banda, manipulaciones de proyección y remuestreo, enmascaramiento y recorte, desplazamiento de imagen a imagen (corregistro); además cuenta con una variedad de herramientas especializadas comunes a las aplicaciones de detección remota, que incluyen

operaciones de desmezcla espectral restringida, crecimiento de regiones y mapeo de costos (Gorelick et al., 2017).

Estas funciones de biblioteca se pueden componer para crear una descripción del cálculo que el usuario desea realizar. Esta descripción computacional finalmente toma la forma de un gráfico acíclico dirigido (DAG) en el que cada nodo representa la ejecución de una función individual o acceso a datos y contiene pares clave/valor de argumentos de función con nombre. En esencia, se trata de un entorno de programación puramente funcional, y Earth Engine aprovecha las técnicas estándar utilizadas comúnmente por los lenguajes funcionales, como la transparencia referencial y la evaluación diferida, para lograr una optimización y un aumento de la eficiencia significativos (Gorelick et al., 2017).

Los usuarios desarrollan programas de Earth Engine utilizando bibliotecas de cliente (actualmente disponibles para los lenguajes Python y JavaScript) que permiten describir gráficos de procesamiento utilizando un paradigma de programación de procedimientos familiar. Las bibliotecas cliente proporcionan funciones para imágenes, colecciones y otros tipos de datos, como números, cadenas, geometrías y listas. (Gorelick et al., 2017).

### ***Programación en JavaScript***

JavaScript es un lenguaje de programación que se utiliza principalmente para crear páginas web dinámicas, dado que incorpora efectos como texto que aparece y desaparece, animaciones, acciones que se activan al pulsar botones y ventanas con mensajes de aviso al usuario (J. E. Pérez, 2019).

En cuanto a la sintaxis de JavaScript, la cual se define como el conjunto de reglas que deben seguirse al escribir el código fuente de los programas para considerarse como funcionales para dicho lenguaje; es muy similar a la de otros lenguajes de programación como

lo son Java, C++ o Python. Las normas básicas que definen la sintaxis de JavaScript son las siguientes:

No se tienen en cuenta los espacios en blanco y las nuevas líneas; el intérprete de JavaScript ignora cualquier espacio en blanco sobrante, por lo que el código se puede ordenar de forma adecuada para entenderlo mejor por lo cual se pueden tabular las líneas, añadir espacios, crear nuevas líneas, entre otros; sin afectar la funcionalidad del código (J. E. Pérez, 2019).

Se distinguen las mayúsculas y minúsculas; en JavaScript si se intercambian mayúsculas y minúsculas el script no funciona por lo cual es importante mantener la estandarización en el nombre de las variables y en el lenguaje en general (J. E. Pérez, 2019).

No se define el tipo de las variables; al crear una variable en JavaScript no es necesario indicar el tipo de dato que almacenará, a esto se lo conoce como un lenguaje de programación no tipado (J. E. Pérez, 2019).

No es necesario terminar cada sentencia con el carácter de punto y coma (;); en la mayoría de lenguajes de programación, es obligatorio terminar cada sentencia con el carácter (;). Sin embargo, aunque en JavaScript no sea obligatorio hacerlo, es conveniente seguir la tradición de terminar cada sentencia con dicho carácter para una óptima visualización del script (J. E. Pérez, 2019).

Se pueden incluir comentarios; estos, se utilizan para añadir información en el código fuente del programa y pese a que el contenido de estos no se ejecuta dentro de consola, si se envían al navegador del usuario junto con el resto del script, siendo así necesario extremar las precauciones sobre la información incluida en dicho aspecto (J. E. Pérez, 2019).



Adicionalmente, dentro del entorno de programación, se habla de manera continua del concepto de script, el cual se define como la secuencia de comandos de código de programación almacenado en un archivo plano de texto, el cual sirve como herramientas para ejecutar funciones o tareas específicas en el campo de la informática, es decir, es el archivo de texto con las instrucciones (código) para ejecutar el algoritmo de programación (Pardo Méndez & Restrepo Sanchez, 2019).

### Capítulo III: Metodología

En el presente capítulo, se describen los procesos metodológicos a fin de llevar a cabo la detección de cambios tanto en el software copyright (ENVI), como en la plataforma de GEE, es decir, se describe y se valida mediante fuentes fiables los procesos de: recopilación y adquisición de datos, preprocesamiento y/o mejora de las imágenes, análisis geoespacial y evaluación de resultados.

Para ello, se aplicaron tantos métodos comparativos: validación del corregistro, clasificación de imágenes, diferencia de clases, matriz de confusión, entre otros; métodos experimentativo: generación de scripts y validación de resultados; y métodos deductivos, al partir de fuentes globales de obtención de datos. A su vez, manejando la presente investigación desde un enfoque mixto, cuantitativo – cualitativo (CUAN - cual), debido a la predominancia del cuantitativo al tener como finalidad contabilizar las áreas afectadas y los cambios de cobertura del suelo productos por un incendio forestal, a su vez, sin descuidar el enfoque cualitativo al tener el investigador que identificar las diferentes coberturas del suelo que existen en el área de estudio.

Los aspectos fundamentales de la metodología empleada, se ordenan en el diagrama de procesos representado en la figura 23, la misma se compone de tres fases:

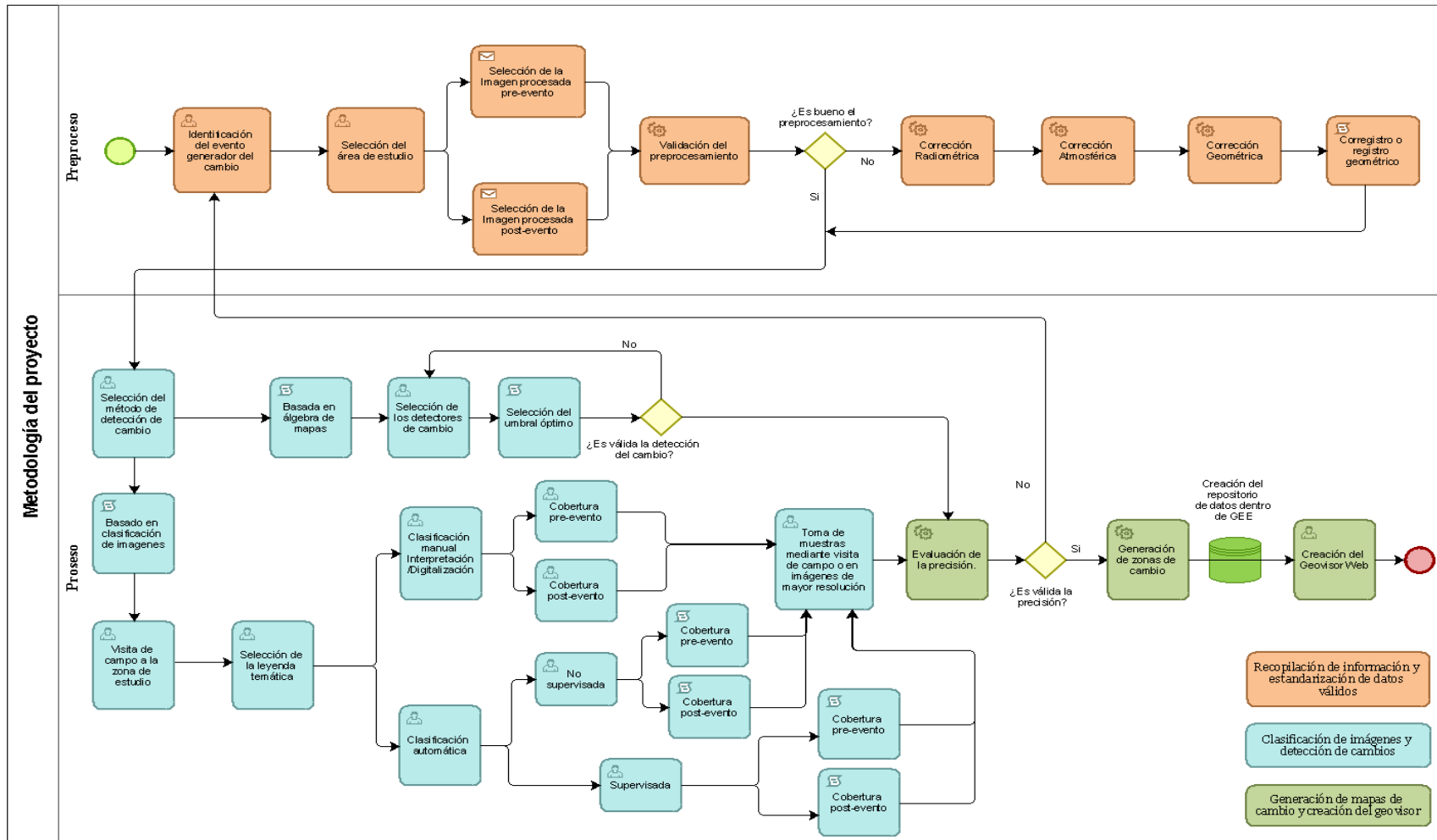
Fase 1: Recopilación de información y adquisición de datos válidos.

Fase 2: Clasificación de imágenes y detección de cambios.

Fase 3: Generación de mapas de cambio y creación del geovisor.

Figura 23

Diagrama de flujo de la metodología a empleada en el proyecto de investigación.

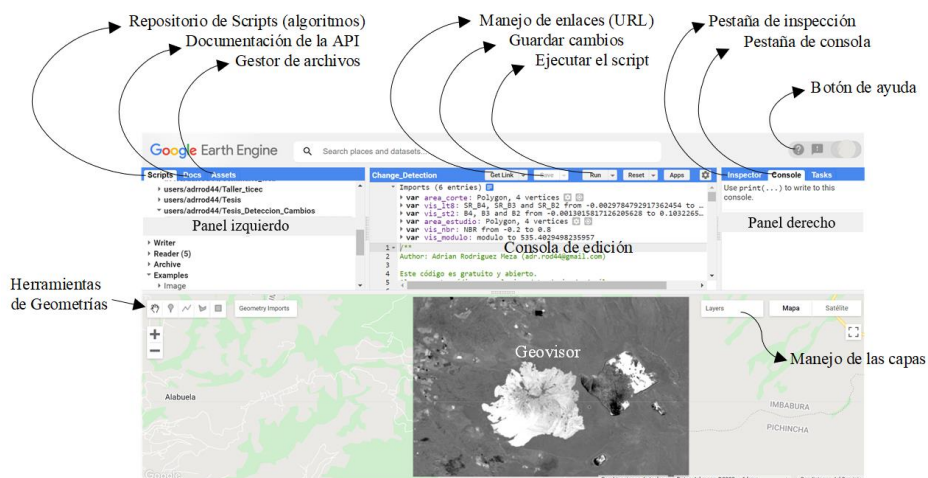


## Principios y Entorno de Google Earth Engine

Uno de los objetivos específicos de la presente investigación, es procesar la información satelital de las misiones Landsat 8, Sentinel 2 u otras, a través de programación en la plataforma de GEE, para ello, es necesario tener ciertos conocimientos en: características técnicas de GEE, activación de la cuenta de usuario, el editor de código o code editor (representado en figura 24), el dataset o base de datos de GEE, los fundamentos de programación JS, creación de repositorios y carpetas de almacenamiento de scripts, creación de geometrías y áreas de interés, el gestor de archivos de GEE (Assets Managing), compartir información y descarga de datos mediante URL's y, por último, la manipulación de colecciones e imágenes digitales.

**Figura 24**

*Principales componentes del editor de código de GEE.*



*Nota:* modificado de (Google Developers, 2021b)

Debido a la falta de información introductoria y en español a GEE, como resultado del presente capítulo, se creó y se pone a disposición del lector el Anexo 1: “Manual de Usuario de Google Earth Engine (GEE)”, con el que se pretende brindar una mayor comprensión del

entorno de trabajo y uso de la plataforma; a su vez, un mejor entendimiento de los comandos utilizados en la metodología desarrollada; por otro lado, todos los script y algoritmos de programación, son plasmados en el Anexo 2: “*Scripts de GEE para la detección de cambios de cobertura*”, en adición, se crea un repositorio de almacenamiento, que es de libre entrada a los usuarios de GEE, accesible mediante el siguiente enlace: [aerodrive.com/repositorio/tesis](https://aerodrive.com/repositorio/tesis).

### **Recopilación de Información y Estandarización de Datos Válidos.**

La recopilación de información teórica es base fundamental en un proceso o proyecto de investigación, puesto que, se identificaron los conceptos primordiales sobre el análisis digital de imágenes satelitales y la detección de cambios de cobertura del suelo, así como, la base metodológica para la comprensión del presente capítulo.

Cabe mencionar que, en el uso de GEE, no es necesario poseer un ordenador sumamente potente, sin embargo, se vuelve indispensable una estación de trabajo con el propósito de situar los diferentes programas de escritorio utilizados en el actual estudio, los cuales son: ENVI y Quantum GIS (QGIS), por tanto, en la tabla 9 se especifican los requerimientos mínimos necesarios para un correcto funcionamiento; estos programas fueron instalados en una computadora con un sistema operativo Windows 10.

**Tabla 9**

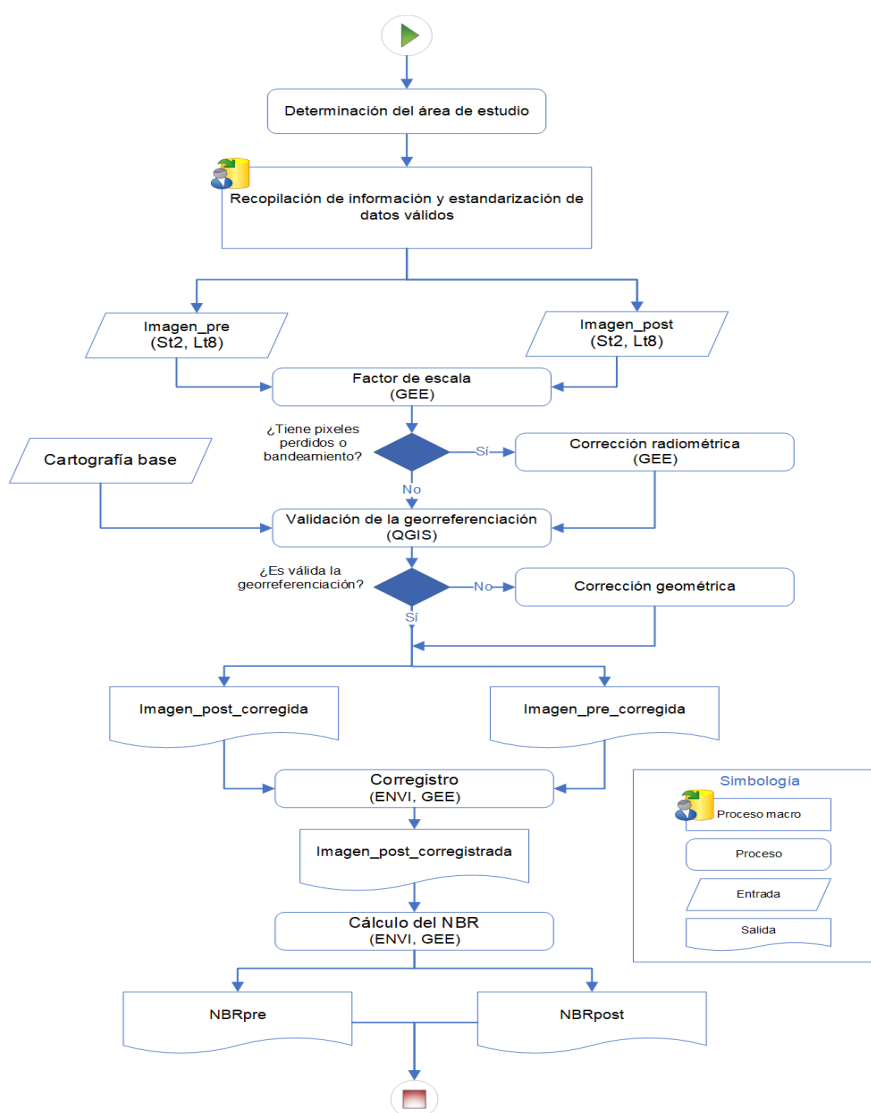
*Requisitos mínimos de los programas utilizados en el presente proyecto*

<b>Plataforma/ Software</b>	<b>GEE</b>	<b>Software ENVI</b>	<b>QGIS</b>	<b>Equipo utilizado</b>
Procesador	---	Intel CORE I5	Intel CORE I3	Intel CORE I7 7th Gen
Memoria RAM	---	8 GB	8 GB	8 GB
Almacenamiento	---	3.0 GB	1.7 GB	1 TB
Tarjeta gráfica	---	---	---	Intel® HD Graphics 620
Acceso a internet	Si	---	---	Si

En la figura 25, se plasma el flujograma a trabajar en el proceso de recopilación y estandarización de información, este inicia con la delimitación del área de estudio, continua con la descarga de imágenes satelitales y cartografía base, sigue con la validación de la corrección radiométrica y geométrica, prosigue con el correregistro; y finaliza con el cálculo del Índice NBR. La corrección atmosférica no será validada puesto que todas las imágenes presentan información de la reflectancia superficial en la base de la atmosfera.

**Figura 25**

*Flujograma de la recopilación de información y estandarización de datos válidos.*



### ***Determinación del Área de Estudio***

Para la determinación del área de estudio, se tomó en consideración los siguientes aspectos: (1) que abarque el área afectada por el incendio forestal, (2) que cumpla con la escala de trabajo, (3) que cuente con caminos de acceso y (4) que cuente con un número de coberturas del suelo aceptables. Así mismo, dentro del editor de código de GEE se desarrolló el siguiente script: [aerodriquezm/area\\_estudio](#); en donde, se imprime en consola el enlace URL de descarga del área de estudio en formato KML y de resultado se obtiene el área de influencia directa, plasmada en el “*Mapa de la zona de estudio*” del Capítulo I, sección “*Área de influencia directa*”.

### ***Descarga de Imágenes Satelitales y Cartografía Base***

En lo que respecta a la descarga de imágenes satelitales; las correspondientes a la plataforma Landsat 8 son de nivel 2, pertenecen a la colección 2 de Landsat y tier 1 de reflectancia superficial a la base de la atmósfera (SR al BOA); por otro lado, las imágenes Sentinel 2, son de nivel 2A (L2A).

A fin obtener imágenes desde la nube de GEE, se creó un script de acceso; en el mismo, se aplicó un factor de escala para que los niveles digitales se ajusten a los valores verdaderos, generando así el siguiente código: [aerodriquezm/descarga\\_imágenes](#). Estos archivos son descritos en la tabla 10.

**Tabla 10**

*Imágenes satelitales usadas en el presente proyecto.*

<b>Id</b>	<b>Plataforma</b>	<b>Nivel de Procesamiento</b>	<b>Id en GEE</b>	<b>Fecha de toma</b>
1	Sentinel 2	Nivel L2A	COPERNICUS/S2_SR/20 200322T153621_2020032 2T153615_T17NQA	2020-03-22

<b>Id</b>	<b>Plataforma</b>	<b>Nivel de Procesamiento</b>	<b>Id en GEE</b>	<b>Fecha de toma</b>
2	Sentinel 2	Nivel L2A	COPERNICUS/S2_SR/20 200824T153619_2020082 4T154230_T17NQA	2020-08-24
3	Landsat 8	Nivel 2, colección 2, Tier 1, SR	LANDSAT/LC08/C02/T1_L 2/LC08_010060_2019082 5	2019-08-25
4	Landsat 8	Nivel 2, colección 2, Tier 1, SR	LANDSAT/LC08/C02/T1_L 2/LC08_010060_2020081 1	2020-08-11

*Nota:* De ahora en adelante y dentro de los scripts, a cada una de las imágenes descargadas, se las identificará con un nombre único, este es el siguiente: 1) St2 pre = Sentinel 2 pre evento, 2) St2\_post = Sentinel 2 post evento, 3) Lt8\_pre = Landsat 8 pre evento y 4) Lt8\_post = Landsat 8 post evento.

Es necesario subrayar que, únicamente se utilizarán las bandas de mayor resolución espacial, a excepción de la pancromática, para los procesos de detección de cambio, es decir, las 7 primeras bandas en las imágenes Landsat 8, y 10 bandas en las imágenes Sentinel 2 (B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B8A, B11 y B12); esto, con el propósito de mejorar el análisis espectral y la identificación de las coberturas del suelo

Acerca de la información cartográfica, se la obtuvo de la Base Continua Nacional del Instituto Geográfico Militar (IGM) a escala 1:50 000 en formato shapefile; dichos insumos son descritos en la tabla 11.

**Tabla 11**

*Archivos vectoriales utilizados en el presente proyecto.*

<b>Nombre</b>	<b>Escala</b>	<b>Tipo de dato</b>	<b>Fuente</b>	<b>Año</b>
rio_l.shp	1:50 000	vectorial línea	IGM	2013



Nombre	Escala	Tipo de dato	Fuente	Año
via_l.shp	1:50 000	vectorial línea	IGM	2013
lago_laguna_a.shp	1:50 000	vectorial polígono	IGM	2013
nxcantones.shp	1:50 000	vectorial polígono	SNI	2013

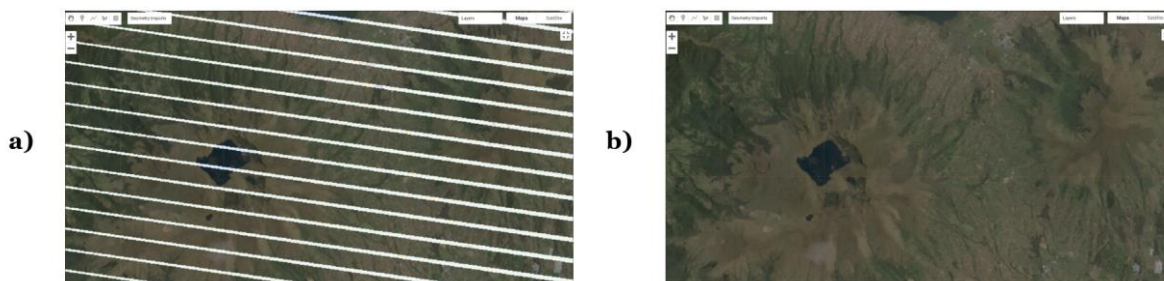
### **Proceso/Análisis Radiométrico.**

Esta etapa hace referencia a la corrección de imágenes debido a pixeles perdidos y/o bandeamiento, por ende, se revisaron cada una de las imágenes en búsqueda de estos errores; en caso de existir, se realizaron las respectivas correcciones que se detallan a continuación:

**Corrección por Bandeamiento.** Las imágenes, que se utilizaron de insumos para la presente investigación, poseen el más alto nivel de procesamiento, por lo tanto, no es necesario llevar a cabo ninguna corrección radiométrica en las mismas debido a bandeamiento; sin embargo y para la constancia de lo mencionado, se realizó un análisis visual en la que no se observó este error, a diferencia de lo que se presenta a manera de ejemplo en la figura 26. En caso de ser necesario llevar a cabo esta corrección dentro de GEE, se facilita al lector el Anexo 1, Capítulo 6, sección 6.2 “Corrección por bandeo o pixeles perdidos”, adicionalmente, la programación es accesible mediante el siguiente enlace: [aerodroquezm/bandeamiento](http://aerodroquezm/bandeamiento).

### **Figura 26**

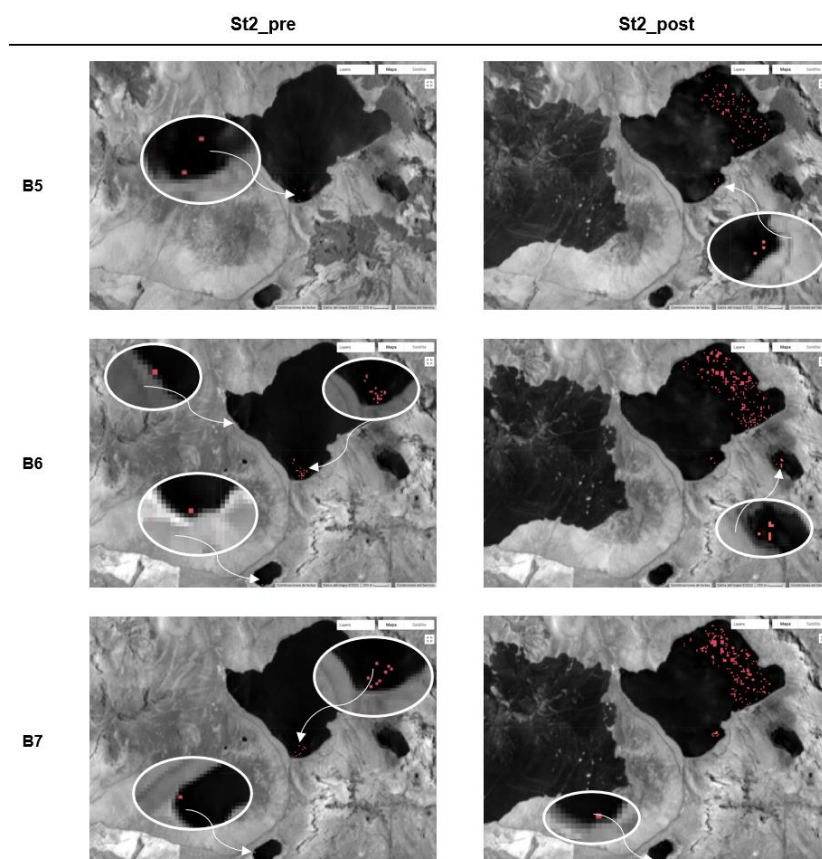
*Imágenes de la plataforma Landsat 7: a) sin corrección de bandeo, b) con corrección de bandeo.*



**Corrección por Píxeles Perdidos en Sentinel 2.** Las imágenes Lt8\_pre y Lt8\_post no poseen píxeles perdidos; sin embargo, las imágenes Sentinel 2 sobre las que se trabajó, a pesar de ser de nivel L2A, mediante el análisis visual se determinó la presencia de píxeles perdidos tanto en la St2\_pre como en la St2\_post, tal como se observa en la figura 27; por ende, se procede a realizar la debida corrección, cuyo proceso se llevó a cabo en GEE median el siguiente script: [aerodriguezm/Píxeles\\_perdidos](#). Su resultado, se lo plasma en el Capítulo IV, sección “Resultados del análisis radiométrico”.

**Figura 27**

*Píxeles perdidos en las imágenes Sentinel 2 descargadas.*



Nota: Las imágenes corresponden a las bandas: B5, B6 y B7 de la colección Sentinel 2 SR del dataset de GEE

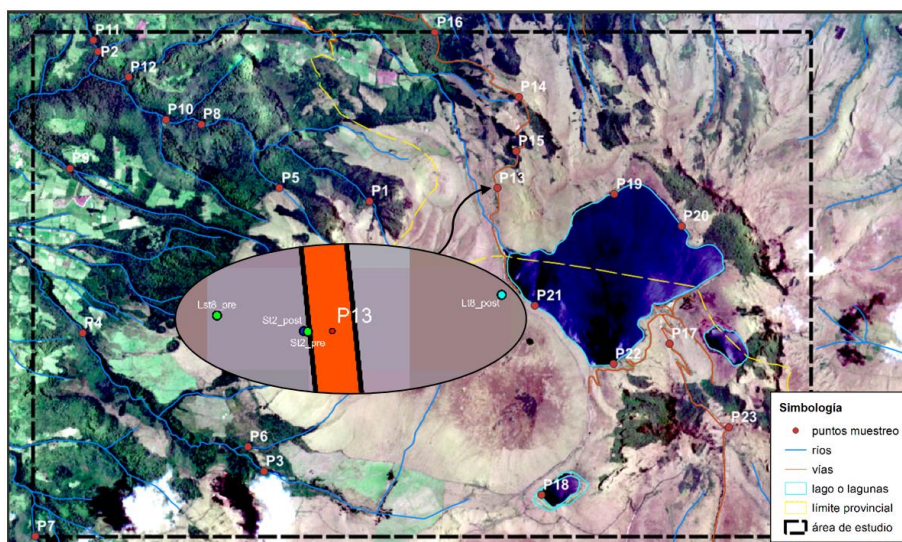
En este proceso, se aplica un filtro morfológico medio a la imagen original y, posteriormente, se sobrescriben los píxeles de nivel digital nulo (píxeles perdidos) con el valor filtrado, generando así la imagen corregida; es decir, se aplica lo mencionado en el Anexo 1, Capítulo 6, sección 6.2 “Corrección por bandeo o píxeles perdidos”.

### ***Validación de la Posición Geométrica (exactitud posicional)***

En lo relativo a la validación de la exactitud posicional, se usó el test NSSDA; para el cumplimiento del mismo, se generan los puntos de verificación en los archivos base o de referencia, y puntos de validación en las imágenes satelitales (ver figura 28), sobre los cuales, posteriormente, se mide su diferencia. De fuente, se trabajó con la cartografía 1:50000 que, al ser una escala mayor a la del producto final de la investigación, posee una mejor precisión sobre los datos del terreno; por ende, un nivel aceptable de comparación. Esto se lo llevo a cabo en el software QGIS utilizando las herramientas de: (1) edición y digitalización, (2) calculadora de campos, (3) unir por atributos y (4) estadísticas básicas para campos; además, de las ecuaciones y el procedimiento descrito en el Capítulo II, sección “Exactitud Posicional”.

### **Figura 28**

*Ejemplo de creación de puntos de verificación y validación de la exactitud posicional.*



De este procedimiento se obtiene el valor de la exactitud posicional, y para que cumpla con la precisión horizontal de acuerdo a la norma IPGH, este tiene que ser menor o igual a 30 m. Los resultados del presente apartado se los plasman en el Capítulo IV, sección “*Resultados de la validación geométrica*”.

**Validación del Corregistro.** Antes de realizar el proceso denominado corregistro, es necesario comparar que tan bien emparejadas se encuentren las imágenes: St2\_pre vs St2\_post y Lt8\_pre vs Lt8\_post; es decir, el solapamiento entre imágenes de una misma plataforma satelital.

Esto se lo realiza nuevamente con el test NSSDA con la diferencia que, de información fuente, se utilizaron las imágenes pre incendio y, de información a validar, serán las imágenes post incendio. Cabe mencionar que, en el caso de estudio, no es necesario llevar a cabo este procedimiento, demostrado en el capítulo IV, sección “*Resultados de la validación geométrica*”. Si mediante la evaluación del corregistro se determina que se tiene que cumplir con esta corrección, se lo puede llevar a cabo tanto en ENVI, como en GEE, aplicando las diferentes metodologías descritas:

**Corregistro en ENVI.** Dentro del software de ENVI, existe la herramienta llamada “*Image Registration Workflow*”, esta realiza el corregistro entre dos imágenes que ya se encuentren ortorectificadas, de la siguiente manera:

En primer paso, se selecciona una imagen base y una imagen de deformación.

Posteriormente, aparece la ventana de generación automática de puntos de amarre o puntos tie, que consta de tres pestañas (ver figura 29): en la primera, se elige, el método de coincidencia, el modelo geométrico, el tipo de transformación y el error máximo por punto; en la segunda pestaña, se pueden generar manualmente los puntos tie; y en la tercera, se

selecciona la banda a hacer coincidir entre la imagen base y la imagen deformación, el número de puntos de amarre, la tolerancia, rango de búsqueda y el tamaño de la ventana de búsqueda.

**Figura 29**

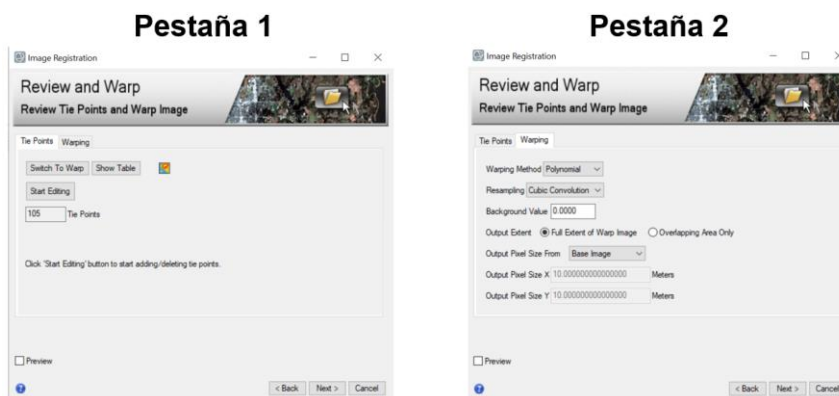
*Herramienta "Image Registration Workflow" de ENVI, generación de puntos de amarre.*



A continuación, se muestra la ventana de revisión del amarre, la misma, está compuesta de dos pestañas (figuran 30): en la primera, de ser necesario, se editan los puntos de amarre; y en la segunda se selecciona el método de amarre, el método de remuestreo, el valor de fondo de la imagen y el área de la imagen que se desea modificar.

**Figura 30**

*Herramienta "Image Registration Workflow" de ENVI, verificación de puntos de amarre.*



Por último, se seleccionan las carpetas de almacenamiento, tanto de los puntos de amarre como de la imagen registrada, y se finaliza el proceso.

**Corregistro en GEE.** Con el objetivo de llevar a cabo el corregistro de una imagen dentro de la plataforma de GEE, se utiliza la técnica de “hoja de goma” o “alineación subyacente”, la cual, permite la deformación local de la imagen para corregir los errores de ortorrectificación producto de un procesamiento anterior. La técnica de alineación subyacente, se lleva a cabo mediante la correlación de imágenes, por lo que, las bandas para las imágenes de entrada y de referencia deben ser visualmente similares a fin de que el algoritmo calcule una alineación precisa (Google Developers, 2021a). El proceso para llevar a cabo el corregistro dentro de GEE, se lo plasma en el Anexo 1 Capítulo 6, apartado 4; adicionalmente, el código es accesible mediante el siguiente enlace: [aerodroquezm/corre](https://aerodroquezm.com/corre); por otro lado, el resultado se lo visualiza en el capítulo IV, sección “*Resultados de la validación del corregistro*”.

### ***Cálculo del Índice Normalizado del Área Quemada (NBR)***

En la determinación del NBR, se utilizó la ecuación 1 del presente proyecto, adaptada a la plataforma satelital correspondiente, por ende, se utilizan las bandas 8 y 12 en Sentinel 2; y las bandas 5 y 7 en Landsat 8 para las longitudes de ondas NIR (infrarrojo cercano) y SWIR (infrarrojo de onda corta) respectivamente.

Este procedimiento, se lo llevo a cabo en GEE, utilizando los algoritmos descritos en el Anexo 1 Capítulo 6, apartado 3 “*Cálculo de Índices Espectrales*”; con lo cual, se calculó el NBR para cada imagen base y, posteriormente, se añade el resultante a su respectiva imagen fuente, como una nueva banda. Cabe recalcar que, y tal como se plasma en la tabla 1 del capítulo II, si el NBR presenta valores menores a 0.1, posiblemente representa la superficie afectada por el incendio.

Los índices calculados, se los puede observar en el capítulo IV, sección “*Resultados del cálculo del índice de calcinación normalizado (NBR)*”; el código fuente, es accesible mediante el siguiente enlace: [aerodriguezm/NBR](#).

### ***Exportación de Imágenes y Generación de Identificadores.***

Una vez concluida la etapa de validación y el cálculo del NBR, es necesario la exportación de los archivos ráster procesados al repositorio de GEE, generando así, un identificador único para cada imagen. El objetivo de ello, es facilitar la codificación en futuros scripts y disminuir el tiempo de procesamiento; la función que ejecuta la exportación dentro del editor de código de GEE es “*Export.image.toAsset()*”, cuya sintaxis de programación se avizora en el siguiente código: [aerodriguezm/exportación](#). El valor del identificador para cada imagen, se lo encuentra en la tabla 15 del Capítulo IV, sección “*Resultados de la exportación de imágenes y generación de identificadores*”.

### ***Clasificación de Imágenes y Detección de Cambios.***

Concluida la recopilación y estandarización de datos válidos, se da paso a la fase de clasificación de imágenes y detección de cambios, en donde, se desarrollan los algoritmos para la generación de los archivos ráster o vector que representen la cobertura sobre la superficie terrestre, aplicando diferentes metodologías. Posteriormente, se determina las zonas de cambio, ya sea mediante técnicas de detección de cambios basada en clasificación de imágenes, o, detección de cambios basada en álgebra de mapas.

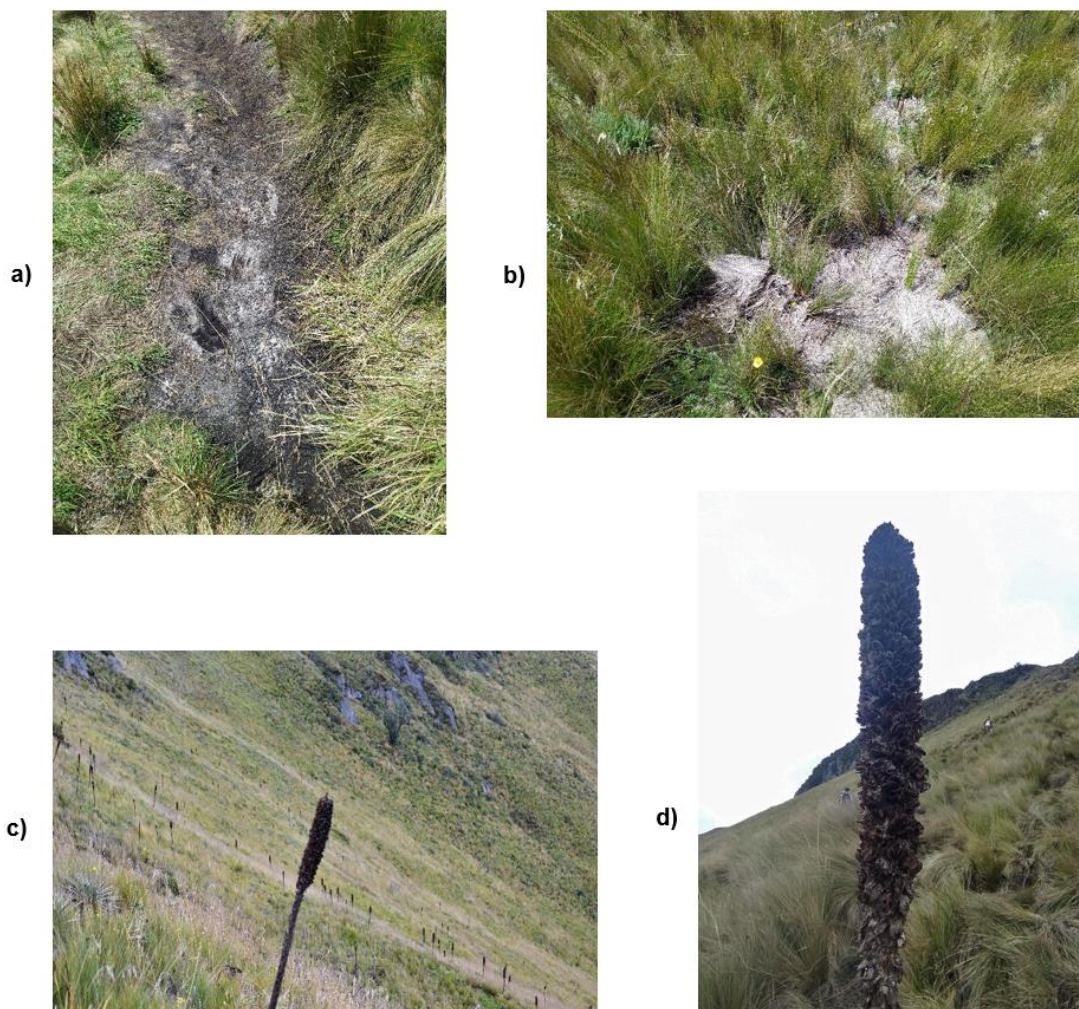
### ***Detección De Cambios Basada en la Clasificación de Imágenes (DCBCI).***

Antes de llevar a cabo el proceso de DCBCI, es necesario definir la leyenda temática con la que se va a trabajar, para ello, el 29 de mayo del 2022, se realizó una visita de reconocimiento a la zona de estudio en donde, y a pesar de haber transcurrido cerca de dos años del flagelo y la zona del incendio se encuentre visualmente recuperada, se pudo

evidenciar una ligera capa de cenizas y otras afectaciones a la vegetación; estas se encuentran representadas en la figura 31.

### Figura 31

*Evidencias fotográficas de afectaciones al área de estudio producto del incendio forestal.*



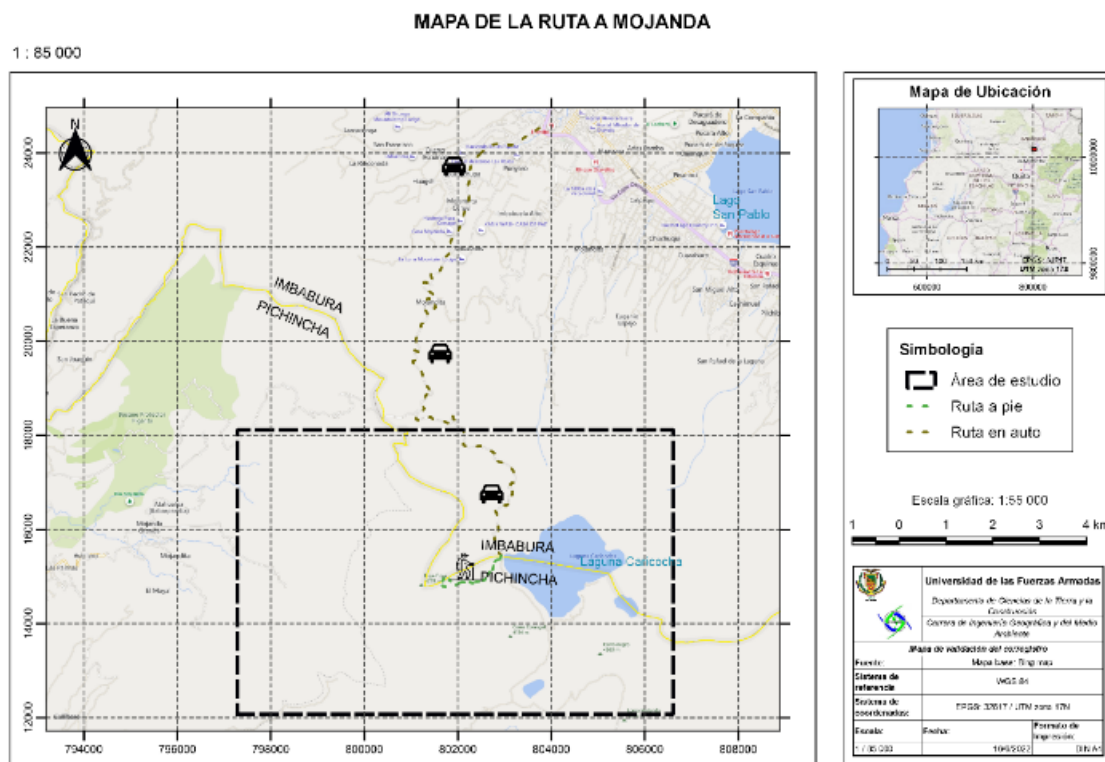
*Nota:* en las imágenes se visualiza: a) ligera capa de cenizas sobre el suelo; b) vegetación afectada sobre el suelo; c) y d) vegetación quemada.

Por otro lado, la ruta de acceso que se tomó para llegar a la zona de estudio, se la observa en el mapa de la figura 32



Figura 32

Mapa de ruta de acceso a la laguna de Mojanda



De la visita de campo, se extrajo el registro fotográfico, en donde se llevó a cabo las respectivas observaciones para la determinación de las posibles clases de cobertura del suelo y generación de la leyenda temática, los resultados se encuentran en el Capítulo II, sección “Resultados de las visitas de campo”.

**Definición de la Leyenda Temática.** Con la información recopilada de la visita de campo, comparada con los diferentes ecosistemas identificados por el (MAE, 2013) en la zona de estudio, los cuales son: Bosque Arbustales Siempreverdes, Páramo, Herbazal de Páramo y Herbazal inundable de Páramo; se define la leyenda temática adaptada del “*Corine Land Cover*”, la cual, y acorde a la revisión bibliográfica de las leyendas temáticas que se suelen usar a nivel mundial y nacional, es la que mejor generaliza en trabajos a escala 1:100000.

Por resultante, la leyenda temática propuesta, se encuentra en el capítulo IV, sección “Resultados de la leyenda temática.

**Clasificación de Imágenes no Supervisada (USC).** La clasificación de imágenes no supervisada, se ejecuta mediante el algoritmo k-means tanto en GEE, con en el software copyright ENVI, obteniendo así: USC mediante GEE y USC mediante ENVI.

**USC Mediante GEE.** Dentro de GEE, la clasificación de imágenes no supervisada, se efectúa a través de k-means, y se lo realiza mediante las funciones descritas a continuación:

1. Se crean puntos de entrenamiento, esto aplicando la función “*ee.Image.sample()*” a la imagen a clasificar.
2. Se agrupan los puntos de entrenamiento mediante k-means y en función del número de clases, clusters o coberturas; a partir de la función “*ee.Clusterer.wekaKMeans()*”; generando así, los grupos de entrenamiento.
3. Se clasifica la imagen mediante los grupos de entrenamiento, obteniendo, áreas coincidentes agrupadas. La función empleada, es la “*ee.Image.cluster()*”.
4. Se aplica un filtro morfológico para simplificar y eliminar pixeles aislados.
5. Se exportan los resultados.

Este proceso se lo describe paso a paso en el Anexo 1, Capítulo 7, sección 7.1 “*Clasificación no supervisada*”. El acceso al código y la sintaxis de programación, se lo avizorar con una cuenta de GEE, en el siguiente enlace: [aerodroquezm/USC](https://aerodroquezm/USC).

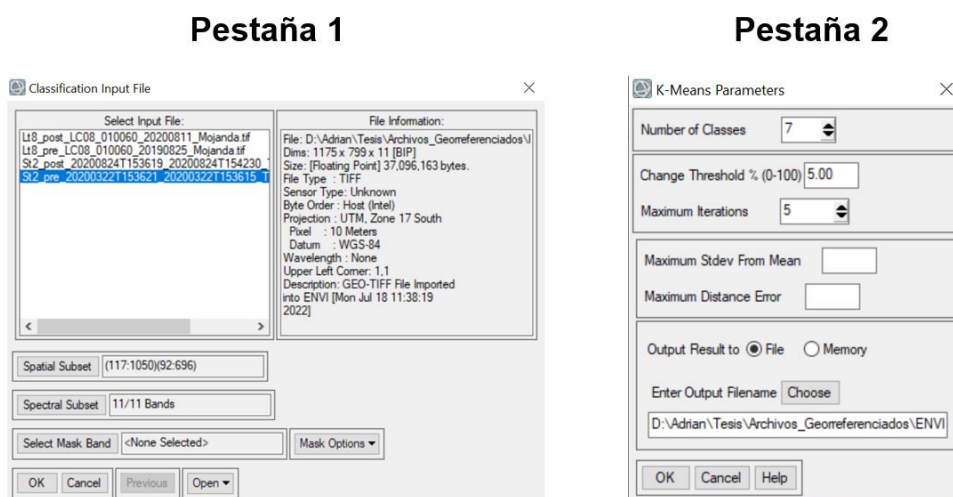
Las imágenes resultantes, junto con la tabla de clasificación, se las observa en el capítulo IV, sección “*Resultados de la USC en GEE*”

**USC Mediante ENVI.** Al realizar la clasificación no supervisada dentro de ENVI, se aplicó la herramienta “*K-means Clasificación*”, en la que, y tal como se observa en la pestaña 1 de la figura 33, se selecciona la imagen de entrada, las bandas espectrales a clasificar y, de

existir, la banda de enmascaramiento. Posteriormente, se determina el número de grupos, el número de iteraciones, la máxima desviación estándar desde la media, el error máximo permisible en distancia y el lugar de exportación de la clasificación.

**Figura 33**

*Herramienta “K-means Clasification” de ENVI.*



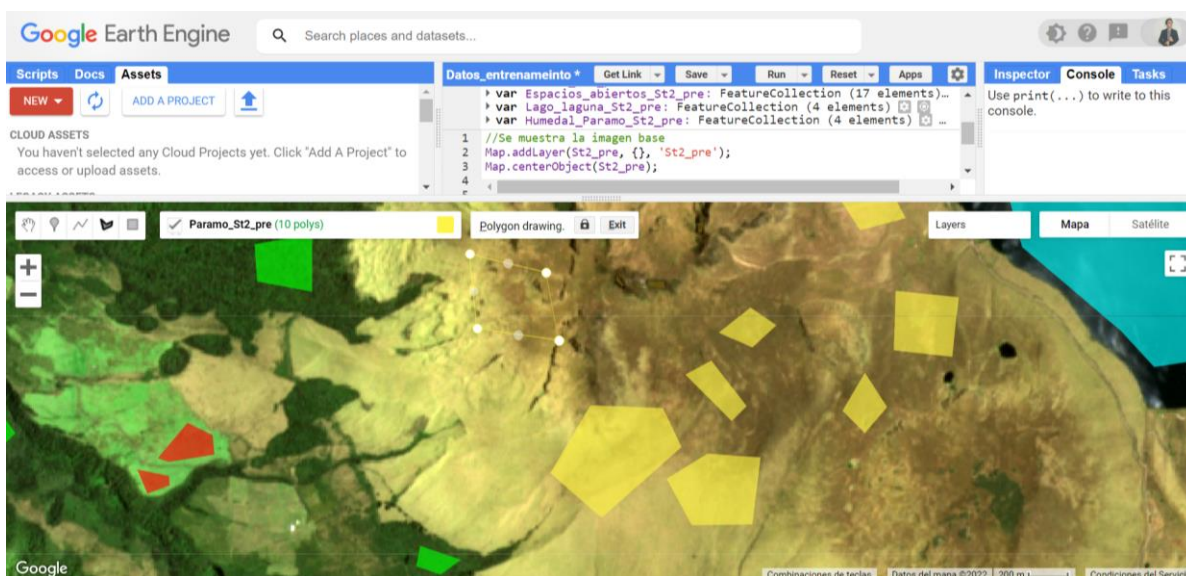
Finalmente, se asigna a una o más zonas de agrupación, el valor de la cobertura de representación en la superficie terrestre, plasmado en base a la leyenda temática aprobada. Los resultados se encuentran en el capítulo IV, sección, “*Resultados de la clasificación de imágenes no supervisada (USC)*”.

**Clasificación de Imágenes Supervisada (SC).** A fin de clasificar y comparar los resultados generados en GEE y en ENVI, se llevó a cabo la clasificación no supervisada mediante Support Vector Machine (SVM) dentro de los dos programas.

Por otro lado, es necesario generar de áreas de entrenamiento o muestreo; las muestras, son obtenidas de la visita de campo, separadas acorde a la leyenda temática y adjuntadas a la imagen base correspondiente; las áreas de entrenamiento son digitalizadas

mediante las herramientas de creación de geometrías en GEE (ver figura 34); posteriormente, se aplican en las clasificaciones realizadas en los softwares ENVI y en GEE. Estas áreas, se las puede visualizar y descargar en el siguiente enlace: [aerodriguezm/área entrenamiento](https://aerodriguezm/area_entrenamiento).

**Figura 34: Creación de archivos de entrenamiento en GEE.**



**SC mediante GEE.** En lo que respecta a la clasificación mediante SVM en GEE, se plasma el procedimiento detallado en el Anexo 1, Capítulo 7, sección 7.1 “Clasificación supervisada”. Para el mismo, se trabaja en los siguientes pasos:

1. Se digitalizan las áreas de muestreo.
2. Se crean puntos de entrenamiento, los cuales, teóricamente abarcan todos los píxeles de la imagen a clasificar, que se encuentren cubiertos por las áreas de muestreo; esto se lo realiza mediante la función “*ee.Image.sampleRegions()*”.
3. Se genera un clasificador de Support Vector Machine (SVM), a través de la función “*ee.Classifier.libsvm()*”.
4. Se entrena al clasificador con los puntos de entrenamiento, esto se lo realiza con la función “*ee.Classifier.train*”.

5. Se clasifica la imagen mediante la función “*ee.Image.classify()*” y el clasificador entrenado.
6. Se aplica un filtro para simplificar la clasificación y eliminar píxeles aislados.

Los códigos de acceso a las clasificaciones, se los puede observar en los siguientes enlaces: [aerodriguezm/SC\\_St2\\_pre](#), [aerodriguezm/SC\\_St2\\_post](#), [aerodriguezm/SC\\_Lt8\\_pre](#) y [aerodriguezm/SC\\_Lt8\\_post](#).

Por otro lado, las imágenes de la cobertura generada mediante la SC y el área de afectación producto del incendio forestal, se encuentran en el capítulo IV, sección, “*Resultados de la clasificación de imágenes supervisada (SC)*”.

**SC mediante ENVI.** A fin de llevar a cabo la clasificación supervisada de imágenes dentro de ENVI, se lo realizó mediante la herramienta “*Support Vector Machine Classification*”, para ello, es necesario previamente tener el archivo de muestro cargado al software y transformado en ROI (Region of Interest) para cada una de las imágenes a encauzar.

Los parámetros de configuración en el SVM son: kernel de RBF (Radial Basis Function) y valor de 0.2 en el gamma.

**Clasificación de Imágenes por Interpretación/Digitalización.** En la generación de las coberturas a través de interpretación/digitalización se trabajó con las imágenes base de mayor resolución espacial; por ende, se obtuvieron dos archivos vectoriales.

El primer archivo, es la cobertura pre incendio, generada mediante la St2\_pre; el segundo, es la cobertura post incendio, obtenida a través de la St2\_post. Cabe señalar que, la leyenda temática utilizada, es la misma de la USC y la SC.

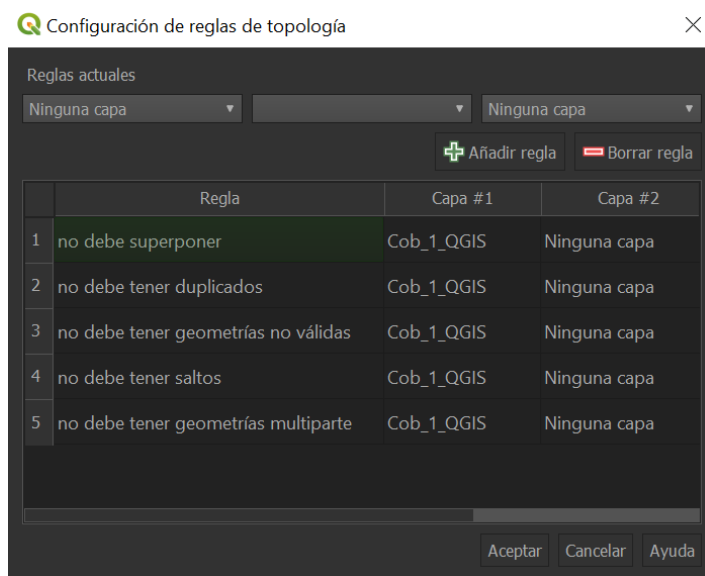
A fin de generar los modelos de cobertura, se utilizaron las herramientas de edición SIG dentro del software libre QGIS, adicionalmente, se validó la topología mediante el complemento

“Comprobador de topología” (ver figura 35), en el cual, se aplicaron las siguientes reglas topológicas:

- No se debe superponer entre polígonos de una misma capa.
- No se debe tener polígonos duplicados.
- No debe tener geometrías no válidas.
- No debe tener saltos o espacios en blanco entre polígonos.
- No debe tener geometrías multiparte.

### Figura 35

Ventana de configuración de reglas topológicas accedida desde el “Panel de comprobación de topología” del programa QGIS



Por otro lado, coberturas menores a 25 Ha no serán digitalizadas y se generalizan a una cobertura superior, ya que, esta es la unidad mínima mapeable (UMM) a escala 1:100000 de acuerdo al (IGN, 2014).

Los resultados de la interpretación/digitalización, se los observa en el capítulo IV, sección, “*Resultados de la clasificación de imágenes por interpretación/digitalización*”; cabe señalar que la leyenda temática utilizada es la misma de la USC y la SC.

**Validación de las Coberturas.** Los modelos de cobertura son validados a través de la fiabilidad y del índice Kappa, calculados a partir de la matriz de confusión.

Para el mismo, primero se determinan el número de puntos de muestreo mediante la ecuación 14 sobre una población de 225 polígonos, un nivel de confianza del 98%, un error de 2%; obteniendo así un total de 52 puntos; distribuidos acorde a un muestreo estratificado presente en la tabla 12.

**Tabla 12**

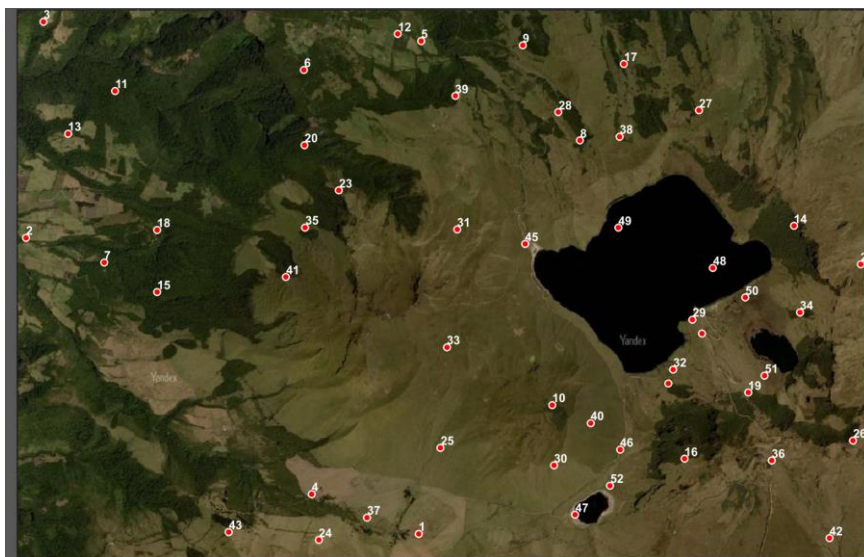
*Puntos de muestreo por cobertura del suelo.*

<b>Id</b>	<b>Cobertura</b>	<b>Abreviatura</b>	<b>Superficie aproximada (ha)</b>	<b>Peso</b>	<b>N° puntos</b>
1	Áreas agrícolas o agropecuarias heterogéneas	AG	505	9.00%	5
2	Bosques	BQ	1917	31.00%	16
3	Páramo	PA	2763	42.00%	22
4	Espacios abiertos con poca o ninguna vegetación.	EA	65	6.00%	3
5	Lago o laguna	LA	323	6.00%	3
6	Humedal de Páramo	HU	54	6.00%	3
Total			5627	100.00%	52

Una vez conocido el número de muestras, se distribuye aleatoriamente sobre el área de estudio (ver figura 36) y se determina el valor verdadero para cada punto, es decir, la cobertura real sobre el terreno; esto mediante visita de campo o sobre imágenes de mayor resolución.

### Figura 36

*Distribución de los puntos de muestreo sobre el área de estudio.*



*Nota:* Los puntos se encuentran sobrepuestos en una imagen satelital, pertenece al servicio de mapas base ruso Yanex; esta posee una resolución espacial menor a 10 m y servirá de validación sobre el terreno en caso de conflicto.

Posteriormente, se extrae el valor del punto en cada uno de los modelos de cobertura propuestos; con lo cual, se tiene la información necesaria para generar las matrices de confusión presentes en el Anexo 3 “*Matrices de confusión y estadísticos de validación*”; finalmente, se evalúa cada uno de los modelos y se rechazan aquellos con un bajo índice kappa, estos resultados se lo puede acceder en la sección “*Resultados estadísticos y validación de los modelos*” del capítulo IV.



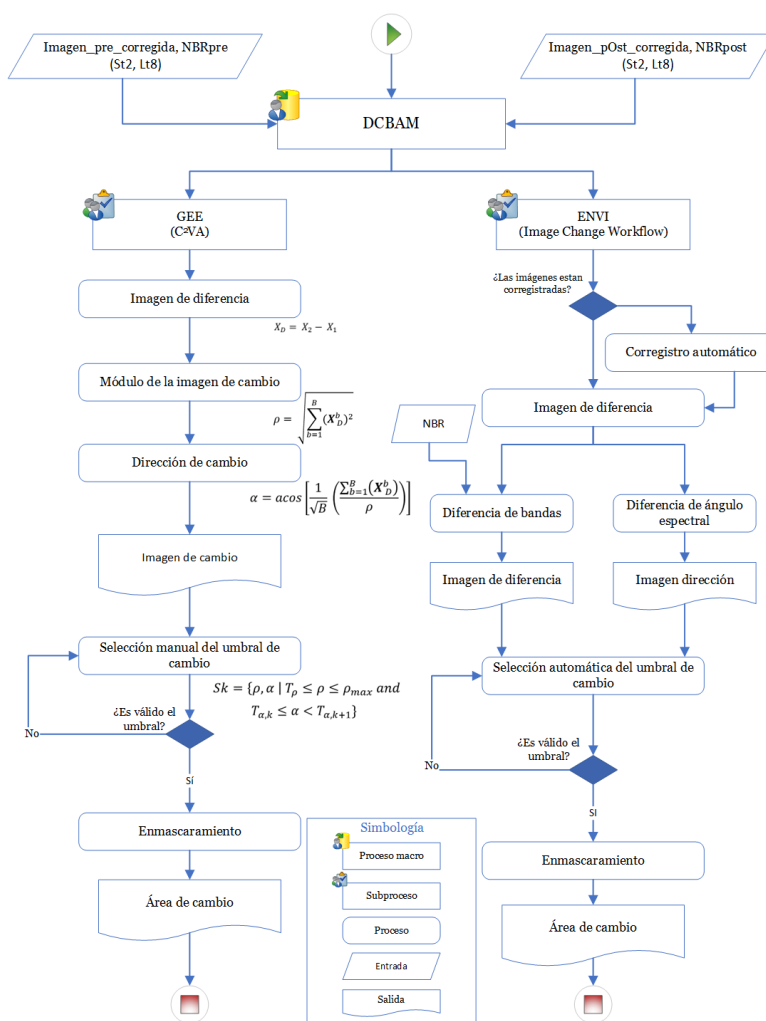
### Detección de Cambios Basada en Álgebra de Mapas (DCBAM).

A diferencia del apartado anterior, la en la DCBAM se aplican diferentes algoritmos o procedimientos base en cada uno de los programas trabajados, es decir, mientras en GEE se desarrolló el C<sup>2</sup>VA; en ENVI, se trabaja de una manera automática mediante el uso de la herramienta “Image Change Workflow”.

La DCBAM, esquemáticamente, es representada en el flujograma de la figura 37; tanto para la metodología llevada a cabo en GEE, como la trabajada en ENVI.

**Figura 37**

*Flujograma para la DCBAM.*



**DCBAM Mediante GEE.** Dentro de GEE no existen funciones que faciliten este procedimiento, salvo las operaciones básicas entre imágenes; en consecuencia, el algoritmo fue desarrollado desde la base aplicando los siguientes pasos:

1. Se calcula la imagen vector o de diferencia, este se determina de la resta del par de imágenes a comparar el cambio.
2. Se obtiene la imagen módulo, la cual, se calcula aplicando la ecuación 17 del presente estudio.
3. Se genera la imagen dirección de cambio, esto mediante la programación de la ecuación 18.
4. Se determina la imagen de detección, a través de la combinación de la imagen módulo y la imagen dirección.
5. Se enmascaran las zonas de cambio y se determinan los umbrales de detección, esto a través de métodos de ensayo y error.
6. Se crea la imagen de cambio.
7. Se exportan los resultados.

Los código de trabajo para el C<sup>2</sup>VA, se acceden en el siguiente enlace: [aerodriguezm/DCBAM/St2](#) y [aerodriguezm/DCBAM/Lt8](#). Los resultados del presente apartado, se encuentran en el Capítulo IV, sección “*Resultados de la DCBAM en GEE*”.

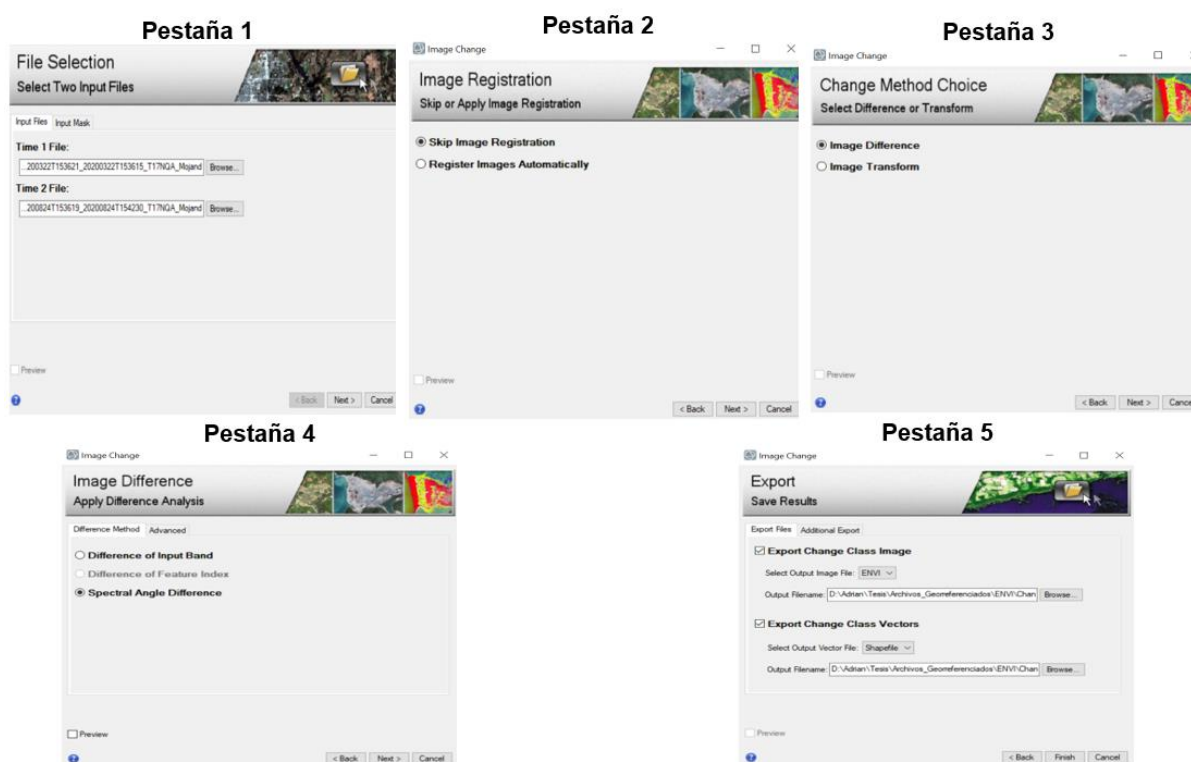
**DCBAM Mediante ENVI.** Dentro de ENVI, la herramienta “*Image Change Workflow*” (ver figura 38), genera la detección de áreas de cambio a través de algebra de mapas, la configuración se la realiza de la siguiente manera:

1. Selección de imágenes a interpretar el cambio (pestaña 1).
2. Opción a corregistrar de no haberlo realizado o validado (pestaña 2).
3. Selección del método de detección (pestaña 3).

4. Selección de la imagen de diferencia, la cual puede ser: diferencia de bandas, diferencia de índices o diferencia angular (pestaña 4).
5. Exportación de resultados (pestaña 5).

**Figura 38**

*Procedimiento a llevar a cabo para la DCBAM en el programa ENVI*



Los resultados de aplicar la herramienta de “Image Change Workflow”, se encuentran en el Capítulo IV, sección “Resultados de la DCBAM en ENVI”.

### **Generación de Mapas de Cambio y Creación del Geovisor.**

La generación de mapas de cambio hace referencia a la fase final del proyecto de titulación trabajado, en esta, se representa la información cartográfica a escala 1:100000 de las zonas de cambio; la misma puede ser producto de: incendio forestal, actividad agrícola u otros cambios; en adición, se crea el geovisor para la visualización en la web, de la clasificación de

coberturas y generación de las zonas de cambio. Finalmente, se compara, mediante estadísticos u observación directa, los resultados obtenidos a través de GEE y el software copyright.

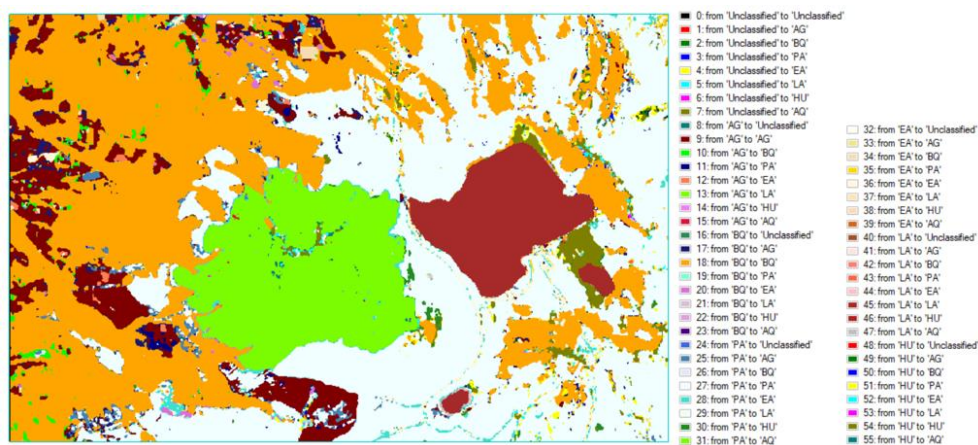
### Áreas de Cambio de Cobertura

A fin de crear las áreas de cambio, es necesario estandarizar las clasificaciones de cobertura, tanto pre evento, como post evento; para ello, cada clase tiene que tener un único identificador y este debe ser el mismo en el par a comparar.

Posteriormente, se trabajó con el proceso de generación de la imagen de cambio, el cual y dentro del software ENVI, se lo realiza mediante el uso de la herramienta “*Thematic Change Workflow*”, en la que se ingresan los archivos de la clasificación de cobertura y, automáticamente, se genera la imagen de interacción entre las coberturas (ver figura 39); sin embargo, posee una gran limitante al no permitir trabajar con clasificaciones que hayan sido generadas en otro software.

### Figura 39

*Ejemplo de la imagen de interacción generada a partir de la interacción entre dos coberturas (pre incendio y post incendio) en ENVI.*

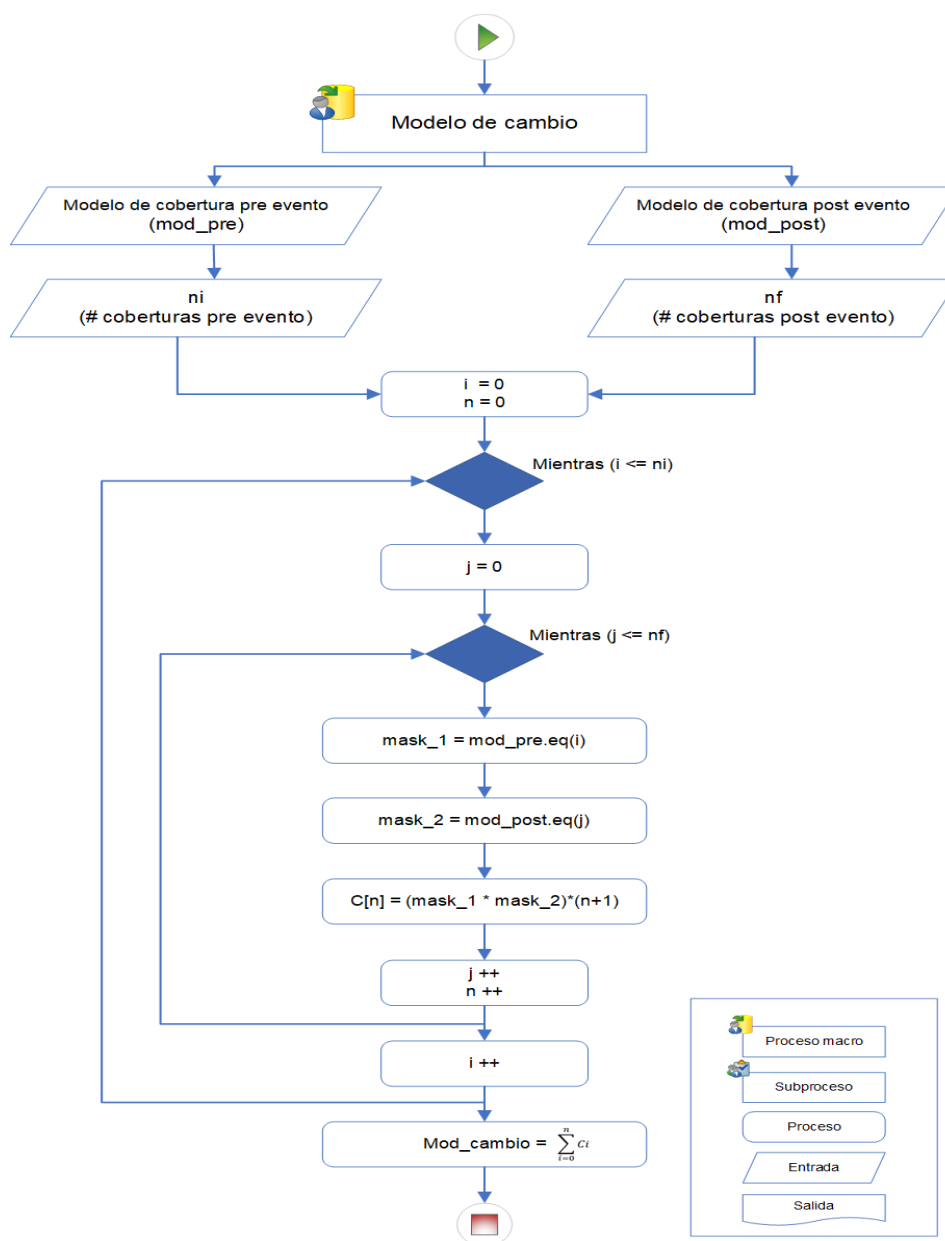


*Nota:* El color verde representa a la zona de interacción de Páramo a incendio forestal.

Debido a ello, en GEE, se desarrolló un algoritmo que cumple con el proceso de generación de imágenes de interacción, cuyo flujograma de programación se observa en la figura 40.

**Figura 40**

*Flujograma de programación del algoritmo para la creación de la imagen de interacción dentro de GEE*



La descripción del paso a paso, se la plasma de la siguiente manera:

Primero, se extrae el número de coberturas por cada clasificación a comparar, es decir, el  $ni$  y el  $nf$  del flujograma de la figura 41.

Segundo, se crean las áreas de interacción entre las diferentes coberturas (ver figura 41), a las que se les asigna un valor único, esto se lo lleva a cabo operando la ecuación 26,

$$Ci = (Cob_{pre} \cdot eq(ni) * Cob_{post} \cdot eq(nf)) * (n + 1) \quad [26]$$

En donde:

- $Cob_{pre}$  y  $Cob_{post}$  = Cobertura pre incendio y post incendio.
- $eq(ni)$  = función que crea una imagen binaria dentro de GEE, en la que 1 son los pixeles de cobertura igual a  $ni$  y 0 el resto de la imagen a evaluar.

#### Figura 41:

*Ejemplo de una zona de interacción entre coberturas.*



*Nota:* El color blanco representa al área de interacción y posee un valor de 1, mientras que el resto de la imagen, posee un valor de 0.

Finalmente, se suman las zonas de interacción mediante la ecuación 27, generando la imagen de interacción representada en la figura 42.

$$Img_{cambio} = \sum_{i=0}^{nx*nj} Ci \quad [27]$$

### Figura 42

Ejemplo de la imagen de interacción generada a partir de dos coberturas (pre incendio y post incendio) en GEE.



*Nota:* La zona blanca, representan visualmente el área donde no existe cambio, mientras que el resto de colores, son zonas de interacción, por ejemplo, en el centro de la imagen se observa de color naranja, el área de cambio producto del incendio.

El código fuente para el cumplimiento de este proceso, se lo accede mediante el siguiente enlace: [aerodriguezm/img\\_cambio](https://github.com/aerodriguezm/img_cambio).

Como resultado, se suelen tener interacciones entre coberturas que son sumamente pequeñas o nulas (ver figuras 39 y 42), con lo cual, se realiza un proceso de generalización o reclasificación de valores acorde al siguiente criterio: 1) Sin cambio, 2) Incendio forestal, 3) Actividad agrícola y 4) Otros cambios; mediante las cuales se generaron las imágenes de cambio de cambio.

Las imágenes resultantes de este procedimiento, se las visualiza en el capítulo IV, sección, “*Resultados de la generación de Imágenes de Cambios*” con las que se trabajará en los mapas de cambio.

### ***Creación del Geovisor***

Para un mejor entendimiento del siguiente proceso y del código fuente para el aplicativo, se creó el del Anexo 1, capítulo 8 “*CREACIÓN DE GEOVISORES*”; por otro lado, el código base, es de acceso público a los usuarios de GEE mediante el siguiente:

[aerodriguezm/Geovisor](https://github.com/aerodriguezm/Geovisor).

Al realizar la creación del geovisor mediante lenguaje JavaScript, en la Api de GEE, fue necesaria la aplicación del siguiente procedimiento:

En primer lugar, se exporta o sube al repositorio, toda la información relevante a reflejar en el geovisor; cabe enfatizar, que todos los archivos tienen que permitir la visualización a otros usuarios, de manera que, al momento de publicarlo en la web, esta pueda ser cargada externamente.

En segundo lugar, se crea el mapa base; sobre el cual, se permite: acceso al botón de pantalla completa, acceso a la pestaña de desactivación de capas y cambio de mapa de referencia (ver figura 43). Esto se lo realiza mediante la función “*ui.Map()*”.



Figura 43

Configuración, mapa base del geovisor.



En tercer lugar, se creó el panel de representación de las capas a visualizar, en otras palabras, lo que se conoce como administrador de capas. Para ello, fue necesario la programación de:

- Niveles que se relacionen al título y a las instrucciones, esto se lo realizo mediante la función *"ui.Label"*.
- Selectores que sirven para elegir la capa que se desea visualizar en el mapa; se obtuvieron empleando la función *"ui.Select"*
- Botones que muestren resultados, a estos se le asocia una función que permita la visualización en el mapa base de los archivos seleccionados; se crearon aplicando el comando *"ui.Button"*.

A los niveles, selectores y botones, se los unió en un solo panel de instrucción; el cual, se creó aplicando la función “*ui.Panel*”; en la figura 44, se representa el panel de capas en la fase beta del geovisor.

#### Figura 44

*Representación del panel de capas en la fase beta del geovisor.*

The image shows a screenshot of a web interface titled "Panel de capas". It contains the following elements:

- Section 1:** "1. Imágenes corregidas" with a dropdown menu showing "St2\_post".
- Section 2:** "2. Cobertura generada GEE: (1 - 4 USC), (5 - 8 SC)" with a dropdown menu showing "5. Cob\_St2pre\_SC\_GEE".
- Section 3:** "3. Cobertura generada en ENVI: (1 - 4 USC), (5 - 8 SC)" with a dropdown menu showing "5. Cob\_St2pre\_SC\_ENVI".
- Section 4:** "4. Cobertura generada mediante interpretación/digitalización" with a dropdown menu showing "2. Cob post incendio".
- Bottom:** A button labeled "Mostrar".

Por otro lado, es necesario la creación de un segundo panel, el cual, hace referencia a la leyenda empleada en la visualización de los resultados, por ende, se actualiza en función de los archivos que se desee observar en el geovisor. Este panel, se programó para que se añada de manera automática al mapa base en el momento de cargar una capa.

A continuación, se adjuntan el panel de administración de capas y el mapa base trabajado, esto mediante la función “*ui.SplitPanel*”.

En último lugar y con la intención de publicar el geovisor, se prosiguió de la creación del aplicativo web, para ello, se accedió al administrador de aplicaciones (“*Manage Apps*”) de GEE mediante el botón “*Apps*”, ubicado en la parte superior derecha en editor de código; aquí, se almacenan todos los aplicativos que hayan sido desarrollados por el usuario (ver figura 45).

Figura 45

Panel para administración de aplicaciones en GEE.

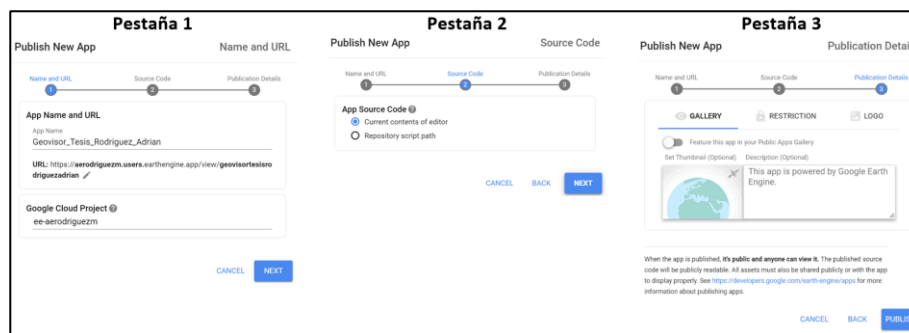


El paso a paso para la creación de una nueva aplicación, es el siguiente:

- Se accede a la herramienta de nueva aplicación, esto mediante el botón “NEW APP”.
- Se asigna un nombre único al aplicativo que se desea publicar, para el caso de estudio, es “*Geovisor\_Tesis\_Rodriguez\_Adrian*” (Pestaña 1 figura 45).
- Se estableció el código fuente, el cual, puede ser obtenido del repositorio, o simplemente, se extrae sobre el que se está trabajando (Pestaña 2 figura 46).
- Opcionalmente, se carga un logo de identificación y se restringe el acceso a usuarios no deseados mediante su cuenta de Google (Pestaña 3 figura 46).
- Finalmente, se publican el aplicativo con el botón “*Publish*”.

Figura 46

Pestañas de instrucciones para la publicación de geovisores dentro de GEE.



## Capítulo IV: Resultados y Análisis de Resultados

En este capítulo se detallan etapa por etapa, los resultados y el análisis de estos del presente proyecto; además, se plasman los cambios de cobertura del suelo obtenidos; por otra parte, se determina cual es el área afectada producto del incendio forestal en cada una de las diferentes metodologías de detección de cambios. Finalmente, se pondrá a disposición el enlace al geovisor para la visualización de los archivos cartográficos generados y que sean relevantes y en investigación.

### Resultados de la Recopilación de Información y Estandarización de Datos Válidos

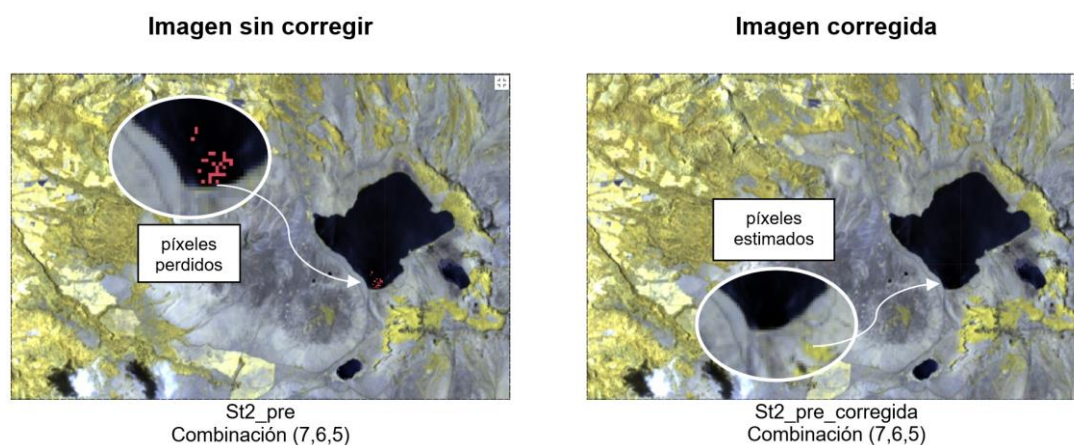
De la primera etapa, se obtienen los siguientes resultados:

#### **Resultados del Análisis Radiométrico**

Como resultado del apartado actual, se obtuvo la corrección de las imágenes St2\_pre y St2\_post debido a píxeles perdidos; con lo cual, en las figuras 47 y 48, se visualizan mediante diferentes combinaciones de bandas, el contraste entre las imágenes sin corregir y las imágenes corregidas; cabe enfatizar que, el tiempo de procesamiento en la plataforma de GEE fue de 52 milisegundos.

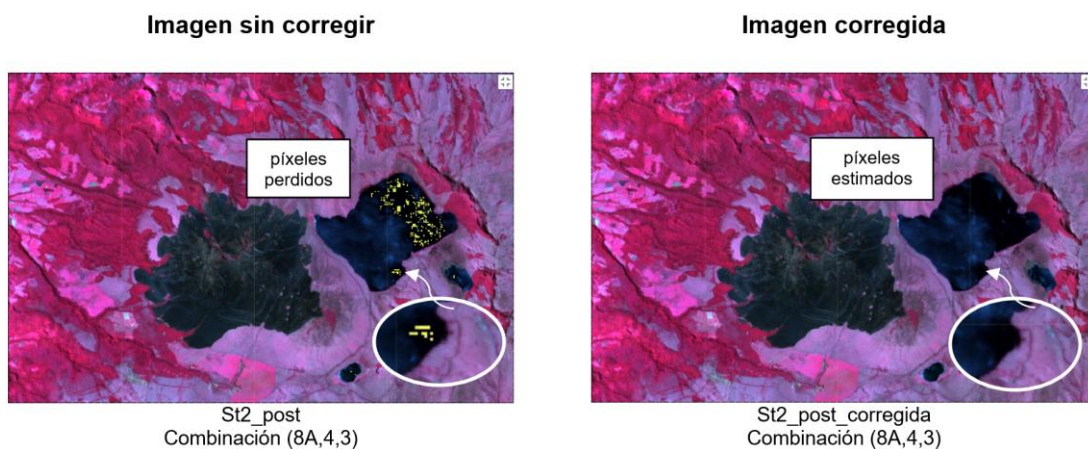
#### **Figura 47**

*Análisis visual de la corrección de píxeles perdidos, imagen St2 pre incendio.*



**Figura 48**

*Análisis visual de la corrección de píxeles perdidos, imagen St2 post incendio.*



### **Resultados de la Validación Geométrica**

En la tabla 13, se presentan diferentes estadísticos a comparar en la evaluación de la exactitud posicional entre los puntos de validación sobre de la cartografía base y los puntos de verificación sobre las imágenes satelitales, de los cuales se destaca el test NSSDA.

**Tabla 13**

*Estadísticos para la evaluación de la exactitud posicional.*

Parámetros	Puntos de validación vs			
	Lt8_pre	Lt8_post	St2_pre	St2_post
Nº de puntos	22	22	22	22
Distancia mínima [m]	4.452	4.554	2.188	1.071
Distancia máxima [m]	21.981	29.914	26.367	18.666
Distancia promedio [m]	13.361	16.483	6.390	6.264
Desviación estándar [m]	4.410	6.639	5.345	3.601
RMSE <sub>x</sub> [m]	9.914	11.935	6.352	5.784
RMSE <sub>y</sub> [m]	9.939	13.089	1.490	4.261
Test NSSDA [m] (95%)	14.039	17.713	6.524	7.184

Acorde a la normativa proporcionada por el IGM, la precisión horizontal para trabajos cartográficos a escala 1:100 000 es de 30 m, con lo cual y en función al test NSSDA, ninguna de las imágenes sobrepasa esta tolerancia, tenido como resultados 14.04 m, 17.71 m, 6.52 m y 7.18 m para las imágenes Lt8\_pre, Lt8\_post, St2\_pre y St2\_post respectivamente; es decir, se encuentran correctamente posicionadas sobre el terreno (georreferenciadas) a la escala de trabajo y se puede continuar con la validación del corregistro.

**Resultados de la Validación del Corregistro.** La validación del corregistro se la realiza imagen vs imagen, con ello, se obtiene los estadísticos plasmados en la tabla 14.

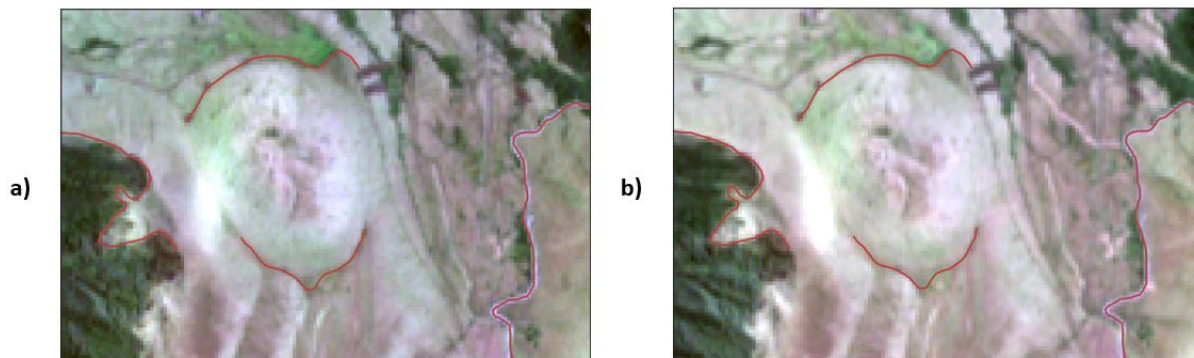
**Tabla 14: Estadísticos para la evaluación del corregistro.**

<b>Parámetros</b>	<b>Lt8_pre vs Lt8_post</b>	<b>St2_pre vs St2_post</b>
Nº de puntos	22	22
Distancia mínima [m]	0.680	0.395
Distancia máxima [m]	28.959	12.306
Distancia promedio [m]	6.783	4.207
Desviación estándar [m]	9.161	3.649
RMSE <sub>x</sub> [m]	11.580	1.678
RMSE <sub>y</sub> [m]	6.864	1.634
Test NSSDA [m] (95%)	13.461	2.343

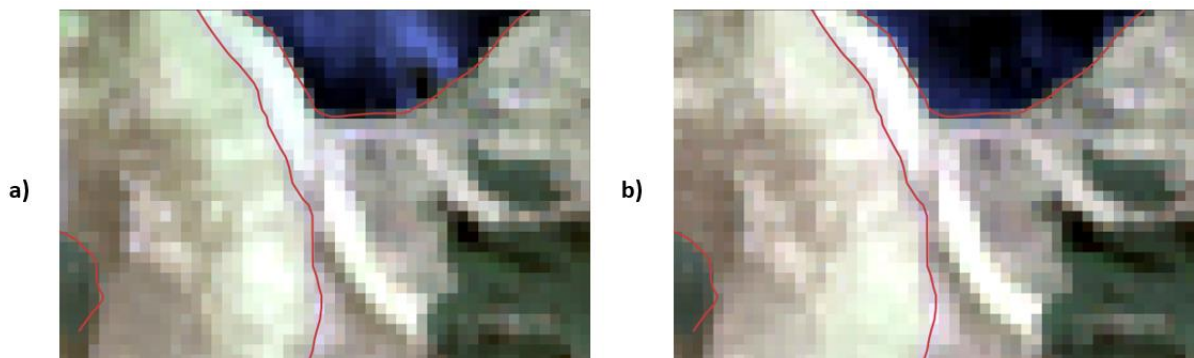
Mediante el test NSSDA se obtiene de resultado los valores de 13.46 m y 2.34 m para las comparaciones imagen vs imagen de las plataformas Landsat 8 y Sentinel 2 respectivamente, con lo cual, se determina que el error de solapamiento es menor a un pixel (ver figuras 49 y 50), por ende, no es necesario realizar el corregistro en las imágenes descargadas.

**Figura 49**

*Representación visual de la validación del corregistro entre: a) St2\_pre y b) St2\_post*

**Figura 50**

*Representación visual de la validación del corregistro entre: a) Lt8\_pre y b) Lt8\_post*



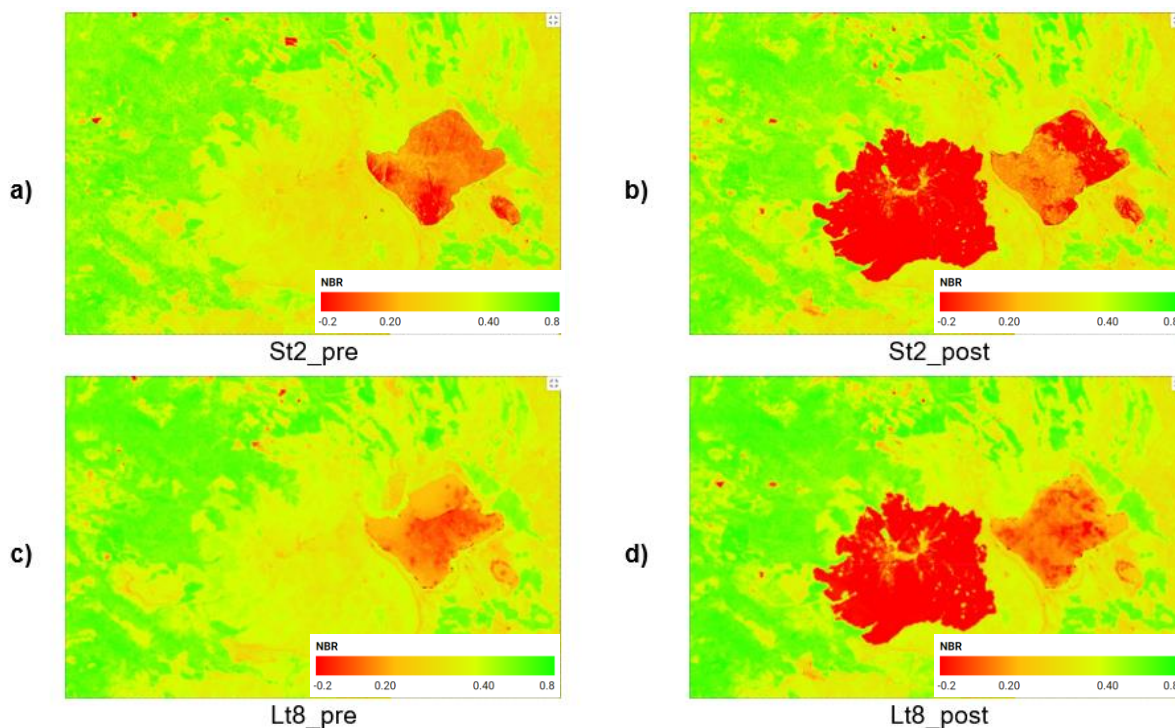
*Nota:* Las líneas de color rojo, cumplen la función de apoyo visual en la observación de desplazamientos; estas, son las mismas en el par de imágenes a comparar.

### ***Resultados del Cálculo del Índice de Calcinación Normalizado (NBR)***

En la figura 51, se representa visualmente en pseudocolor escalado desde [-0.2 a 0.8], el NBR de cada una de las imágenes satelitales utilizadas en el presente proyecto.

**Figura 51**

*Representación visual en pseudocolor del NBR.*



*Nota:* En las imágenes b) y c) de la presente figura, se demuestra que el valor del NBR que representa la superficie afectada por el flagelo, es menor  $-0.1$ ; estas imágenes serán compartidas a través del geovisor para futuros análisis e interpretaciones.

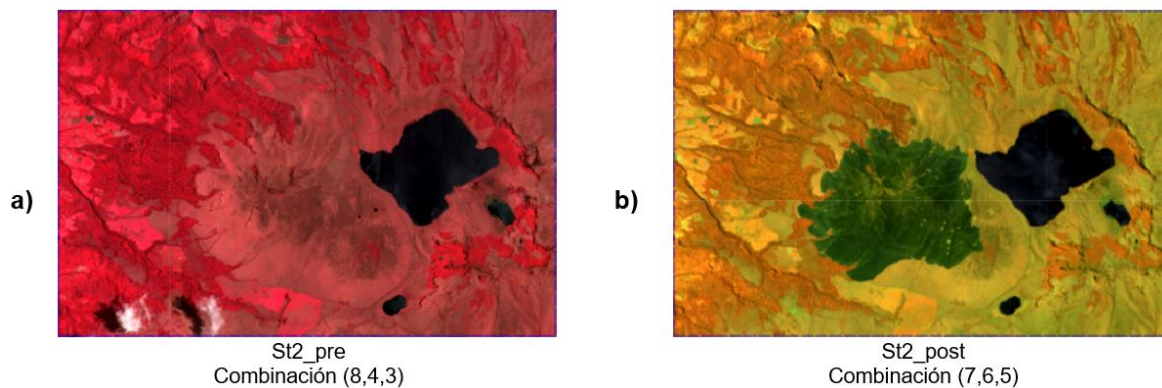
### ***Resultados de la Exportación de Imágenes y Generación de Identificadores.***

Los resultados más relevantes de la etapa uno, son las imágenes Landsat 8 (Lt8\_pre y Lt8\_post) y Sentinel 2 (St2\_pre y St2\_post) corregidas radiométricamente, validadas el correregistro y calculado el NBR. En las imágenes presentes en el literal b) de las figuras 52 y 53, se observa con claridad el área afectada producto de un incendio forestal, por ende, se determina que, es posible llevar a cabo un proceso óptimo de detección de cambios.



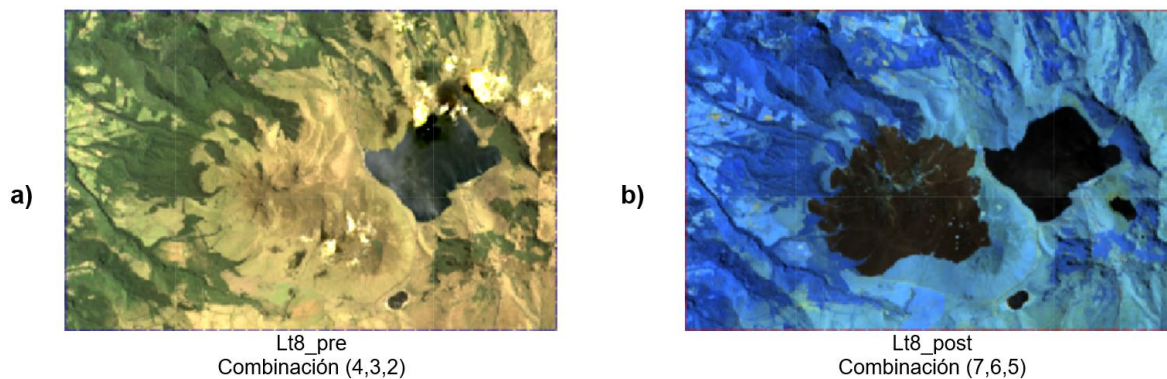
### Figura 52

*Archivos ráster de la plataforma Sentinel 2 a exportar desde GEE, visualmente representados en diferentes combinaciones de bandas.*



### Figura 53

*Archivos ráster de la plataforma Landsat 8 a exportar desde GEE, visualmente representados en diferentes combinaciones de bandas.*



En la tabla 15 se plasma el valor de los identificadores para cada imagen procesada; mediante el mismo, es factible acceder a través de código al repositorio personal de GEE donde se encuentran almacenadas. Cabe recalcar que, el tiempo total de procesamiento para la culminación de la etapa uno dentro de GEE, fue de 4.264 segundos.

**Tabla 15**

*Identificadores de acceso al repositorio Assets de GEE.*

<b>N°</b>	<b>Nombre</b>	<b>Id</b>
1	St2_pre	"users/aerodriguezm/Tesis/Imagenes_pre_procesadas/St2_pre"
2	St2_post	"users/aerodriguezm/Tesis/Imagenes_pre_procesadas/St2_post"
3	Lt8_pre	"users/aerodriguezm/Tesis/Imagenes_pre_procesadas/Lt8_pre"
4	Lt8_post	"users/aerodriguezm/Tesis/Imagenes_pre_procesadas/Lt8_post"

### **Resultados de la Clasificación de Imágenes y Detección de Cambios.**

De esta etapa se obtiene la leyenda temática propuesta y los archivos ráster que representan la cobertura del suelo, tanto antes del flagelo, como después del mismo; mediante estos, posteriormente se determinará el área de cambio, sobre las clasificaciones que cumplan con la validación estadística del índice Kappa.

### **Resultados de la Visita de Campo a la Zona de Estudio.**




En el presente proyecto se llevó a cabo una visita de campo al sector del Páramo de Mojanda, la cual, se realizó el 29 de mayo del 2022 con el objetivo de reconocer y observar los tipos de coberturas del suelo a fin de definir la leyenda temática.





A su vez, se obtuvieron muestras de control para la creación de las matrices de confusión y el cálculo del índice Kappa, con el propósito de validar las coberturas generadas en los archivos de clasificación.




En la tabla 16 se plasma el registro fotográfico con sus respectivas coordenadas y observaciones de: ecosistemas, actividad antrópica, actividad agrícola o agropecuaria, zonas de cuerpos de agua, entre otros. Las imágenes, fueron captadas con una cámara profesional marca Nikon D3500.

Tabla 16

## Registro fotográfico de la visita de campo

id	Imagen	Descripción						
1)		<p style="text-align: center;"><b>Coordenadas de la foto</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;">EPGS:</td> <td style="width: 33%;">Este:</td> <td style="width: 33%;">Norte:</td> </tr> <tr> <td>32717</td> <td>802745.8</td> <td>10017652.0</td> </tr> </table> <p><b>Observación:</b> Ruta de acceso a la Laguna de Mojanda, la cual se encuentra empedrada en todo el trayecto y accesible a vehículos livianos; el inicio de la vía se encuentra en la ciudad de Otavalo, tal cual se visualiza en el mapa de acceso a Mojanda (figura 32.)</p>	EPGS:	Este:	Norte:	32717	802745.8	10017652.0
EPGS:	Este:	Norte:						
32717	802745.8	10017652.0						
2)		<p style="text-align: center;"><b>Coordenadas de la foto</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;">EPGS:</td> <td style="width: 33%;">Este:</td> <td style="width: 33%;">Norte:</td> </tr> <tr> <td>32717</td> <td>802745.8</td> <td>10017652.0</td> </tr> </table> <p><b>Observación:</b> Obtención del punto de muestreo en una zona de transición entre el Arbustal Siempreverde del Páramo y el Herbazal de Páramo.</p>	EPGS:	Este:	Norte:	32717	802745.8	10017652.0
EPGS:	Este:	Norte:						
32717	802745.8	10017652.0						
3)		<p style="text-align: center;"><b>Coordenadas de la foto</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;">EPGS:</td> <td style="width: 33%;">Este:</td> <td style="width: 33%;">Norte:</td> </tr> <tr> <td>32717</td> <td>802915.4</td> <td>10015466.5</td> </tr> </table> <p><b>Observación:</b> Letrero de entrada a la zona de protección ecológica Mojanda, este se encuentra rodeado por plantas de paja (Stipa ichu), la cual, según (MAE, 2013) es la planta predominante del ecosistema Herbazal del Páramo.</p>	EPGS:	Este:	Norte:	32717	802915.4	10015466.5
EPGS:	Este:	Norte:						
32717	802915.4	10015466.5						








id	Imagen	Descripción						
4)		<p style="text-align: center;"><b>Coordenadas de la foto</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;">EPGS:</td> <td style="width: 33%;">Este:</td> <td style="width: 33%;">Norte:</td> </tr> <tr> <td>32717</td> <td>802322.6</td> <td>10014858.7</td> </tr> </table> <p><b>Observación:</b> Se visualizan diferentes coberturas del suelo y diferentes ecosistemas como: cuerpos de agua (Laguna Caricocha), bosque Arbustales Siempreverdes y Herbazal de Páramo.</p>	EPGS:	Este:	Norte:	32717	802322.6	10014858.7
EPGS:	Este:	Norte:						
32717	802322.6	10014858.7						
5)		<p style="text-align: center;"><b>Coordenadas de la foto</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;">EPGS:</td> <td style="width: 33%;">Este:</td> <td style="width: 33%;">Norte:</td> </tr> <tr> <td>32717</td> <td>802402.6</td> <td>10014894.5</td> </tr> </table> <p><b>Observación:</b> Pequeño caserío, en el que se encuentran cabañas turísticas, la laguna mayor y el ecosistema Herbazal inundable de Páramo.</p>	EPGS:	Este:	Norte:	32717	802402.6	10014894.5
EPGS:	Este:	Norte:						
32717	802402.6	10014894.5						
6)		<p style="text-align: center;"><b>Coordenadas de la foto</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;">EPGS:</td> <td style="width: 33%;">Este:</td> <td style="width: 33%;">Norte:</td> </tr> <tr> <td>32717</td> <td>802402.6</td> <td>10014894.5</td> </tr> </table> <p><b>Observación:</b> Segunda laguna principal del complejo Lacustre de Mojanda llamada Huarmicocha.</p>	EPGS:	Este:	Norte:	32717	802402.6	10014894.5
EPGS:	Este:	Norte:						
32717	802402.6	10014894.5						
7)		<p style="text-align: center;"><b>Coordenadas de la foto</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;">EPGS:</td> <td style="width: 33%;">Este:</td> <td style="width: 33%;">Norte:</td> </tr> <tr> <td>32717</td> <td>801729.0</td> <td>10014778.7</td> </tr> </table> <p><b>Observación:</b> Foto captada en dirección norte desde la coordenada de toma, en esta se observa pajonales y una parcela agrícola.</p>	EPGS:	Este:	Norte:	32717	801729.0	10014778.7
EPGS:	Este:	Norte:						
32717	801729.0	10014778.7						

id	Imagen	Descripción			
8)		<p data-bbox="971 302 1268 327"><b>Coordenadas de la foto</b></p> <table data-bbox="867 348 1365 411"> <tr> <td data-bbox="867 348 1040 411">EPGS: 32717</td> <td data-bbox="1040 348 1203 411">Este: 801622</td> <td data-bbox="1203 348 1365 411">Norte: 10014862.5</td> </tr> </table> <p data-bbox="867 470 1365 653"><b>Observación:</b> Foto capturada en dirección norte desde la cima del cerro Fuya Fuya, esta, se observa actividad agrícola o agropecuaria, además de los bosques Arbustales Siempreverdes y el Herbazal de Páramo.</p>	EPGS: 32717	Este: 801622	Norte: 10014862.5
EPGS: 32717	Este: 801622	Norte: 10014862.5			
9)		<p data-bbox="971 716 1268 741"><b>Coordenadas de la foto</b></p> <table data-bbox="867 762 1365 825"> <tr> <td data-bbox="867 762 1040 825">EPGS: 32717</td> <td data-bbox="1040 762 1203 825">Este: 801684.73</td> <td data-bbox="1203 762 1365 825">Norte: 10014898.34</td> </tr> </table> <p data-bbox="867 896 1365 1045"><b>Observación:</b> Foto captada desde la cima del cerro Fuya Fuya en dirección a la Laguna Principal, esta se encuentra rodeada del ecosistema Herbazal de Páramo.</p>	EPGS: 32717	Este: 801684.73	Norte: 10014898.34
EPGS: 32717	Este: 801684.73	Norte: 10014898.34			
10)		<p data-bbox="971 1125 1268 1150"><b>Coordenadas de la foto</b></p> <table data-bbox="867 1171 1365 1234"> <tr> <td data-bbox="867 1171 1040 1234">EPGS: 32717</td> <td data-bbox="1040 1171 1203 1234">Este: 801705.40</td> <td data-bbox="1203 1171 1365 1234">Norte: 10014968.10</td> </tr> </table> <p data-bbox="867 1285 1365 1467"><b>Observación:</b> Foto en dirección noreste desde la cima del cerro Fuya Fuya, donde se visualiza la ciudad de Otavalo, así como una pequeña parte del Lago San Pablo, atractivo turístico de la ciudad.</p>	EPGS: 32717	Este: 801705.40	Norte: 10014968.10
EPGS: 32717	Este: 801705.40	Norte: 10014968.10			

**Resultados de la Leyenda Temática.** En la tabla 17 se propone la leyenda temática adaptada del “*Corine Land Cover*”, que actuara de diferenciadora en el la clasificación de coberturas del suelo generadas en la presente investigación; obteniendo así, un total de 7 coberturas de nivel 2, agrupadas en 5 categorías de nivel 1.

Tabla 17

Leyenda temática propuesta en base al Corine Land Cover.

Nivel 1	Nivel 2	Abreviatura	Color	
<b>1. Tierras agrícolas</b>	1.1 Áreas agrícolas o agropecuarias heterogéneas	AG	#0df229	
	2.1 Bosques	BQ	#57953e	
<b>2. Bosques y áreas seminaturales</b>	2.2. Páramo	PA	#fff812	
	2.3 Espacios abiertos con poca o ninguna vegetación.	EA	#977e23	
<b>3. Cuerpos de agua</b>	3.1 Lago o laguna	LA	#2033bc	
<b>4. Humedales</b>	4.1 Humedal de Páramo	HU	#66dca1	
<b>5. Áreas de impacto</b>	5.1 Áreas quemadas	AQ	#ff0101	

### **Resultados de la Clasificación de Imágenes**

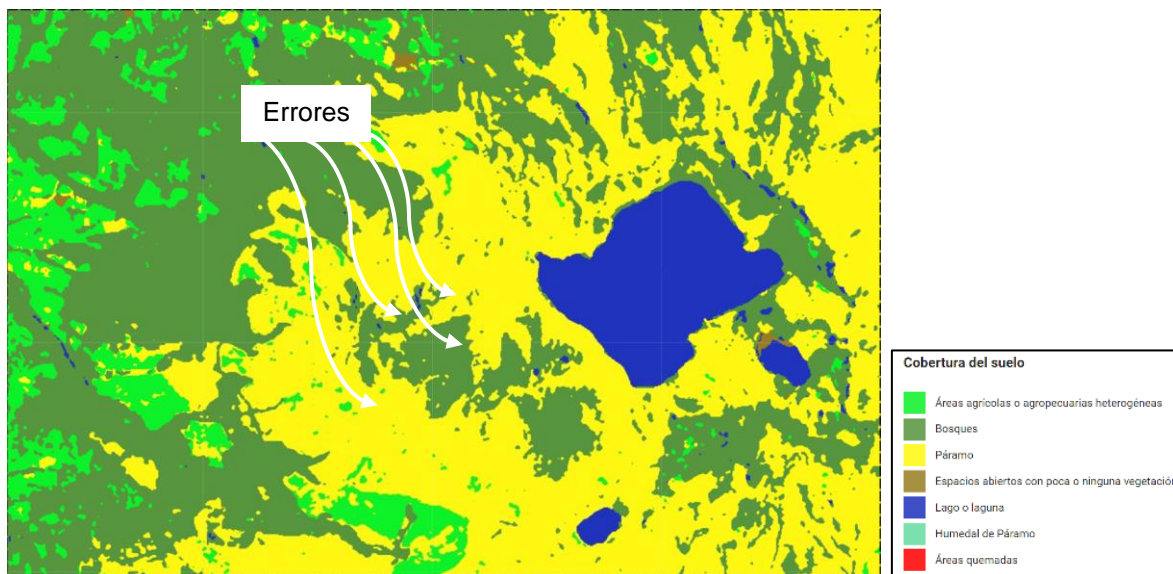
En el proceso de clasificación de imágenes, se obtiene diferentes resultados dependiendo del tipo de clasificación, estos son: clasificación no supervisada, clasificación supervisada e interpretación/digitalización.

**Resultados de la Clasificación de Imágenes no Supervisada (USC).** Los archivos de clasificación no supervisada y el tiempo de procesamiento en la generación de los mismos, se dan en función del software o plataforma utilizada, con lo cual, se obtiene lo siguiente:

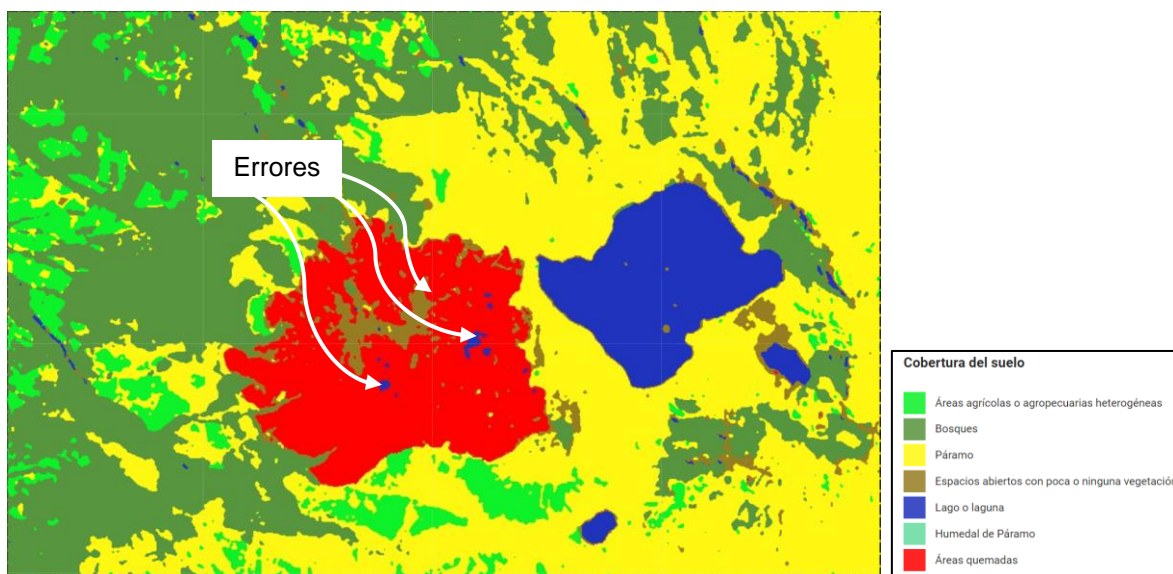
**Resultados de la USC en GEE.** En las figuras 54, 55, 56 y 57 se visualizan las clasificaciones de la cobertura en el área de estudio, generadas mediante la clasificación no supervisada, y acorde a las diferentes imágenes base; a través de el método de k-means de GEE.

**Figura 54**

*Cobertura del suelo generada a partir de la imagen St2\_pre mediante clasificación no supervisada en GEE (Cob 1 GEE).*

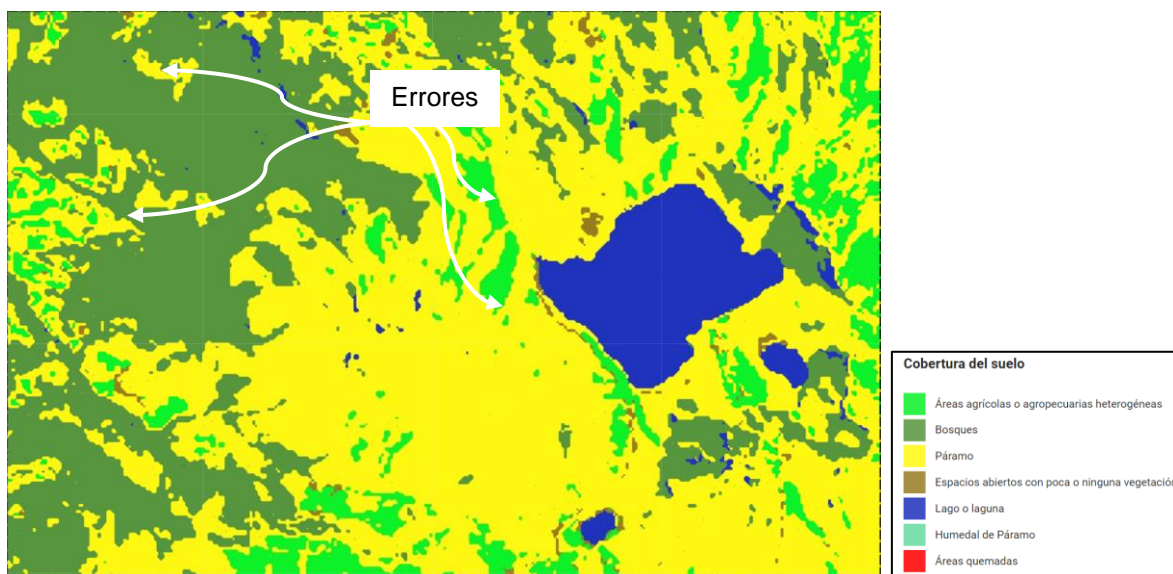
**Figura 55**

*Cobertura del suelo generada a partir de la imagen St2\_post mediante clasificación no supervisada en GEE (Cob 2 GEE).*



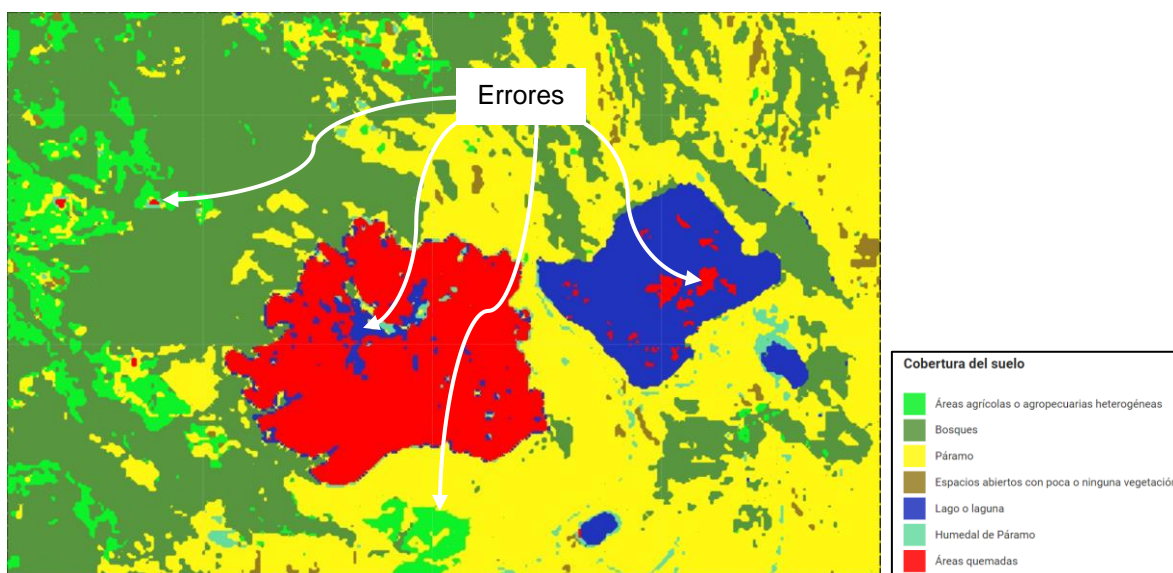
**Figura 56**

*Cobertura del suelo generada a partir de la imagen Lt8\_pre mediante clasificación no supervisada en GEE (Cob 3 GEE).*



**Figura 57**

*Cobertura del suelo generada a partir de la imagen Lt8\_post mediante clasificación no supervisada en GEE (Cob 4 GEE).*





A continuación, se realizó el análisis visual para la interpretación de cada una de las clasificaciones, obteniendo los resultados descritos en la tabla 18.

**Tabla 18**

*Resultados del análisis visual sobre las clasificaciones de cobertura generadas mediante la USC en GEE*

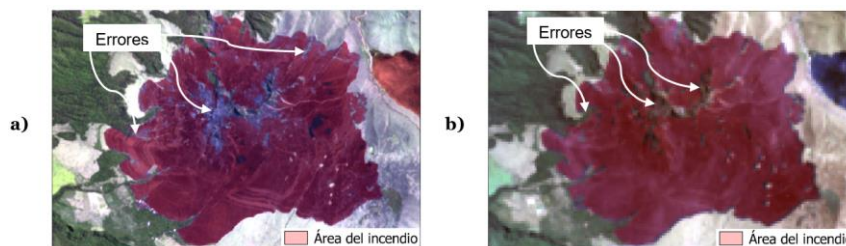
<b>Figura N°</b>	<b>Identificador</b>	<b>Análisis</b>
54	Cob 1 GEE	Se visualizó la presencia de inconsistencias en la clasificación, sobre todo, en la parte central del área de estudio, debido a la creación de Bosque, sobre la cobertura Páramo; además, la presencia errónea de cuerpos de agua.
55	Cob 2 GEE	Se observó la generación errónea de cuerpos de agua y espacios abiertos con poca o escasa vegetación, sobre la superficie quemada.
56	Cob 3 GEE	Se encontró con una clasificación errónea del Páramo, sobre todo, en el lado oeste de la zona de estudio que, en teoría, corresponde a superficies agrícolas.
57	Cob 4 GEE	Se identifico errores de clasificación, al generarse superficies afectadas por incendio forestal, en la mitad de la laguna principal y viceversa.

Por consiguiente, se determinó que, todas las coberturas generadas en el presente apartado, contienen grandes errores e inconsistencias en su clasificación; debido a ello, los mismos son descartados para el análisis de la detección de cambios; esto fue corroborado mediante la índice kappa en la sección “Resultados estadísticos y validación de la cobertura” del presente capítulo.

En lo que respecta a la cuantificación del área afectada producto del incendio forestal, que se calculó mediante la Cob 2 GEE y Cob 4 GEE, alcanzo un total de 554.466 ha y 555.484 ha respectivamente; sin embargo, el análisis visual del emparejamiento (ver figura 58) determino errores en la clasificación del área del incendio, por esta razón, estos resultados son descartados en futuros análisis.

**Figura 58**

Área clasificada como incendio forestal en: a) Cob 2 GEE y b) Cob 3 GEE

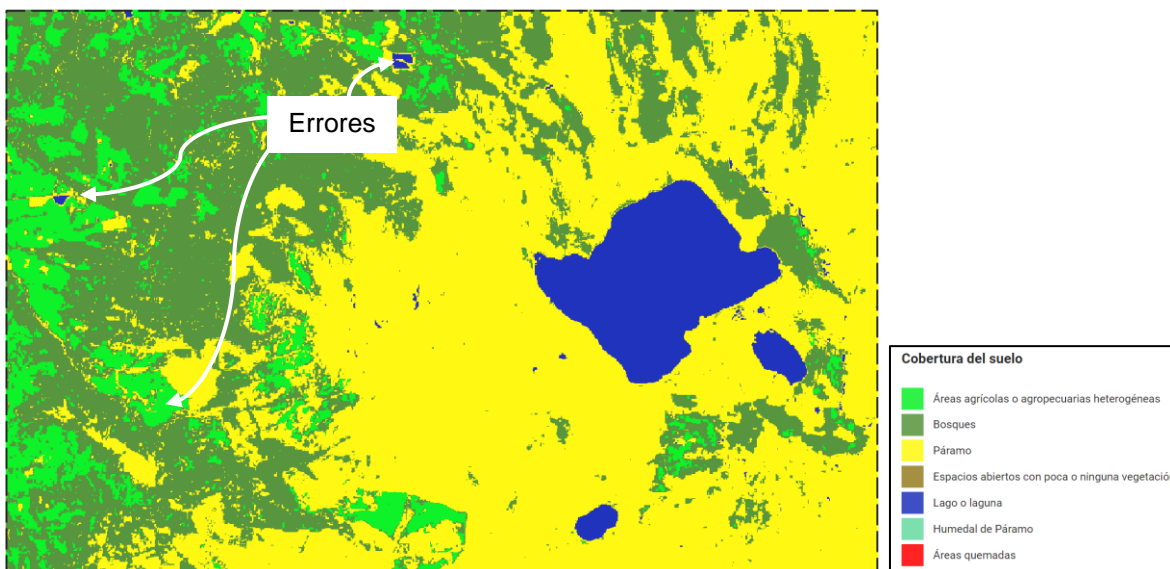


Cabe destacar que el tiempo de procesamiento aproximado dentro de GEE a fin de cumplir con la USC, fue de 5.3 segundos.

**Resultados de la USC en ENVI.** Al igual que la USC en GEE, en las figuras 59, 60, 61 y 62 se visualiza la cobertura generada mediante la clasificación no supervisada de imágenes por el método de k-means en el software ENVI.

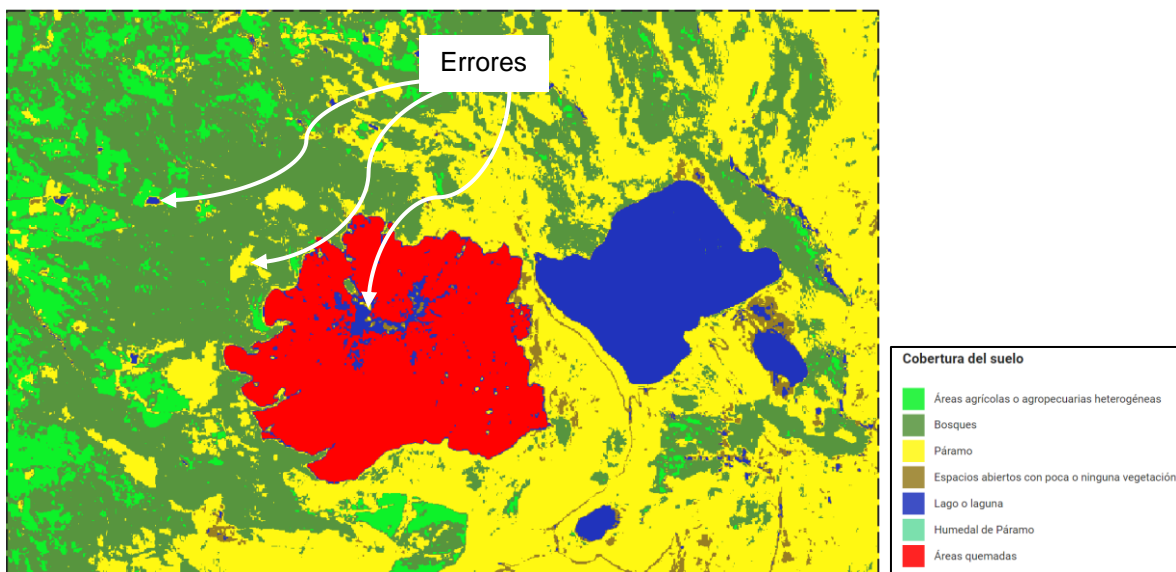
**Figura 59**

Cobertura del suelo generada a partir de la imagen St2\_pre mediante clasificación no supervisada en ENVI (Cob 1 ENVI).



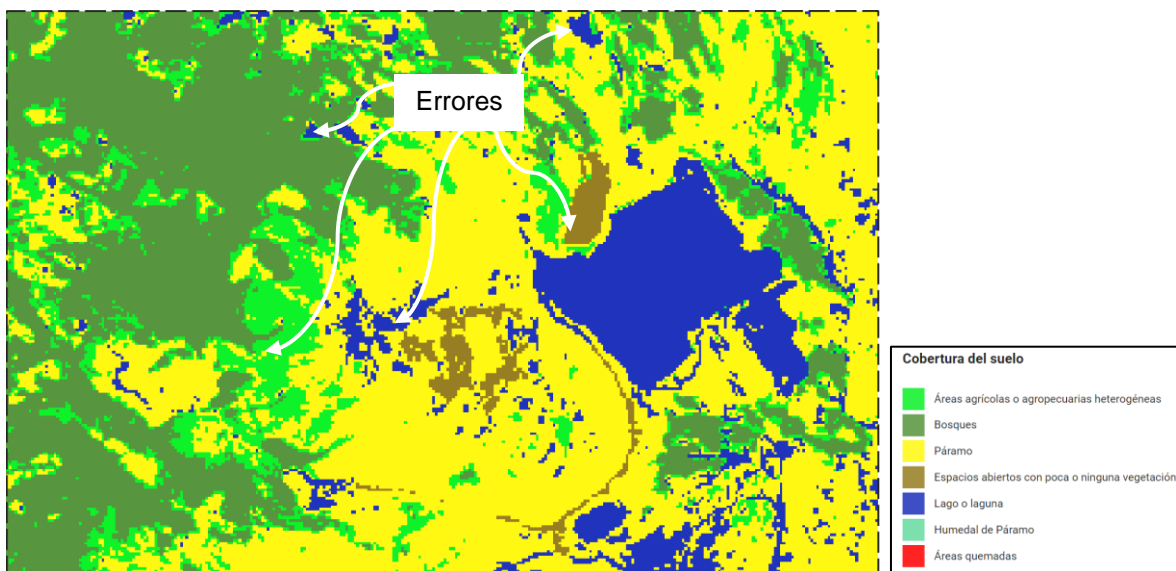
**Figura 60**

*Cobertura del suelo generada a partir de la imagen St2\_post mediante clasificación no supervisada en ENVI (Cob 2 ENVI).*



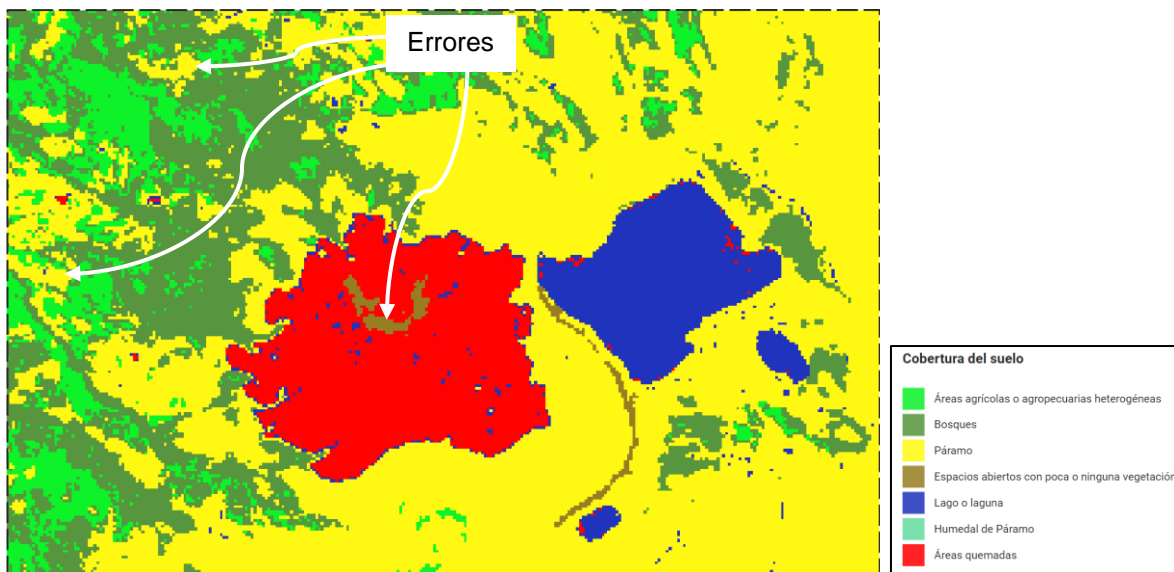
**Figura 61**

*Cobertura del suelo generada a partir de la imagen Lt8\_pre mediante clasificación no supervisada en ENVI (Cob 3 ENVI).*



## Figura 62

*Cobertura del suelo generada a partir de la imagen Lt8\_post mediante clasificación no supervisada en ENVI (Cob 4 ENVI).*



Nuevamente, se realizó el análisis visual para la interpretación de cada una de las clasificaciones, obteniendo los resultados descritos en la tabla 19.

## Tabla 19

*Resultados del análisis visual sobre las clasificaciones de cobertura generadas mediante la USC en ENVI.*

Figura N°	Identificador	Análisis
59	Cob 1 ENVI	Se visualizó la clasificación errónea de cuerpos de agua, además de un entrelazamiento entre el Páramo y las superficies de actividad agrícola, esto en la zona oeste del área de estudio.
60	Cob 2 ENVI	Se observó la generación errónea de cuerpos de agua sobre todo en la parte central del área de estudio.

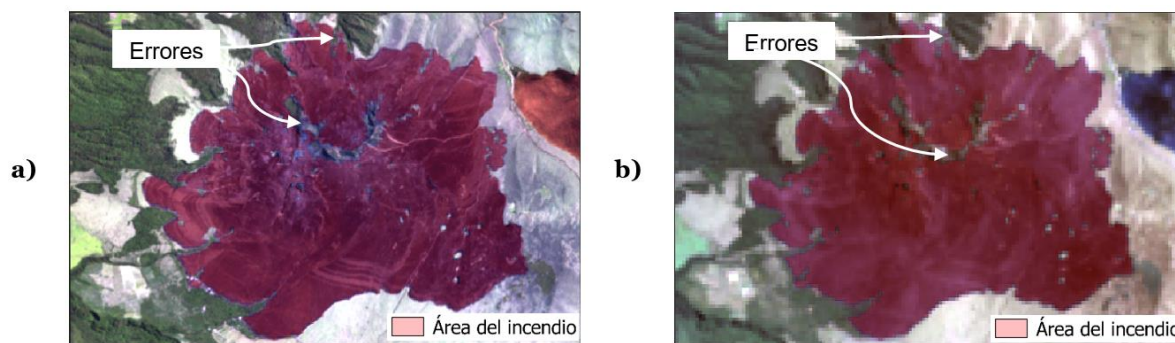
Figura N°	Identificador	Análisis
61	Cob 3 ENVI	Se encontró con una clasificación errónea de cuerpos de agua y superficies con poca o escasa vegetación en la parte central del área de estudio.
62	Cob 4 ENVI	Se identifico errores de clasificación, al generarse cuerpos de agua en la mitad de la zona afectada por el incendio forestal

Todas las coberturas generadas en el presente apartado, contienen grandes errores e inconsistencias en su clasificación; debido a ello, y al igual que en la USC de GEE, estos son descartados para el análisis de la detección de cambios; lo cual, será corroborado mediante el índice Kappa en la sección *“Resultados estadísticos y validación de la cobertura”* del presente capítulo.

En otro resultado, el área de afectación producto del incendio forestal que se determina mediante la Cob 2 ENVI y Cob 4 ENVI, es de 587.757 ha y 590.803 ha respectivamente; sin embargo, al realizar el emparejamiento con la imagen base correspondiente (ver figura 63) se observó errores en el mismo, en consecuencia, estos resultados son descartados en futuros análisis.

### Figura 63

Área clasificada como incendio forestal en: a) Cob 2 ENVI y b) Cob 3 ENVI



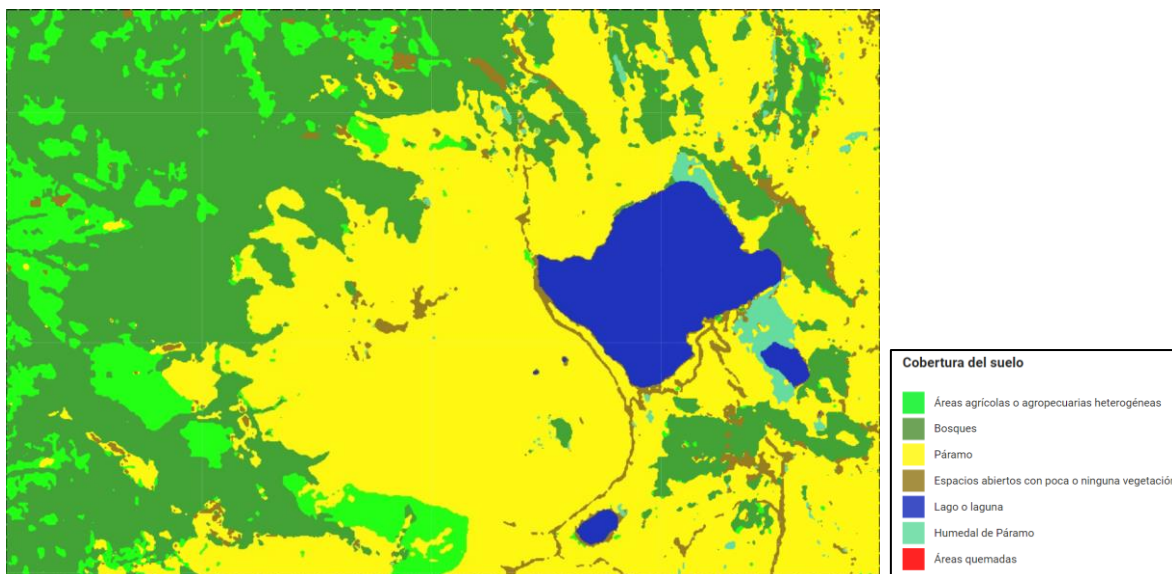
Se menciona que, el tiempo aproximado de procesamiento dentro de ENVI en el cumplimiento de la USC, fue de 6 min con 35.79 s

**Resultados de la Clasificación de Imágenes Supervisada (SC).** De la clasificación de imágenes supervisada, se obtuvieron mejores resultados con errores menores a las clasificaciones no supervisadas, esto, dentro de los diferentes programas, con lo cual, los resultados de la SC se subdividen en:

**Resultados de la SC en GEE.** Las imágenes de la cobertura del suelo generada a partir de la SC en GEE mediante SVM, son representados en las figuras 64, 65, 66 y 67.

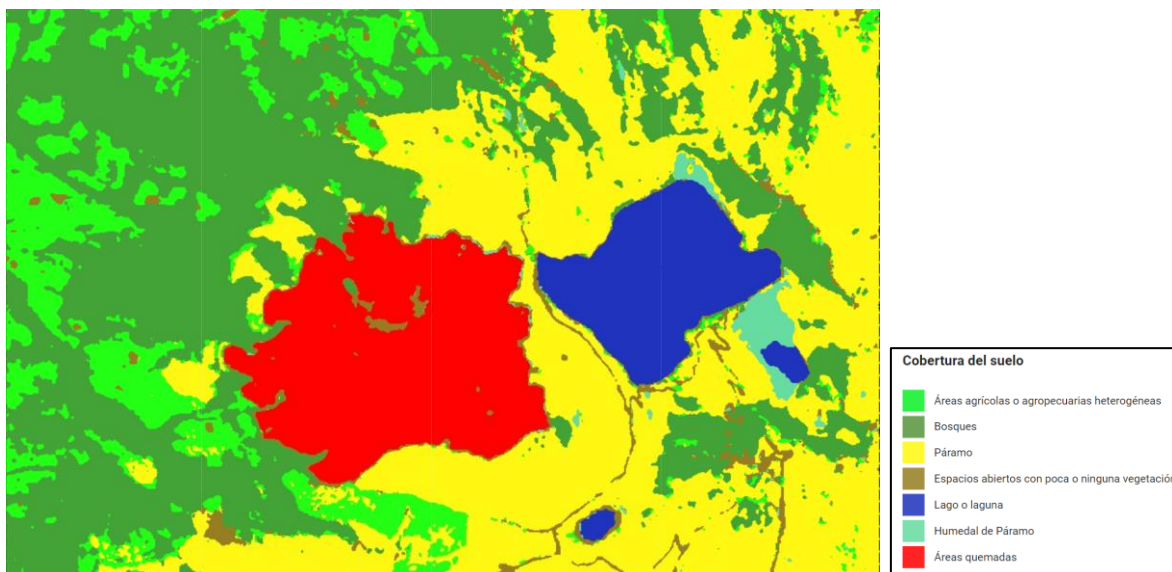
#### Figura 64

*Cobertura del suelo generada a partir de la imagen St2\_pre mediante clasificación supervisada en GEE (Cob 5 GEE).*

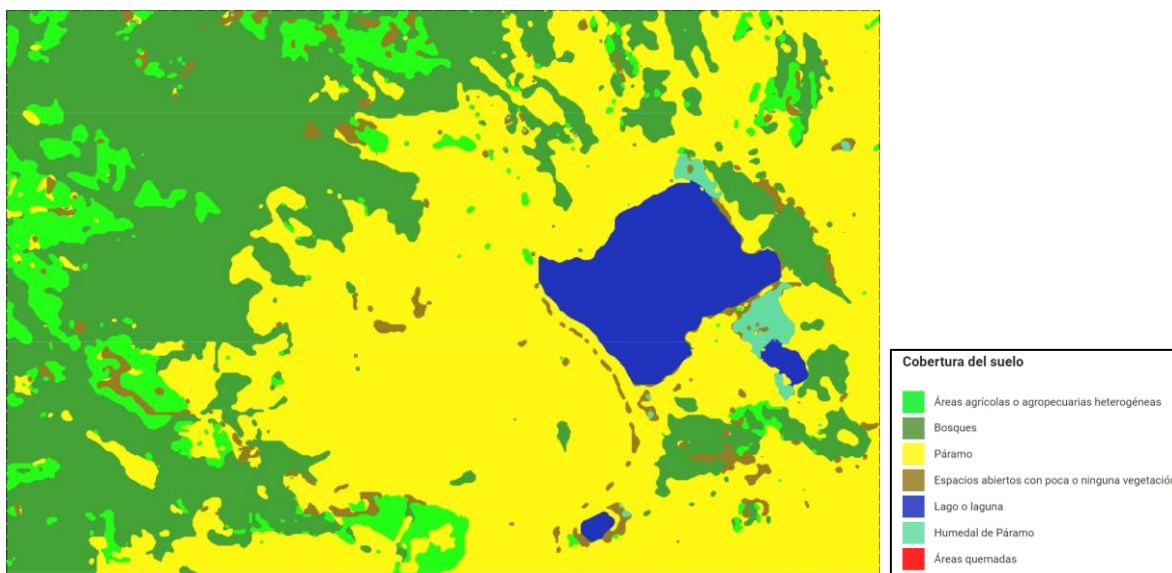


**Figura 65**

*Cobertura del suelo generada a partir de la imagen St2\_post mediante clasificación supervisada en GEE (Cob 6 GEE).*

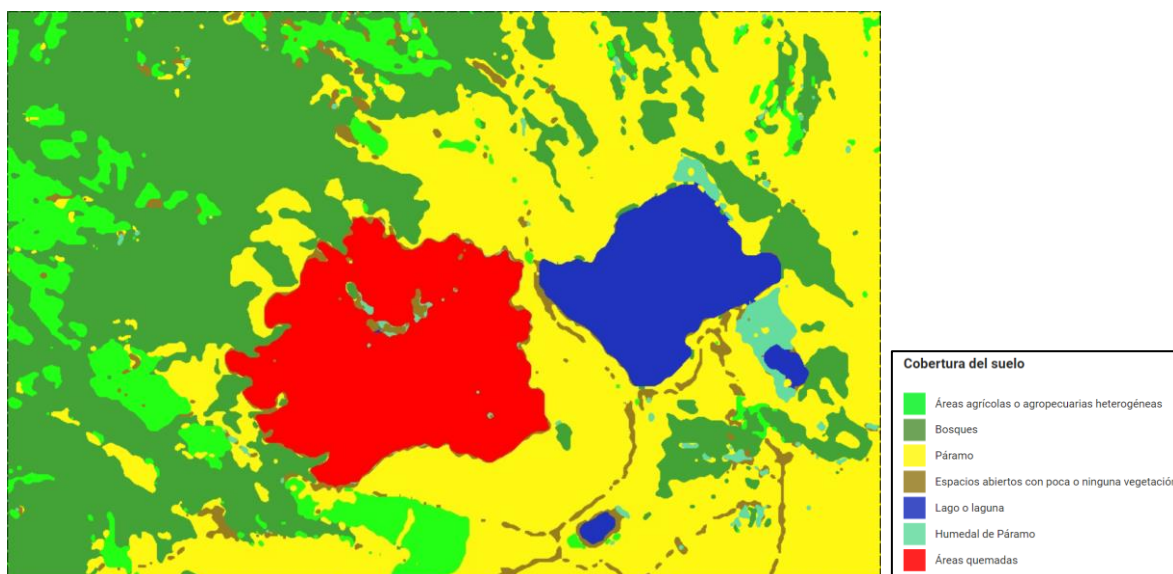
**Figura 66**

*Cobertura del suelo generada a partir de la imagen Lt8\_pre mediante clasificación supervisada en GEE (Cob 7 GEE).*



### Figura 67

Cobertura del suelo generada a partir de la imagen Lt8\_post mediante clasificación supervisada en GEE (Cob 8 GEE).



A manera general, el análisis visual no detectó errores significativos de las clasificaciones; por lo tanto, se prosigue con la detección de cambios a través de estas coberturas; sin embargo, es necesario corroborar este resultado con los estadísticos de validación.

Respecto a los estadísticos de calidad de muestras que se generan de la SC, los cuales son: tiempo de procesamiento, fiabilidad e índice kappa; se los plasma en la tabla 20.

**Tabla 20**

*Estadísticos de calidad de muestras para de las coberturas generadas mediante SC en GEE.*

Modelo	Fiabilidad o $F$ (%)	kappa o $\hat{\kappa}$	Tiempo (min)
Cob 5 GEE	99.89	0.9980	00:6.12
Cob 6 GEE	99.90	0.9980	00:5.89



<b>Modelo</b>	<b>Fiabilidad o <math>F</math> (%)</b>	<b>kappa o <math>\hat{\kappa}</math></b>	<b>Tiempo (min)</b>
Cob 7 GEE	99.09	0.9844	00:4.56
Cob 8 GEE	99.55	0.9934	00:4.03

*Nota:* La fiabilidad y el índice Kappa, se obtienen de la matriz de confusión generada a través de las áreas de entrenamiento, y sirven para aprobar o rechazar las mismas.

Todos los valores del índice Kappa (columna 3 de la tabla 20), presentan un valor superior a 0.8, por tanto, se aprueba las áreas de entrenamiento utilizadas en la clasificación supervisada dentro de GEE.

El siguiente resultado, es la tabla de abarcamiento (tabla 21), sobre la que se plasman los valores de la superficie en ha de cada cobertura clasificadas.

**Tabla 21**

*Áreas o superficies de las coberturas generadas mediante SC en GEE*

<b>Cobertura</b>	<b>Cob 5 GEE (ha)</b>	<b>Cob 6 GEE (ha)</b>	<b>Cob 7 GEE (ha)</b>	<b>Cob 8 GEE (ha)</b>
AG	502.95	645.83	513.26	499.60
BQ	1988.88	1959.87	1838.23	1852.07
PA	2606.09	1896.37	2765.40	2122.65
EA	159.68	150.09	189.08	198.25
LA	321.18	314.07	308.06	306.17
HU	63.69	60.81	49.88	78.09
AQ	0.00	615.43	0.00	607.07
<b>Total</b>	5642.47	5642.47	5663.90	5663.90

*Nota:* AG) Área agrícola o agropecuaria, BQ) Bosque, PA) Páramo, EA) Espacios abiertos, LA) Lago o laguna, HU) Humedal, AQ) Área quemada.

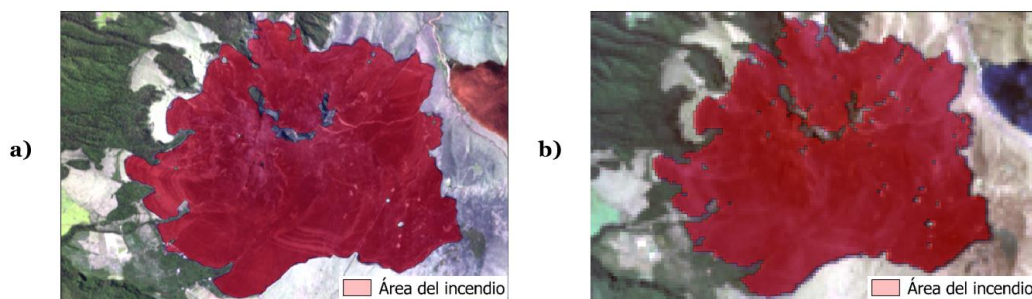
Dicha tabla, presenta anomalías en los valores calculados de las diferentes coberturas, esto puede deberse a la diferencia entre los tiempos de toma de las imágenes sujetas a clasificación; sin embargo, Cob 7 GEE y Cob 8 GEE poseen un tiempo similar de captura, con una variación de 13 días; por ende, son sujetas de análisis, obteniendo los siguientes resultados:

- Las clasificaciones más inconsistentes, son las coberturas PA, AG y BQ, cuya diferencia en ha es de 226.28, 146.23 y 107.8 ha respectivamente.
- Las clasificaciones más consistentes, son las coberturas LA y AQ, cuya diferencia en ha es de 7.9 y 8.36 respectivamente.
- El error cuadrático medio (rms) entre Cob 7 GEE y Cob 8 GEE, es de 111.46 ha.

En la figura 68, se visualiza el área afectada por el incendio forestal, que se extrae de la Cob 6 GEE y Cob 8 GEE; siendo de 615.43 ha y 607.07 ha respectivamente.

### Figura 68

Área clasificada como incendio forestal en: a) Cob 6 GEE y b) Cob 8 GEE

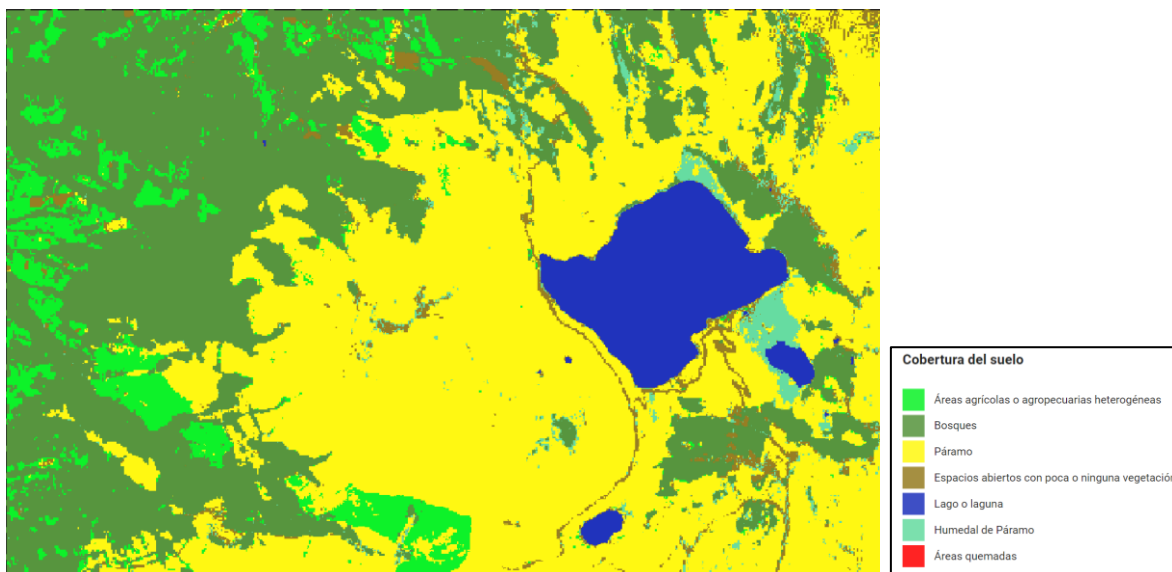


### Resultados de la SC en ENVI.

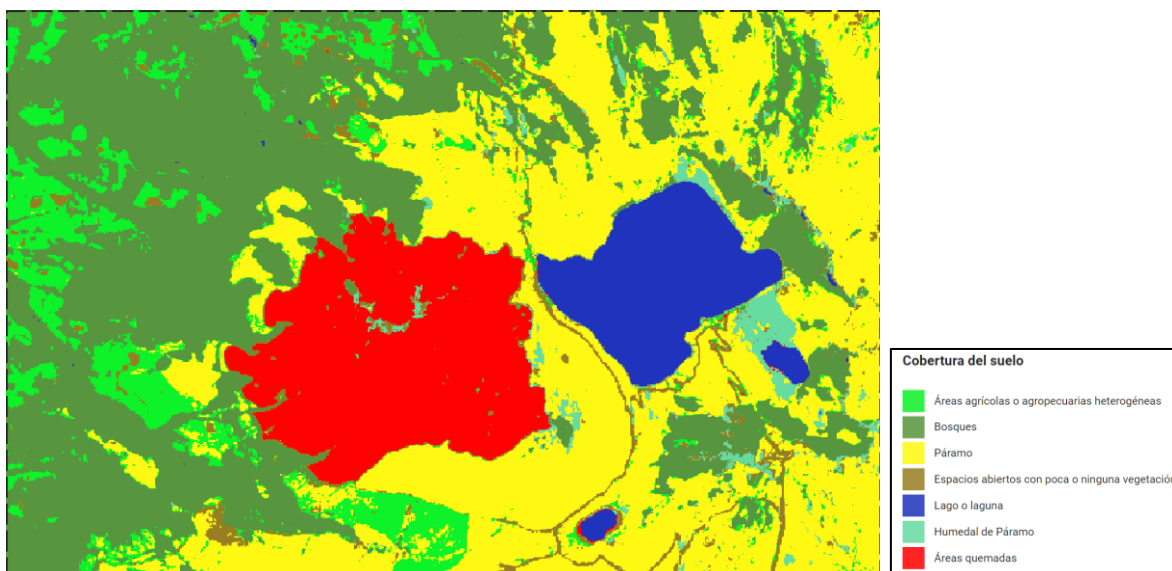
En lo que respecta a la clasificación de coberturas del suelo, generados a partir de la SC en ENVI mediante SVM, son representados en las figuras 69, 70, 71 y 72.

**Figura 69**

*Cobertura del suelo generada a partir de la imagen St2\_pre mediante clasificación supervisada en ENVI (Cob 5 ENVI).*

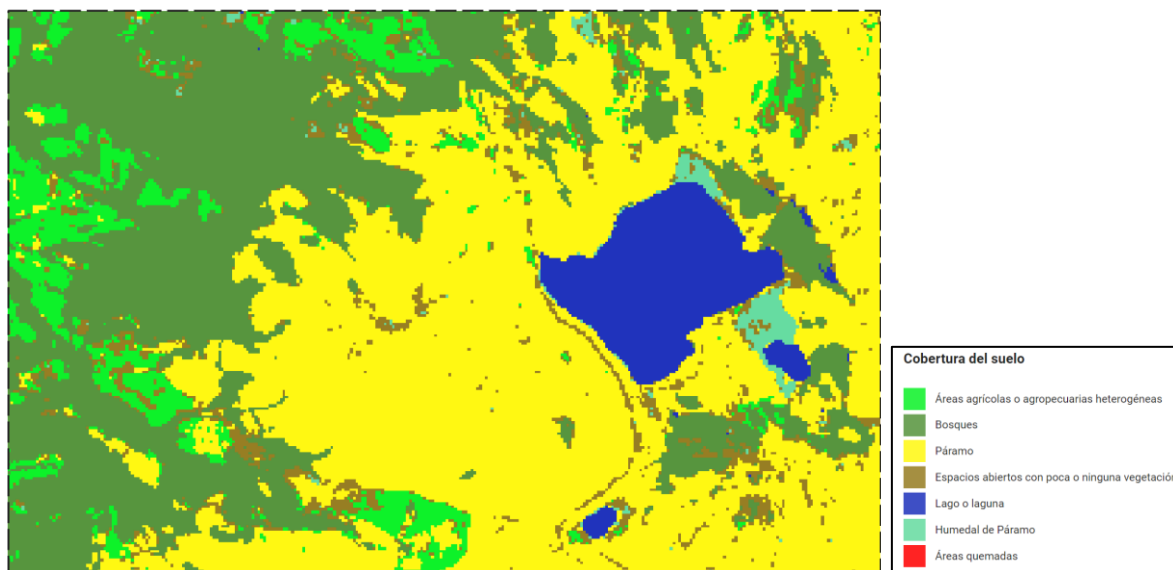
**Figura 70**

*Cobertura del suelo generada a partir de la imagen St2\_post mediante clasificación supervisada en ENVI (Mod 6 ENVI).*

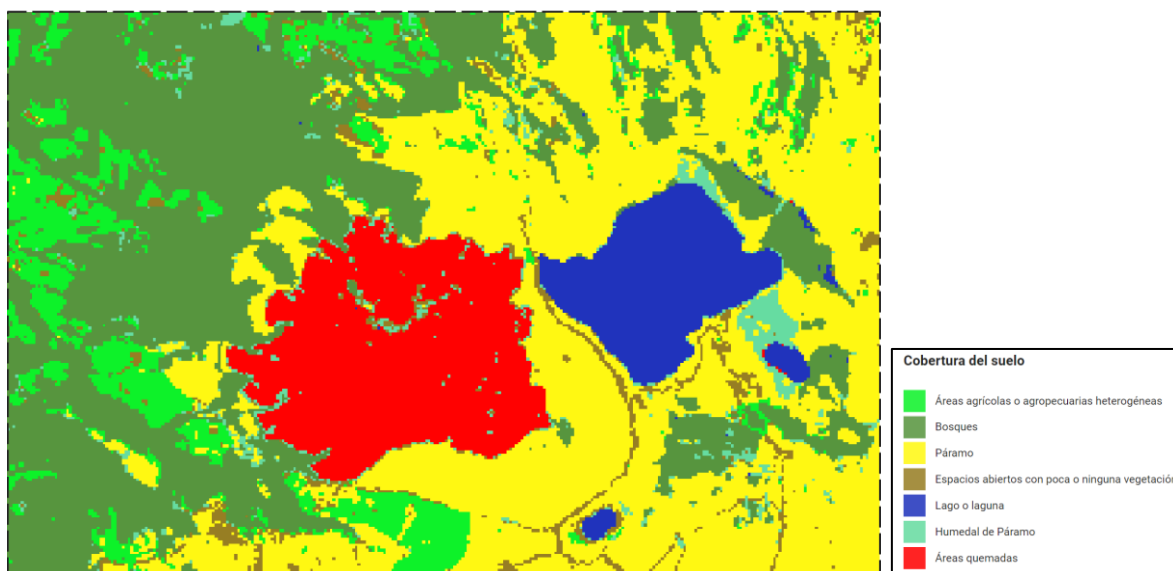


**Figura 71**

*Cobertura del suelo generada a partir de la imagen Lt8\_pre mediante clasificación supervisada en ENVI (Mod 7 ENVI).*

**Figura 72**

*Cobertura del suelo generada a partir de la imagen Lt8\_post mediante clasificación supervisada en ENVI (Mod 7 ENVI).*



Al igual que en la SC mediante GEE, no detecto errores significativos de las clasificaciones; por lo tanto, es factible la detección de cambios a través de estas coberturas; sin embargo, es necesario corroborar este resultado con los estadísticos de validación.

Por otra parte; en la tabla se 22 representan los los estadísticos de calidad de las muestras para la SC en ENVI, que nuevamente son: tiempo de procesamiento, fiabilidad e índice kappa;

**Tabla 22**

*Estadísticos de calidad de muestras para de las coberturas generadas mediante SC en ENVI.*

<b>Modelo</b>	<b>Fiabilidad o <math>F</math> (%)</b>	<b>Kappa o <math>\hat{\kappa}</math></b>	<b>Tiempo (min)</b>
Mod 5 ENVI	99.90	0.9983	04:18.59
Mod 6 ENVI	99.17	0.9880	04:12.04
Mod 7 ENVI	97.96	0.9675	00.25.21
Mod 8 ENVI	98.52	0.9794	00.25.23

*Nota:* La fiabilidad y el índice Kappa, se obtienen de la matriz de confusión generada a través de las áreas de entrenamiento, y sirven para aprobar o rechazar las mismas.

En cuanto al análisis del índice Kappa (columna 3 de la tabla 22), presentan un valor superior a 0.8, por tanto, se aprueba las áreas de entrenamiento utilizadas en la clasificación supervisada dentro de ENVI.

A partir de los ráster de cobertura, se determina la superficie de abarcamiento en ha, de cada cobertura clasificada, esta se la observa en la tabla 23

**Tabla 23**

*Área o superficies de las coberturas generadas mediante SC en ENVI*

<b>Cobertura</b>	<b>Cob 5 ENVI (ha)</b>	<b>Cob 6 ENVI (ha)</b>	<b>Cob 7 ENVI (ha)</b>	<b>Cob 8 ENVI (ha)</b>
AG	412.48	553.29	424.91	516.58
BQ	2004.47	1983.31	1873.82	1874.71
PA	2613.54	1894.23	2615.59	1980.03
EA	161.03	183.92	323.44	254.69
LA	324.48	318.43	319.74	317.50
HU	126.48	89.43	60.30	75.58
AQ	0.00	619.86	0.00	598.71
<b>Total</b>	5642.47	5642.47	5617.80	5617.80

*Nota:* AG) Área agrícola o agropecuaria, BQ) Bosque, PA) Páramo, EA) Espacios abiertos, LA) Lago o laguna, HU) Humedal, AQ) Área quemada.

El análisis entre la Cob 6 ENVI y la Cob 8 ENVI genera los siguientes resultados:

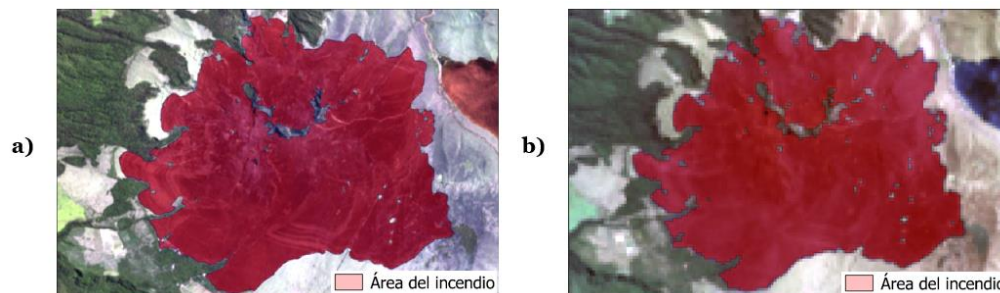
- La clasificación más inconsistente, es la cobertura PA, cuya diferencia es de 108.602 ha.
- Las clasificaciones más consistentes son las coberturas LA y HU, cuya diferencia son 0.938 y 13.849 respectivamente.
- El error cuadrático (rms) medio entre Cob 7 GEE y Cob 8 GEE, es de 61.12 ha.

El resultado del análisis de las tablas 21 y 23, arroja una diferencia en el rms de 50.33 ha, obteniendo una mejor comparación en las clasificaciones de ENVI.

A continuación, en la figura 73 se representa el área afectada en el incendio forestal, calculada de las coberturas: Cob 6 ENVI y Cob 8 ENVI; es de 619.86 ha y 598.71 ha respectivamente.

### Figura 73

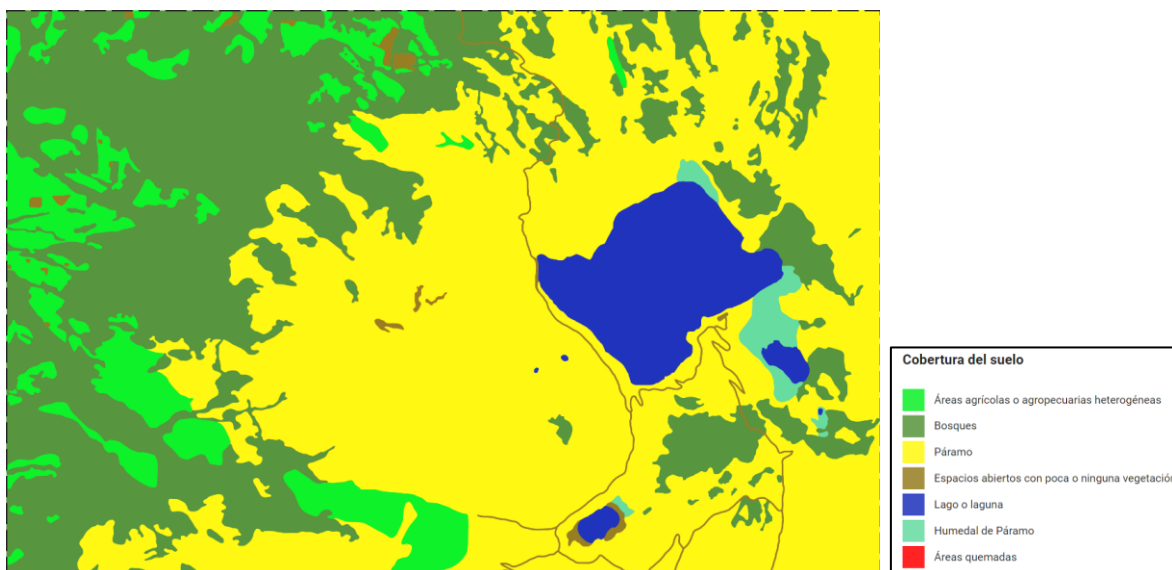
Área clasificada como incendio forestal en: a) Cob 6 ENVI y b) Cob 8 ENVI



**Resultados de la Clasificación de Imágenes por Interpretación/Digitalización.** Las clasificaciones de la cobertura generadas a partir de interpretación/digitalización, son representados en las figuras 74 y 75; la validación de estas, será mediante el índice kappa en el próximo apartado del presente proyecto.

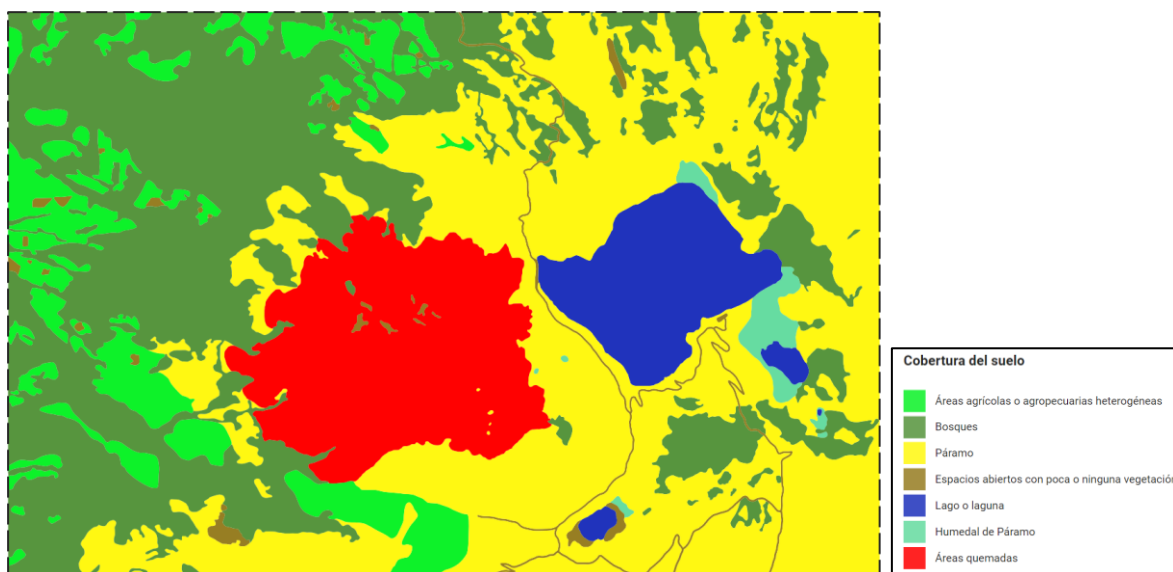
### Figura 74

Vector de cobertura pre incendio generado a partir de interpretación/digitalización (Cob 1 QGIS).



**Figura 75**

Vector de cobertura post incendio generado a partir de interpretación/digitalización (Cob 2 QGIS).



Teóricamente, la interpretación/digitalización es la mejor técnica de clasificación de imágenes, por tanto, Cob 1 QGIS y Cob2 QGIS, serán sujetas a comparación entre las otras coberturas generadas, al no observarse errores de la digitalización.

Por otro lado, se determina abarcamiento de cada cobertura, con lo cual, en la tabla 24 se representa los valores calculados del área en ha.

**Tabla 24**

*Superficies de las coberturas generadas a través de la interpretación/digitalización pre y post incendio*

Cobertura	Cob 1 QGIS (ha)	Cob 2 QGIS (ha)	Diferencia
AG	506.158	506.348	-0.19
BQ	1908.99	1903.156	5.834



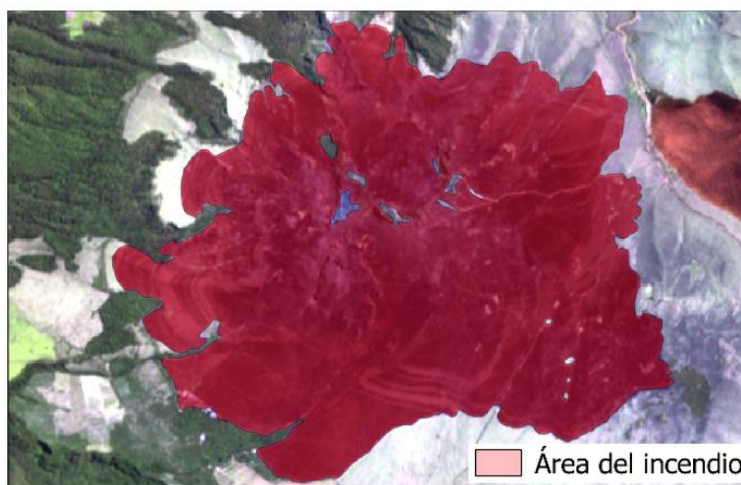
Cobertura	Cob 1 QGIS (ha)	Cob 2 QGIS (ha)	Diferencia
PA	2769.338	2129.792	639.546
EA	65.916	76.224	-10.308
LA	323.164	321.298	1.866
HU	55.238	55.922	-0.684
AQ	0	636.062	-636.062
<b>Total</b>	<b>5628.804</b>	<b>5628.802</b>	

*Nota:* AG) Área agrícola o agropecuaria, BQ) Bosque, PA) Páramo, EA) Espacios abiertos, LA) Lao o laguna, HU) Humedal, AQ) Área quemada.

En el cálculo del área de afectación generada por el incendio forestal, se obtuvo un total de 636.06 ha mediante la clasificación por interpretación/digitalización; el resultado obtenido, visualizado sobre la imagen St2\_post, se observa en la figura 76.

### Figura 76

*Área clasificada como incendio forestal, por vía de la interpretación digitalización.*



**Resultados Estadísticos y Validación de las Clasificaciones.** En base al índice kappa, se descartan o aprueban la clasificación de cobertura generados según las diferentes técnicas de clasificación de imágenes y los diferentes programas.

Por tanto, en la tabla 25 se plasma el resultado de validación; si se desea conocer el valor de los puntos de muestreo y la matriz de confusión, se las puede acceder en el Anexo 3 “*Matrices de confusión y estadísticos de validación*”.

**Tabla 25**

*Estadísticos y validación de los modelos de cobertura del suelo.*

<b>Cobertura</b>	<b>F (%)</b>	<b><math>\hat{r}</math></b>	<b>Evaluación</b>	<b>Aprobación</b>
Cob 1 GEE	73.08	0.605	Muy buena	Rechazado
Cob 2 GEE	78.85	0.705	Muy buena	Rechazado
Cob 3 GEE	65.38	0.496	Buena	Rechazado
Cob 4 GEE	69.23	0.583	Buena	Rechazado
Cob 5 GEE	92.31	0.892	Excelente	Aprobado
Cob 6 GEE	86.54	0.822	Excelente	Aprobado
Cob 7 GEE	78.85	0.7	Muy buena	Aprobado
Cob 8 GEE	78.85	0.721	Muy buena	Rechazado
Cob 1 ENVI	73.08	0.591	Buena	Rechazado
Cob 2 ENVI	75	0.658	Muy buena	Rechazado
Cob 3 ENVI	67.31	0.545	Buena	Rechazado
Cob 4 ENVI	63.46	0.492	Buena	Rechazado
Cob 5 ENVI	92.31	0.892	Excelente	Aprobado
Cob 6 ENVI	86.54	0.824	Excelente	Aprobado
Cob 7 ENVI	75	0.646	Muy buena	Rechazado
Cob 8 ENVI	80.77	0.748	Muy buena	Aprobado
Cob 1 QGIS	98.08	0.973	Excelente	Aprobado
Cob 2 QGIS	98.08	0.975	Excelente	Aprobado

*Nota:* Para la detención de cambios se han aprobado dos pares de modelos generados mediante SC y el par obtenido de la interpretación/digitalización; la Cob 7 GEE y la Cob 8 ENVI, fueron aprobadas a fin de generar zonas de cambio a partir de clasificaciones de cobertura producidas en diferentes programas.

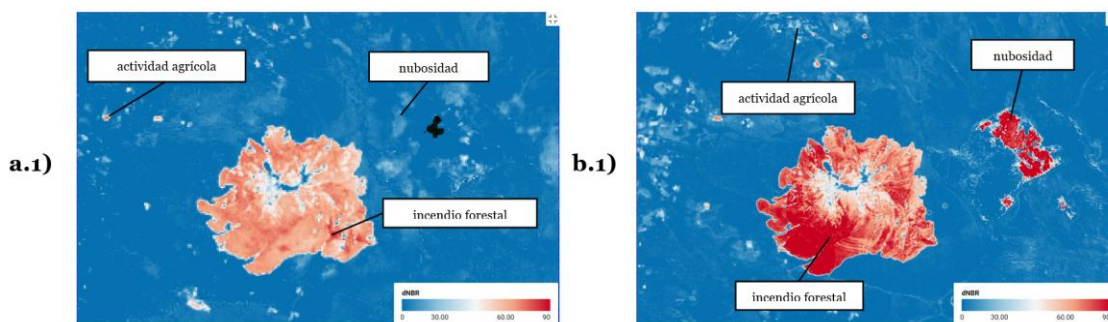
**Resultados de la Detección de Cambios Basada en Álgebra de Mapas (DCBAM).** La DCBAM, únicamente genera el área afectada o de cambio, por lo cual, la información resultante del presente apartado, no cuentan con el tipo de cobertura; únicamente, determina la superficie de cambio en ha, producto del incendio forestal o actividad agrícola.

**Resultados de la DCBAM Generados en GEE.** Al aplicar C<sup>2</sup>VA (Análisis de vector de cambio comprimido) dentro de GEE, los primeros resultados que se obtienen son las siguientes imágenes de información: imágenes de diferencia, imágenes módulo, e imágenes de dirección.

La figura 77, representa en pseudocolor escalado desde 0 – 90, las imágenes de diferencia en la banda del NBR, es decir, el índice de calcinación normalizado diferenciado (dNBR); a su vez, se observa que el incendio posee valores del dNBR superior a 50.

### Figura 77

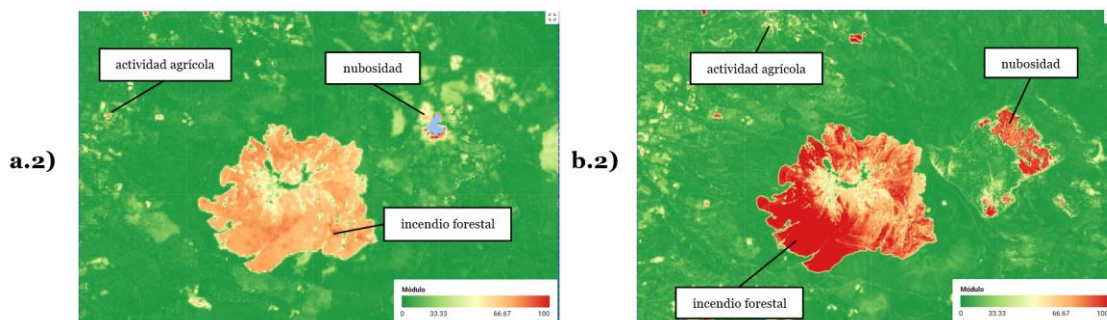
*Representación visual de la imagen de diferencia en: a) Landsat 8 y b) Sentinel 2.*



En otro resultado, la figura 78 representa visualmente y en pseudocolor escalado desde 0 – 100, las imágenes módulo, sobre las cuales, posteriormente se extraerá el  $T_{\rho}$  y el  $\rho_{max}$  (ver ecuación 22 del capítulo II). Visualmente, se observa que el incendio forestal posee valores superiores a 40.

## Figura 78

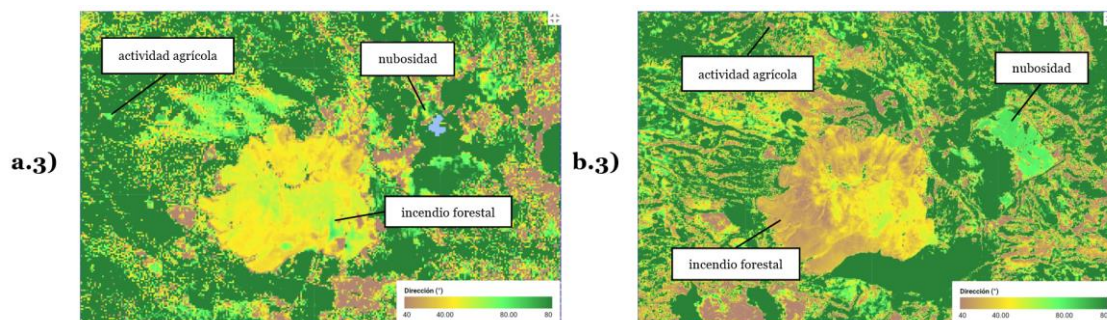
Representación visual de la imagen módulo en: a) Landsat 8 y b) Sentinel 2.



Por otra parte, la figura 79 representa visualmente y en pseudocolor escalado desde  $40^\circ$  -  $100^\circ$ , las imágenes del ángulo de dirección del vector de cambio; sobre las mismas, se extraen los valores del  $T_{\alpha,k}$  y el  $T_{\alpha,k+1}$  (ver ecuación 22 del capítulo II). Visualmente, se observa que el incendio forestal varía de los  $40^\circ$  a los  $80^\circ$ .

## Figura 79

Representación visual de la imagen dirección en: a) Landsat 8 y b) Sentinel 2.



En las imágenes de las figuras 77, 78 y 79, se observaron mediante análisis visual cambios producto de: incendio forestal, actividad agrícola y aumento o disminución de área nubosa. Posteriormente, en las tablas 26 y 27, se aprecia el resultado de los umbrales de detección ( $Sk$ ), con los cuales se determinan las imágenes de cambio.

**Tabla 26**

*Resultados de la C2VA para la plataforma Sentinel 2.*

$Sk$	Descripción	$T_{\rho}$	$\rho_{max}$	$T_{\alpha,k}$	$T_{\alpha,k+1}$	Área [ha]
0	Sin cambio	0	10	0	180	4771.82
1	Incendio forestal	27	131	38	110	631.34
2	Actividad agrícola	10	150	50	117	232.62

*Nota:* Previo a la determinación del área afectada, los  $Sk$  fueron depurados en el software QGIS.

**Tabla 27**

*Resultados de la C<sup>2</sup>VA para la plataforma Landsat 8.*

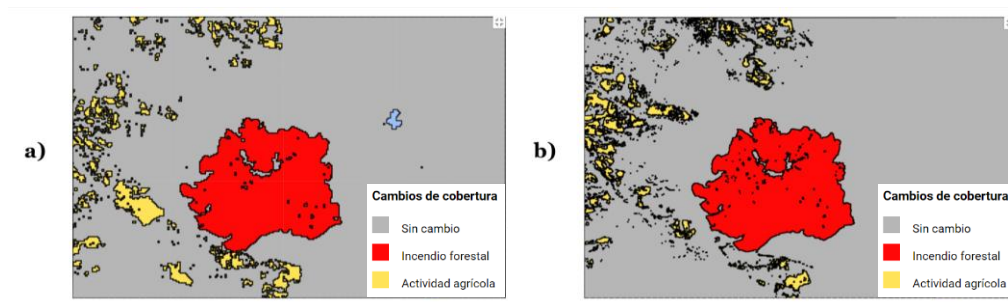
$Sk$	Descripción	$T_{\rho}$	$\rho_{max}$	$T_{\alpha,k}$	$T_{\alpha,k+1}$	Área [ha]
0	Sin cambio	0	8	0	180	4759.43
1	Incendio forestal	27	110	30	70	620.10
2	Actividad agrícola	8	150	49	110	248.05

*Nota:* Previo a la determinación del área afectada, los  $Sk$  fueron depurados en el software QGIS.

Finalmente, se extrae la imagen de las zonas de cambio, sobre la cual, se determina el o las áreas afectadas; en otras palabras, el área cambio de cobertura producto del incendio forestal (ver figura 80); con lo cual, se determinó un total de 631.34 ha si se trabaja con las imágenes Sentinel 2; o 620.10 ha si se trabaja con Landsat 8, consumidas por las llamas.

**Figura 80**

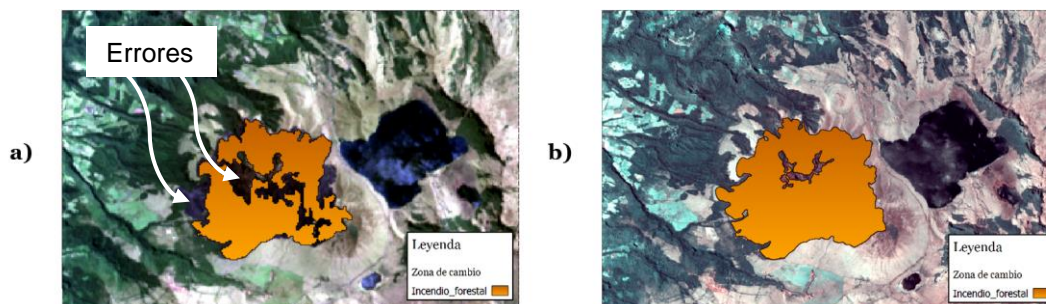
Imagen de cambio de cobertura mediante el método  $C^2VA$  generado en GEE para las plataformas satelitales: a) Landsat 8 y b) Sentinel 2.



**Resultados de la DCBAM generados en ENVI.** En cuanto a los cambios obtenidos a partir de las herramientas automáticas del software ENVI, se determinó que la superficie de afectación por el incendio forestal, representado en la figura 81; es de 612.172 ha si se trabaja con las imágenes Lt8\_pre y Lt8\_post; o 686.604 ha trabajando con las imágenes St2\_pre y St2\_post.

**Figura 81**

Cambio de cobertura mediante "Image change workflow" generado en ENVI para las plataformas satelitales: a) Landsat 8 y b) Sentinel 2.



Sin embargo, el análisis visual de solapamiento, determina una incorrecta clasificación de la zona modificada por el incendio forestal, en la detección de cambios a través de la

plataforma Landsat 8 (imagen a de la figura 81); debido a ello, este resultado es descartado en futuros análisis, lo contrario al generado de la plataforma Sentinel 2.

### Resultados Estadísticos de Validación

En cuanto a los estadísticos de validación, en la tabla 28, se plasma el cálculo del área de afectación del incendio forestal, determinada a través de: 1) Fuentes oficiales, 2) Clasificación supervisada (SC), 3) Clasificación mediante interpretación/digitalización y 3) Detección de cambios basada en álgebra de mapas (DCBAM), de las imágenes que fueron aprobadas en apartados anteriores.

**Tabla 28:**

*Superficie afectada por el incendio forestal, obtenida de diferentes fuentes y metodologías.*

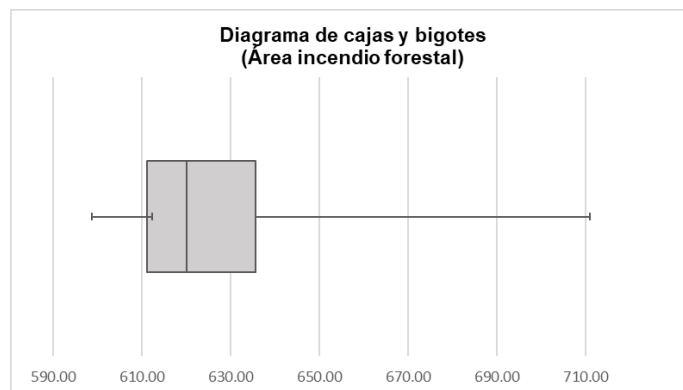
	<b>Oficial 1 (SNGRE, 2020a)</b>	<b>Oficial 2 (SNGRE, 2020b)</b>	<b>SC St2_post GEE</b>	<b>SC Lt8_post GEE</b>	<b>SC St2_post ENVI</b>
incendio (ha)	573	635	615.43	607.07	619.861
	<b>SC Lt8_post ENVI</b>	<b>Interpretación/ Digitalización</b>	<b>DCBAM St2_GEE</b>	<b>DCBAM Lt8_GEE</b>	<b>DCBAM St2_ENVI</b>
incendio (ha)	598.71	636.06	631.34	620.1	686.6

Los datos de la tabla 28, muestran que el valor de la fuente oficial 2, es el que mejor se encuentra calculado debido a la proximidad de los datos obtenidos por el investigador, por lo tanto, es descartado el valor de la fuente oficial 1.

Posteriormente, se determina el diagrama de cajas y bigotes (figura 82), con el cual, se descarta o aprueba el área de afectación. En este, se observa una anomalía de dispersión de resultados hacia el lado derecho, en consecuencia, se descarta valores de áreas calculadas superiores a 640 ha; es decir, el área generada mediante la DCBAM St2\_ENVI.

## Figura 82

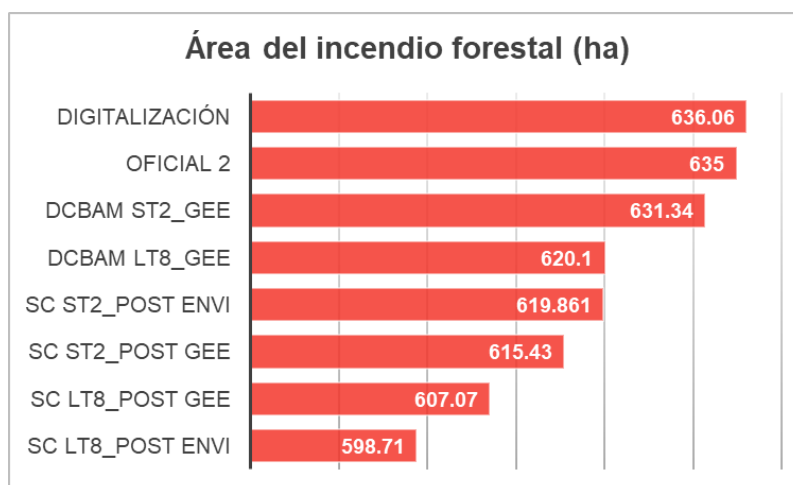
*Diagrama de cajas y bigotes para la validación de resultados*



En adición, en la figura 83, se representa mediante diagrama de barras, la variación del cálculo del área de afectación, acorde a las diferentes metodologías aprobadas de la detección de cambios.

## Figura 83

*Gráfico de barras donde se representa la dispersión del cálculo del área quemada.*



Con la información validada, se construyen los estadísticos de: valor mínimo, valor máximo, promedio, desviación estándar, cuartiles y mediana; representados en la tabla 29.



Tabla 29

*Estadísticos de validación*

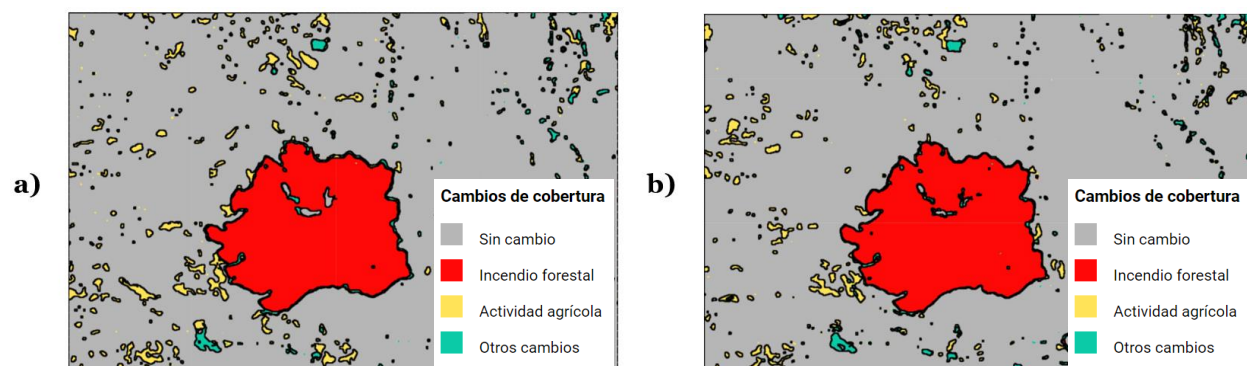
Estadístico	Valor	Estadístico	Valor
Min	598.71	Q1	609.16
Max	636.06	Q2 (mediana)	619.98
Promedio	620.45	Q3	634.09
Desviación	12.51		

**Resultados de la Generación de Imágenes de Cambios**

En lo que respecta a la generación de imágenes de cambio, se obtienen de resultados las figuras 84 y 85 mediante las cuales, posteriormente se determinan los mapas de cambio presentes en su verdadera escala en el Anexo 4: “Mapas de cambio de cobertura”.

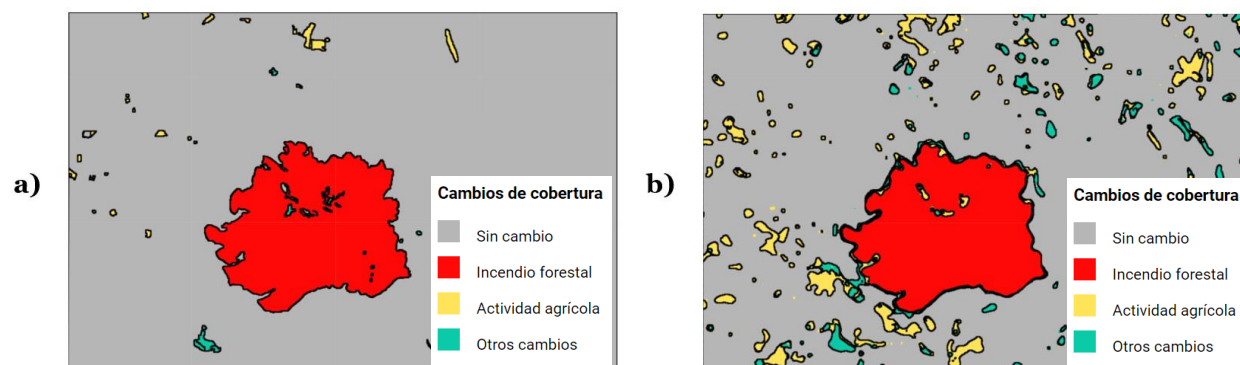
**Figura 84**

*Imagen de cambio, generara a partir de la comparación entre: a) Cob 5 GEE vs Cob 6 GEE y b) Cob 5 ENVI vs Cob 6 ENVI.*



## Figura 85

Imagen de cambio, generada a partir de la comparación entre: a) Cob 1 QGIS vs Cob 2 QGIS y b) Cob 7 GEE vs Cob 8 ENVI.



A manera general, de las imágenes de cambio, se observa que el incendio forestal o área quemada, es la cobertura que mayor cambio produce en el área de estudio, llegando a cubrir, un aproximado del 11% de la misma; en adición, se determinó que la cobertura más afectada es el Páramo; el cual y acorde la Cob 2 QGIS, abarco un 99.45% del incendio.

### Resultados de la Creación del Geovisor

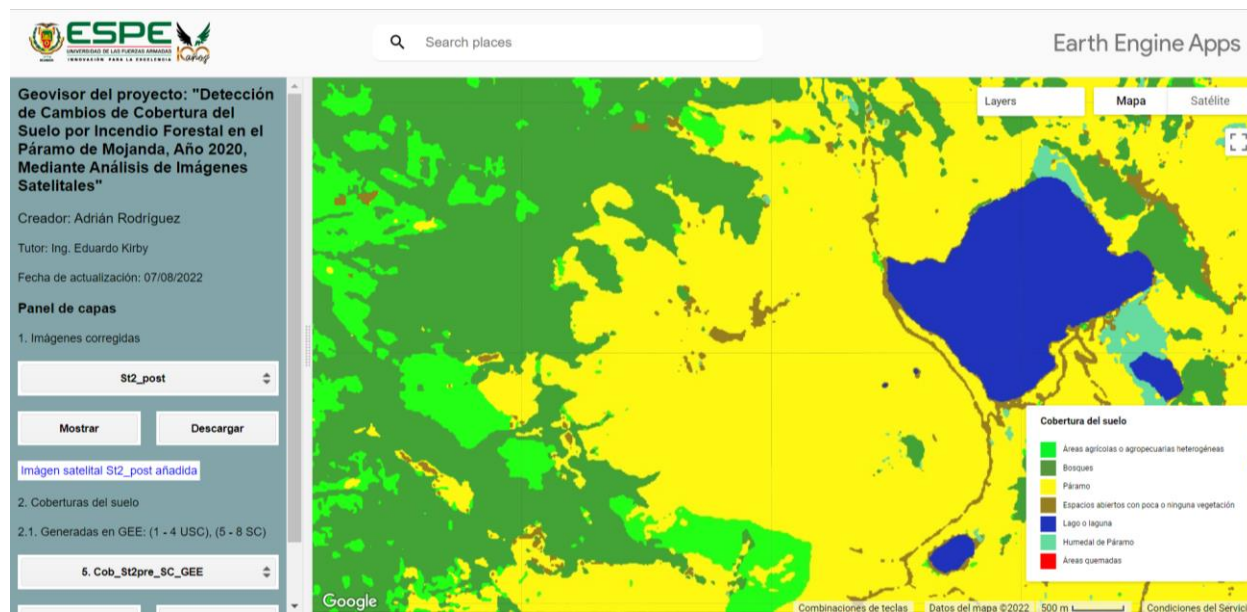
Como resultado final del presente proyecto, la información georreferenciada de: imágenes base corregidas, clasificación de coberturas, tanto las generadas en GEE, como en ENVI; y las zonas de cambio, generadas mediante DCBAM o DCBCI; son plasmados en un geovisor web (ver figura 86), accesible a cualquier usuario, mediante el enlace:

[aerodriguezm/Geovisor\\_tesis\\_RA](https://aerodriguezm/Geovisor_tesis_RA); vinculado al siguiente URL:

<https://aerodriguezm.users.earthengine.app/view/geovisortesisrodriguezadrian>.

## Figura 86

*Geovisor creado para la representación visual en nube de los resultados.*



En adición al geovisor, en figura 87 se plasma el acceso al este, a través de un código QR, con lo cual, cualquier persona que posea un teléfono o tableta inteligente con acceso a internet, podrá observar la información, desde su dispositivo móvil.

## Figura 87

*Código QR para el acceso al geovisor web*



## Capítulo IV: Conclusiones y Recomendaciones

En el presente capítulo, se redactan las siguientes conclusiones y recomendaciones:

### Conclusiones

En base al estudio desarrollado, se concluye que, se han cumplido con los objetivos y metas planteadas; a su vez, se plasma una metodología que puede ser utilizada como sistema de aprendizaje en el análisis de imágenes satelitales por medio de la plataforma de procesamiento en la nube (internet) llamada Google Earth Engine (GEE).

A través de GEE y del software ENVI, se han podido procesar, identificar y calcular diferencias de cobertura y afectaciones en las mismas, a partir de análisis geoespaciales como: índices espectrales, clasificaciones de imágenes y análisis de detección de cambios; concluyendo, preliminarmente, que la afectación de incendio forestal en el Páramo de Mojanda del año 2020 para escala 1:100 000 es de aproximadamente  $620.45 \pm 7.27$  ha con un 90% de confianza; lo que demuestra que este cálculo se acerca a las 635 ha determinadas por la Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE); aun así, no es una conclusión definitiva ni con mayor nivel de confianza debido al uso de imágenes satelitales de baja resolución espacial.

Mediante las evaluaciones de control de calidad como: fiabilidad e índice kappa promedio, de las clasificaciones de imágenes satelitales aplicando las metodologías no supervisada (USC) y supervisada (SC), las cuales son de 77.89% y 69% en GEE; y, 76.68% y 67% en ENVI respectivamente, se concluye que no existe una variación significativa entre las coberturas generadas en dichos programas; por otro lado, se evidencio en cuanto al tiempo de procesamiento, 15 min en ENVI y 28.63 seg en GEE, que este último es mucho más rápido; de igual forma, si se considera el valor monetario del software, GEE no tiene costo por licencia, lo que demuestra otra ventaja en su uso; sin embargo, como desventajas preliminares se tiene

que se necesitan de: conocimientos medio/altos de programación JavaScript o Python, pago por servicios de internet y búsqueda o desarrollo de algoritmos para procesamientos en imágenes de alta resolución; además, todo lo generado en la plataforma, es montado en los servidores de Google, por lo cual, si se pierde la cuenta de correo electrónico @gmail, no podrá acceder a la información.

Finalmente, se concluye que, en cuanto a presentar y visualizar análisis digital de imágenes, GEE es una plataforma excelente en demostrar lo dicho mediante un geovisor, el cual, es interoperable desde internet por medio de una URL o un código QR a distintos usuarios en todas las partes del mundo con acceso a la nube; permitiendo en este proyecto, visualizar y descargar los diferentes resultados obtenidos como: (1) Imágenes satelitales pre evento y post evento corregidas radiométricamente y geométricamente; (2) El índice de calcinación normalizado o NBR; (3) La clasificación de coberturas generadas mediante SC, USC e interpretación/digitalización a través de diferentes programas; y, (4) Las imágenes de cambio generadas en la detección de cambios basada en álgebra de mapas (DCBAM) o la detección de cambios basada en la clasificación de imágenes (DCBCI)

### **Recomendaciones**

Se recomienda el uso de la metodología desarrollada y el manual de usuario, para llevar a cabo los procesos de análisis digital de imágenes satelitales de libre descarga, generadas mediante las constelaciones: Landsat y Sentinel, dentro de GEE; a su vez, se propone trabajar sobre extensiones del territorio a escala Cantonal, Provincial o Nacional, esto con el objetivo de comprobar el poder computacional de los servidores de Google.

Con la finalidad de mejorar la calidad del resultado del área afectada por el incendio forestal y el nivel de confianza, se recomienda el uso de técnicas geoespaciales de mayor precisión, principalmente, las generadas a partir de fotogrametría o sobre imágenes satelitales

de mayor resolución espacial; mediante este resultado, se podrá corroborar cual es la mejor técnica de detección de cambios y el error que genera al aplicar la misma.

Se recomienda el aprendizaje de un lenguaje de programación, especialmente JavaScript o Python, o todos los profesionales o aficionados del campo de la teledetección satelital y los sistemas de información geográfica, esto con el objetivo de desarrollar aplicaciones geoespaciales y automatizar procesos repetitivos como: búsqueda y descarga de datos, cálculo de índices espectrales, estimaciones estadísticas sobre un área determinada, entre otros.

A finalizar, se recomienda el desarrollo de geovisores a través de la interfaz de administración de Apps en GEE, para proyectos a escala local, regional o global; ya que esta, es una alternativa válida, viable y de bajo costo, al de creación de geoportales; en adición a lo mencionado, un geovisor que trabaja a través de la interfaz de programación en GEE, a pesar de no contar con la estandarización necesaria de una infraestructura de datos espaciales (IDE), es factible de programación hacia el cumplimiento de los siguientes objetivos: compartir información a través de internet, visualizar los resultados cartográficos y descargar la información geoespacial solicitada.

## Bibliografía

- Aingla, K. A., & Gavilanez, J. E. (2022). *Detección de cambios y modelación de la ocupación del suelo mediante Autómatas Celulares como herramientas de apoyo a la conservación ambiental del área de protección del Cerro Atacazo (Zona Este)* [Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE]. <https://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/29068>
- Ambrosio, G., González, J., & Arévalo, V. (2002). Corrección radiométrica y geométrica de imágenes para la detección de cambios en una serie temporal. *Málaga, España*.
- Arango Gutiérrez, M., Branch Bedoya, J. W., & Botero Fernández, V. (2005). Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos: "Landsat-ETM+". *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 58(1), 2611–2634.
- Ariza, A. (Instituto G. A. C. (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8* (p. 44).
- Ariza López, F. J., García Balboa, J. L., Robledo Ceballos, J., Rodríguez, J., & Casanova, R. (2020). Propuesta de una guía para la evaluación de la exactitud posicional de datos espaciales. *Revista Cartográfica*, 100, 61–79. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i100.647>
- Asokan, A., & Anitha, J. (2019). Change detection techniques for remote sensing applications: a survey. *Earth Science Informatics*, 12(2), 143–160. <https://doi.org/10.1007/s12145-019-00380-5>
- Bautista, F., Palacio, J. L., & Delfín, H. (2011). *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Blaschke, T., & Hay, G. J. (2001). Object-oriented image analysis and scale-space: theory and methods for modeling and evaluating multiscale landscape structure. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 34(4), 22–29.
- Boca, T., & Rodríguez, G. (2012). Métodos estadísticos de la evaluación de la exactitud de productos derivados de sensores remotos. *Instituto de Clima y Agua, INTA Castelar*.
- Bock, H.-H. (2007). Clustering Methods: A History of k-Means Algorithms. In *Selected contributions in data analysis and classification* (pp. 161–172). Springer.

[https://doi.org/10.1007/978-3-540-73560-1\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-540-73560-1_15)

- Bovolo, F., & Bruzzone, L. (2006). A theoretical framework for unsupervised change detection based on change vector analysis in the polar domain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(1), 218–236.
- Bovolo, F., & Bruzzone, L. (2011). An adaptive thresholding approach to multiple-change detection in multispectral images. *2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 233–236.
- Bovolo, F., Marchesi, S., & Bruzzone, L. (2011). A framework for automatic and unsupervised detection of multiple changes in multitemporal images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(6), 2196–2212.
- Bow, S.-T. (2002). *Pattern Recognition and Image Preprocessing* (S. T. Bow (ed.)). CRC Press.  
<https://doi.org/10.1201/9780203903896>
- Brizuela, A., Aguirre, C., & Velasco, I. (2007). Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal. *TELEDETECCIÓN-Hacia Un Mejor Entendimiento de La Dinámica Global y Regional*, 207–214.
- Bruzzone, L., & Bovolo, F. (2012). A novel framework for the design of change-detection systems for very-high-resolution remote sensing images. *Proceedings of the IEEE*.
- Bruzzone, L., & Serpico, S. B. (1997). An iterative technique for the detection of land-cover transitions in multitemporal remote-sensing images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(4), 858–867. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/602528>
- Büttner, G. (2014). *CORINE Land Cover and Land Cover Change Products* (pp. 55–74).  
[https://doi.org/10.1007/978-94-007-7969-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7969-3_5)
- Calle, L. M., & Jiménez, P. F. C. (2021). Arquitectura tecnológica de un visor cartográfico para la gestión de riesgos. *Polo Del Conocimiento: Revista Científico-Profesional*, 6(11), 224–247.
- Castro, O. M. (2019). La evaluación de la exactitud posicional de la información geográfica



según los estándares en uso. *Revista Cartográfica*, 90, 81–96.

<https://doi.org/10.35424/rcarto.i90.478>

- Ceccato, P., Flasse, S., & Grégoire, J. M. (2002). Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1: Theoretical approach. *Remote Sensing of Environment*, 82(2–3), 188–197. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00037-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00037-8)
- Chang, K. (2016). International Encyclopedia of Geography. In D. Richardson, N. Castree, M. F. Goodchild, A. Kobayashi, W. Liu, & R. A. Marston (Eds.), *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology: People, the Earth, Environment and Technology*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118786352>
- Chen, J., Gong, P., He, C., Pu, R., & Shi, P. (2003). Land-Use/Land-Cover Change Detection Using Improved Change-Vector Analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(4), 369–379. <https://doi.org/10.14358/PERS.69.4.369>
- Chen, Y. Q., & Lee, Y. C. (2012). *Geographical data acquisition*. Springer Science & Business Media.
- Chuvieco, E. (1991). Fundamentos de teledetección espacial. *Estudios Geográficos*, 52(203), 371.
- Chuvieco Salinero, E. (2008). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio*.
- Crimmins, M. A. (2006). Synoptic climatology of extreme fire-weather conditions across the southwest United States. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 26(8), 1001–1016.
- Dávila, A., & TEMÁTICOS, G. E. (2016). *La cartografía temática*. Recuperado de.
- Delcourt, C. J. F., Combee, A., Izbicki, B., Mack, M. C., Maximov, T., Petrov, R., Rogers, B. M., Scholten, R. C., Shestakova, T. A., van Wees, D., & Veraverbeke, S. (2021). Evaluating the Differenced Normalized Burn Ratio for Assessing Fire Severity Using Sentinel-2

- Imagery in Northeast Siberian Larch Forests. In *Remote Sensing* (Vol. 13, Issue 12).  
<https://doi.org/10.3390/rs13122311>
- Díaz-Granados Ortiz, M. A., Navarrete González, J. D., & Suárez López, T. (2005). Páramos: Hidrosistemas Sensibles. *Revista de Ingeniería*, 22, 64–75.  
<https://doi.org/10.16924/revinge.22.8>
- Domínguez Palacios, D., & Gómez Jaramillo, H. D. (2016). *Implementación de un geovisor de mapas para la visualización e identificación de amenaza por movimiento de masa e inundación, prueba piloto del barrio trece de noviembre en el municipio de Medellín*.  
<https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/2632>
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., & Martimort, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36.
- Du, P., Liu, S., Bruzzone, L., & Bovolo, F. (2012). Target-driven change detection based on data transformation and similarity measures. *2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2016–2019.  
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6350981/keywords#keywords>
- Eastman, J. R. (2004). IDRISI Kilimanjaro, guía para SIG y procesamiento de imágenes. *Labs Clark University*.
- EROS, E. R. O. and S. (2020, March 4). *Landsat 8-9 Operational Land Imager and Thermal Infrared Sensor Collection 2 Level-1 Data | U.S. Geological Survey*.  
<https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-8-9-operational-land-imager-and>
- ESA, E. S. A. (2015). Sentinel-2 User Handbook. *ESA Standard Document*, 64.
- Fajardo Reina, L. (2018). *Firmas Espectrales*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23337.52326>
- Feranec, J., Hazeu, G., Kosztra, B., & Arnold, S. (2016). CORINE land cover nomenclature. *European Landscape Dynamics: CORINE Land Cover Data; Feranec, J., Soukup, T.,*

Hazeu, G., Jaffrain, G., Eds, 17–25.

Ferraris, V., Dobigeon, N., Wei, Q., & Chabert, M. (2018). Detecting Changes Between Optical Images of Different Spatial and Spectral Resolutions: A Fusion-Based Approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(3), 1566–1578.

<https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2765348>

Flannigan, M. D., Krawchuk, M. A., de Groot, W. J., Wotton, B. M., & Gowman, L. M. (2009). Implications of changing climate for global wildland fire. *International Journal of Wildland Fire*, 18(5), 483–507.

Foody, G. M., & Boyd, D. S. (1999). Detection of partial land cover change associated with the migration of inter-class transitional zones. *International Journal of Remote Sensing*, 20(14), 2723–2740. <https://doi.org/10.1080/014311699211769>

García, A. J. S. (2018). *Planificación forestal y gestión territorial, mediante herramientas open source e imágenes de satélites*. Universidad de Córdoba.

García, A., Martínez, G., Nuñez, E., & Guzmán, A. (1998). Clasificación supervisada, inducción de arboles de decisión, algoritmo kd. *Proc. Simp. Int. de Comp. CIC*, 98, 602–614.

Garcia, P. (2021, August 11). ¿Qué es un SIG, GIS o Sistema de Información Geográfica? - *Geoinnova*. [https://geoinnova.org/blog-territorio/que-es-un-sig-gis-o-sistema-de-informacion-geografica/?gclid=CjwKCAjw8sCRBhA6EiwA6\\_IF4ati4gcsPSXrR90dJ0Ka0xY\\_difl\\_r37G\\_R8uOeVgZNtrLpP2zx\\_xRoCiesQAvD\\_BwE](https://geoinnova.org/blog-territorio/que-es-un-sig-gis-o-sistema-de-informacion-geografica/?gclid=CjwKCAjw8sCRBhA6EiwA6_IF4ati4gcsPSXrR90dJ0Ka0xY_difl_r37G_R8uOeVgZNtrLpP2zx_xRoCiesQAvD_BwE)

Ghosh, A., Mishra, N. S., & Ghosh, S. (2011). Fuzzy clustering algorithms for unsupervised change detection in remote sensing images. *Information Sciences*, 181(4), 699–715.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0020025510005153>

Gibson, R., Danaher, T., Hehir, W., & Collins, L. (2020). A remote sensing approach to mapping fire severity in south-eastern Australia using sentinel 2 and random forest. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111702. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2020.111702>

- Google Developers, G. (2021a, May 27). *Image Overview*. Google Earth Engine API. [https://developers.google.com/earth-engine/guides/image\\_overview](https://developers.google.com/earth-engine/guides/image_overview)
- Google Developers, G. (2021b, October 18). *Earth Engine Code Editor*. Google Earth Engine API. <https://developers.google.com/earth-engine/guides/playground?hl=en>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Hantson, S., Pueyo, S., & Chuvieco, E. (2015). Global fire size distribution is driven by human impact and climate. *Global Ecology and Biogeography*, 24(1), 77–86.
- Hart, P. E., Stork, D. G., & Duda, R. O. (2000). *Pattern classification*. Wiley Hoboken.
- Hawbaker, T. J., Vanderhoof, M. K., Schmidt, G. L., Beal, Y.-J., Picotte, J. J., Takacs, J. D., Falgout, J. T., & Dwyer, J. L. (2020). The Landsat Burned Area algorithm and products for the conterminous United States. *Remote Sensing of Environment*, 244, 111801. <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/9/2075/htm>
- IGN, I. G. N. E. (2014). *Teoría de la Ocupación del Suelo*.
- Immitzer, M., Vuolo, F., & Atzberger, C. (2016). First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in central Europe. *Remote Sensing*, 8(3), 166.
- Jakubauskas, M. E., Lulla, K. P., & Mausel, P. W. (1990). Assessment of vegetation change in a fire-altered forest landscape. *PE&RS, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 56(3), 371–377.
- Ke, L., Lin, Y., Zeng, Z., Zhang, L., & Meng, L. (2018). Adaptive Change Detection With Significance Test. *IEEE Access*, 6, 27442–27450. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2807380>
- Kennedy, R. E., Townsend, P. A., Gross, J. E., Cohen, W. B., Bolstad, P., Wang, Y. Q., & Adams, P. (2009). Remote sensing change detection tools for natural resource managers: Understanding concepts and tradeoffs in the design of landscape monitoring projects.

*Remote Sensing of Environment*, 113(7), 1382–1396.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.07.018>

Key, C. H., & Benson, N. C. (2005). Landscape assessment: remote sensing of severity, the normalized burn ratio and ground measure of severity, the composite burn index.

*FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System Ogden, Utah: USDA Forest Service, Rocky Mountain Res. Station.*

Kolden, C. A., Lutz, J. A., Key, C. H., Kane, J. T., & van Wagtenonk, J. W. (2012). Mapped versus actual burned area within wildfire perimeters: characterizing the unburned. *Forest Ecology and Management*, 286, 38–47.

Leblon, B., Bourgeau-Chavez, L., & San-Miguel-Ayanz, J. (2012). Use of remote sensing in wildfire management. *Sustainable Development-Authoritative and Leading Edge Content for Environmental Management*, 55–82.

Liu, S., Bruzzone, L., Bovolo, F., Zanetti, M., & Du, P. (2015). Sequential Spectral Change Vector Analysis for Iteratively Discovering and Detecting Multiple Changes in Hyperspectral Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(8), 4363–4378.

<https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2396686>

Loboda, T., O'neal, K. J., & Csiszar, I. (2007). Regionally adaptable dNBR-based algorithm for burned area mapping from MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 109(4), 429–442.

Lunetta, R. S. E., & Christopher, D. (1998). *Remote Sensing Change Detection: Environmental Monitoring Methods and Applications*. (Issue GE45. R44. L86 1998.).

Macedo-Cruz, A., Pajares-Martinsanz, G., & Santos-Peñas, M. (2010). Clasificación no supervisada con imágenes a color de cobertura terrestre. *Agrociencia*, 44(6), 711–722.

MAE, M. del A. (2021, June 23). *Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica declara a Mojanda como Área de Protección Hídrica – Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica*. <https://www.ambiente.gob.ec/ministerio-del-ambiente-agua-y-transicion->

ecologico-declara-a-mojanda-como-area-de-proteccion-hidrica/

- MAE, M. del A. del E. (2013). *Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental*. Subsecretaría de Patrimonio Natural Quito. [http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PDOT/NIVEL\\_NACIONAL/MAE/ECOSISTEMAS/DOCUMENTOS/Sistema.pdf](http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PDOT/NIVEL_NACIONAL/MAE/ECOSISTEMAS/DOCUMENTOS/Sistema.pdf)
- MAGAP, M. D. A. G. A. Y. P. (2014). *Adquisición, Análisis e Interpretación de Imágenes Satelitales de Alta Resolución de la Amazonia Ecuatoriana y de las Provincias de Guayas, Los Ríos, Santa Elena, Manabí, Loja y El Oro (Cantones Arenillas y Las Lajas)*. Proceso No.
- <https://www.compraspublicas.gob.ec/ProcesoContratacion/compras/PC/bajarArchivo.cpe?Archivo=lnw7lrBKgmLwtmuOytBm2ljZGdNrkfVnPCEworTnWe4>,
- Maguire, D. J., & Longley, P. A. (2005). The emergence of geoportals and their role in spatial data infrastructures. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29(1), 3–14.
- Malila, W. A. (1980). Change vector analysis: An approach for detecting forest changes with Landsat. *LARS Symposia*, 385.
- Martorell Guerrero, G. (2019). *El visor cartográfico frente al mapa: una propuesta para mejorar la comunicación geográfica*.
- Mataix-Solera, J., & Guerrero, C. (2007). Efectos de los incendios forestales en las propiedades edáficas. *Incendios Forestales, Suelos y Erosión Hídrica*, 5–40.
- Mejía Avila, D. (2009). Sistemas de Información Geográfica, Infraestructura de Datos Espaciales y Educación. *Mapping*, ISSN 1131-9100, N° 136, 2009, Pags. 59-66.
- Mejía, X., & Moncayo, P. (2012). Evaluación de métodos de clasificación de imágenes satelitales de moderada y alta resolución para la obtención de mapas de uso y cobertura del suelo basados en píxeles y orientados a objetos: Estudio de caso en sub escena de la parroquia Shushufindi, prov. *Estudio de Caso En Sub Escena de La Parroquia Shushufindi, Provincia de Sucumbíos, Utilizando Imágenes Aster e Ikonos*, 1–204.
- <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/5528>

- Menendez, F. J. S. (2009). *Georreferenciación de Cartografía: Datos Raster y Vectoriales* (Vol. 4). EOSGIS SL.
- Miller, J. D., Knapp, E. E., Key, C. H., Skinner, C. N., Isbell, C. J., Creasy, R. M., & Sherlock, J. W. (2009). Calibration and validation of the relative differenced Normalized Burn Ratio (RdNBR) to three measures of fire severity in the Sierra Nevada and Klamath Mountains, California, USA. *Remote Sensing of Environment*, 113(3), 645–656.
- Miller, J. D., & Thode, A. E. (2007). Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment*, 109(1), 66–80.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador, M. (2013). *Sistema de Clasificación de Ecosistemas del Ecuador Continental*. Subsecretaría de Patrimonio Natural Quito.
- Montecinos, C. L. (2018). Fundamentos Básicos de Teledetección. *Universidad Católica Del Norte*.  
[https://www.academia.edu/39673540/Fundamentos\\_Básicos\\_para\\_la\\_Teledetección\\_Ambiental](https://www.academia.edu/39673540/Fundamentos_Básicos_para_la_Teledetección_Ambiental)
- Motazeh, A. G., Ashtiani, E. F., Baniasadi, R., & Choobar, F. M. (2013). Rating and mapping fire hazard in the hardwood Hyrcanian forests using GIS and expert choice software. *Acknowledgement to Reviewers of the Manuscripts Submitted to Forestry Ideas In*, 141.
- Pardo Méndez, M. S., & Restrepo Sanchez, J. S. (2019). WebGIS como herramienta de apoyo en la identificación y análisis espacial de zonas de protección ambiental en el municipio de Anapoima, Departamento de Cundinamarca, para el año 2019. *Universidad Distrital Francisco José De Caldas*, 26.  
<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/16319/PardoMéndezMiltonSneyder2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y#page=26>
- Pérez, D. J. (2007). Introducción a los sensores remotos-Aplicaciones en Geología. *Laboratorio de Tectónica Andina, Ciudad Universitaria, Pabellón, 2*, C1428EGA.

[http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso\\_SR/Guia\\_Curso\\_sr\\_2007.pdf](http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso_SR/Guia_Curso_sr_2007.pdf)

Pérez, J. E. (2019). *introduccion a JavaScript*.

[http://190.57.147.202:90/jspui/bitstream/123456789/430/1/introduccion\\_javascript%281%29.pdf](http://190.57.147.202:90/jspui/bitstream/123456789/430/1/introduccion_javascript%281%29.pdf)

Perilla, G. A., & Mas, J.-F. (2020). Google Earth Engine (GEE): una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube.

*Investigaciones Geográficas*, 101. <https://doi.org/10.14350/rig.59929>

Phiri, D., & Morgenroth, J. (2017). Developments in Landsat land cover classification methods: A review. *Remote Sensing*, 9(9), 967.

Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V., Murayama, Y., & Ranagalage, M. (2020).

Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping: A Review. *Remote Sensing*, 12(14), 2291. <https://doi.org/10.3390/rs12142291>

Picotte, J. J., & Robertson, K. (2011). Timing constraints on remote sensing of wildland fire burned area in the southeastern US. *Remote Sensing*, 3(8), 1680–1690.

Ponvert-Delisle, D. R. (2013). Leyendas de clases de ocupación del suelo de Cuba. Su empleo en estudios medioambientales que usen imágenes de satélites como datos básicos. *XV Convención y Feria Internacional Informática 2013*.

<http://www.informaticahabana.com>

Prasad, S. V. S., Savitri, T. S., & Krishna, I. V. M. (2011). Classification of multispectral satellite images using clustering with SVM classifier. *International Journal of Computer Applications*, 35(5), 32–44. <https://doi.org/10.1.1.663.9078>

Ramos López, B. (2018, November 16). *¿Qué vas a aprender en el curso sobre*

*Infraestructuras de Datos Espaciales?* <https://www.cursosgis.com/que-vas-a-aprender-en-el-curso-sobre-infraestructuras-de-datos-espaciales/>

Reyes-Bueno, F., & Balcazar-Gallegos, C. (2021). factores que inciden en la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en ecuador. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*,



11(1), 50–60.

- Riaño, D., Salas, J., & Chuvieco, E. (2000). Corrección atmosférica y topográfica, información multitemporal y auxiliar aplicadas a la cartografía de modelos de combustibles con imágenes Landsat-TM. *Asociación de Geógrafos Españoles. Recuperado de: [Http://Age.leg.Csic.Es/Metodos/Docs/IX\\_2/Riano\\_David.PDF](http://Age.leg.Csic.Es/Metodos/Docs/IX_2/Riano_David.PDF)*.
- Ridd, M. K., & Liu, J. (1998). A comparison of four algorithms for change detection in an urban environment. *Remote Sensing of Environment*, 63(2), 95–100.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425797001120>
- Riet, M., & Veraverbeke, S. (2022). How Much of a Pixel Needs to Burn to Be Detected by Satellites? A Spectral Modeling Experiment Based on Ecosystem Data from Yellowstone National Park, USA. In *Remote Sensing* (Vol. 14, Issue 9).  
<https://doi.org/10.3390/rs14092075>
- Romero, F. S. (2016). La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Revista AquaTIC*, 24.
- Roy, D. P., Lewis, P. E., & Justice, C. O. (2002). Burned area mapping using multi-temporal moderate spatial resolution data—A bi-directional reflectance model-based expectation approach. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 263–286.
- Ruiz Azurduy, S. A. (2017). *Manejo adaptativo de riesgos y vulnerabilidad en la zona lacustre de Mojanda*. Quito: Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Pichincha ....  
[https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/5781/1/Ruiz%2C S-CON-002-Manejo.pdf](https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/5781/1/Ruiz%2C%20S-CON-002-Manejo.pdf)
- Schott, J. R. (2007). *Remote sensing: the image chain approach*. Oxford University Press on Demand.
- SIGMUR, S. y T. en la U. de M. (2010). *Páginas de SIG y Teledetección*. Fotointerpretación y Teledetección. <https://www.um.es/geograf/sigmur/>
- SNGRE, S. N. de G. de R. y E. (2020a). Informe de Situación - Incendios Forestales No 23. *Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE)*, 23, 6.

- <http://www.gestionderiesgos.gob.ec/informes-incendios-forestales-2016/>
- SNGRE, S. N. de G. de R. y E. (2020b). Informe de Situación - Incendios Forestales No 31. *Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE)*, 31, 6.
- <http://www.gestionderiesgos.gob.ec/informes-incendios-forestales-2016/>
- SNP, S. N. de P. (2021). *Plan Nacional de Creación de Oportunidades 2021 - 2025*. 81–90.
- <https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/2021/09/Plan-de-Creación-de-Oportunidades-2021-2025-Aprobado.pdf>
- Song, C., Woodcock, C. E., Seto, K. C., Lenney, M. P., & Macomber, S. A. (2001). Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of Environment*, 75(2), 230–244.
- Subirana, J. C. (2004). Infraestructura de Datos Espaciales (IDE). Definición y desarrollo actual en España. *Scripta Nova: Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*.
- <http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-170-61.htm>
- Tangthaiwan, K., Keeratipranon, N., & Agsornintara, A. (2017). Multiclass support vector machine for classification spatial data from satellite image. *2017 9th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST)*, 111–115.
- <https://doi.org/10.1109/KST.2017.7886107>
- USGS, U. S. G. S. (2016). *Landsat Satellite Missions*. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions>
- USGS, U. S. G. S. (2019). *Landsat Collection 1 Nivel 1 Definición de producto*. <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-collection-1-level-1-product-definition>
- USGS, U. S. G. S. (2020, November 27). *Landsat 8-9 OLI/TIRS Collection 2 Level-2 Science Products*. <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-8-9-olitirs-collection-2-level-2>
- USGS, U. S. G. S. (2021). Landsat collection 2. *U.S. Geological Survey Fact Sheet 2021–3002*, 1.1, 4. <https://doi.org/10.3133/FS20213002>

- Valencia Martínez de Antoñana, J. (2017). *Infraestructuras de datos espaciales tridimensionales: hacia un modelo real de la información geográfica*.
- Verbyla, D. L. (1995). *Satellite remote sensing of natural resources* (Vol. 4). CRC Press.
- Wegmann, M., Leutner, B., & Dech, S. (2016). *Remote sensing and GIS for ecologists: using open source software*. Pelagic Publishing Ltd.
- White, J. D., Ryan, K. C., Key, C. C., & Running, S. W. (1996). Remote Sensing of Forest Fire Severity and Vegetation Recovery. *International Journal of Wildland Fire*, 6(3), 125–136. <https://doi.org/10.1071/WF9960125>
- Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., Crawford, C. J., Masek, J. G., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., Belward, A. S., Cohen, W. B., Dwyer, J., Erb, A., Gao, F., Griffiths, P., Helder, D., Hermosilla, T., Hipple, J. D., Hostert, P., Hughes, M. J., ... Zhu, Z. (2019). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, 225, 127–147. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2019.02.015>
- Wulder, M. A., White, J. C., Goward, S. N., Masek, J. G., Irons, J. R., Herold, M., Cohen, W. B., Loveland, T. R., & Woodcock, C. E. (2008). Landsat continuity: Issues and opportunities for land cover monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), 955–969.
- Xu, Y., Yu, L., Feng, D., Peng, D., Li, C., Huang, X., Lu, H., & Gong, P. (2019). Comparisons of three recent moderate resolution African land cover datasets: CGLS-LC100, ESA-S2-LC20, and FROM-GLC-Africa30. *International Journal of Remote Sensing*.
- Yan, L., Roy, D. P., Zhang, H., Li, J., & Huang, H. (2016). An automated approach for sub-pixel registration of Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) and Sentinel-2 Multi Spectral Instrument (MSI) imagery. *Remote Sensing*, 8(6), 520.
- Zhang, P., Gong, M., Su, L., Liu, J., & Li, Z. (2016). Change detection based on deep feature representation and mapping transformation for multi-spatial-resolution remote sensing images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 116, 24–41. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.02.013>