



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN TELECOMUNICACIONES
Y REDES**

**DETERMINACIÓN DEL RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES
MEDIANTE EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES
MULTIESPECTRALES EN ZONAS CON PRESENCIA DE
VEGETACIÓN**

Trabajo de titulación

Tipo: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y
REDES**

AUTOR: HÉCTOR ALFREDO REINOSO CHILQUINGA

DIRECTOR: Ing. FABRICIO JAVIER SANTACRUZ SULCA

Riobamba – Ecuador

2021

© 2021, Héctor Alfredo Reinoso Chiquinga

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Héctor Alfredo Reinoso Chilibingua, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 06 de mayo de 2021

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN TELECOMUNICACIONES Y

REDES

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Propuesta Tecnológica, **DETERMINACION DEL RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES MEDIANTE EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES EN ZONAS CON PRESENCIA DE VEGETACION**, realizado por el señor: **HÉCTOR ALFREDO REINOSO CHILQUINGA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Wilson Oswaldo Baldeón López PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	_____	2021-05-06
Ing. Fabricio Javier Santacruz Sulca DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN	_____	2021-05-06
Ing. Paúl David Moreno Avilés MIEMBRO DEL TRIBUNAL	_____	2021-05-06

DEDICATORIA

A mi madre, hermanas y hermanos que me apoyaron incondicionalmente en la parte moral y económica para poder alcanzar esta meta profesional y me han enseñado a sobreponerme ante las adversidades.

Héctor

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia y personas cercanas que me han apoyado, a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por brindarme la oportunidad de estudiar la carrera que me gusta finalmente agradezco a todos los docentes de la Escuela de Telecomunicaciones y Redes que me brindaron todos sus conocimientos a lo largo de la carrera y durante el desarrollo del presente trabajo.

Héctor

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiv
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I	
1. MARCO TEÓRICO.....	6
1.1. Observación remota o teledetección.....	6
1.1.1. Evolución histórica de la teledetección.....	6
1.1.2. Componentes de un sistema de teledetección.....	8
1.1.3. Principales aplicaciones.....	9
1.1.4. Principios físicos de la teledetección.....	10
1.1.4.1. La radiación electromagnética.....	11
1.1.4.2. Respuesta espectral de la vegetación.....	12
1.1.4.3. El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....	13
1.2. Sensores.....	15
1.2.1. La resolución de los sensores de observación remota.....	15
1.2.1.1. Resolución espacial.....	16
1.2.1.2. Resolución espectral.....	16
1.2.1.3. Resolución radiométrica.....	17
1.2.1.4. Resolución temporal.....	17
1.2.2. Tipos de sensores.....	17
1.2.2.1. Sensores pasivos.....	17
1.2.2.2. Sensores activos.....	18

1.2.3.	<i>El sensor multiespectral</i>	18
1.3.	Plataformas de observación remota	20
1.3.1.	<i>Plataformas satelitales</i>	20
1.3.2.	<i>Plataformas aerotransportadas</i>	21
1.3.3.	<i>Plataformas vehículos aéreos no tripulados (VANT'S)</i>	21
1.3.3.1.	<i>Drones comerciales</i>	22
1.4.	Incendios Forestales	24
1.4.1.	<i>Características del fuego y de los incendios forestales</i>	24
1.4.2.	<i>El combustible</i>	24
1.4.3.	<i>Actividad fotosintética</i>	25
1.4.4.	<i>Susceptibilidad de la vegetación frente a los incendios de la cobertura vegetal</i>	25
1.5.	Tratamiento digital de imágenes	26
1.5.1.	<i>Concepto de imagen digital multiespectral</i>	26
1.5.2.	<i>Pre-procesamiento de datos</i>	28
1.5.2.1.	<i>Correcciones geométricas</i>	28
1.5.2.2.	<i>Correcciones radiométricas</i>	28
1.5.3.	<i>Procesamiento de datos</i>	29
1.5.3.1.	<i>Segmentación de Imágenes</i>	29
1.5.3.2.	<i>Umbralización de imágenes</i>	29
1.5.3.3.	<i>Operaciones entre bandas</i>	29
1.5.3.4.	<i>Clasificación de imágenes</i>	29
1.5.4.	<i>Software de procesamiento de imágenes</i>	31
1.5.4.1.	<i>Matlab</i>	31
1.5.4.2.	<i>Agisoft Metashape</i>	31
CAPÍTULO II		
2.	METODOLOGÍA PARA LA ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE LOS DATOS	32
2.1.	Escenario	32
2.2.	El nivel de riesgo de incendio forestal de la zona de estudio	33

2.2.1.	<i>Porcentaje de la cubierta vegetal en riesgo de ignición</i>	33
2.2.2.	<i>Susceptibilidad de la vegetación a los incendios forestales</i>	34
2.2.3.	<i>Índice de riesgo de incendio (IRI)</i>	34
2.3.	Hardware	35
2.3.1.	<i>Componentes del sistema</i>	35
2.3.1.1.	<i>Plataforma aérea (drone)</i>	35
2.3.1.2.	<i>Cámara multiespectral</i>	36
2.3.2.	<i>Sistema de adquisición de imágenes</i>	37
2.4.	Software	39
2.4.1.	<i>Software de la cámara Micasense RedEdge MX</i>	39
2.4.2.	<i>Preprocesamiento de imágenes</i>	41
2.4.3.	<i>Procesamiento digital de imágenes</i>	44
2.4.3.1.	<i>Diseño del Algoritmo de procesamiento digital de imágenes</i>	45
2.4.3.2.	<i>Interfaz GUIDE</i>	47
CAPÍTULO III		
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	49
3.1.	Resultados e interpretación del procesamiento de las imágenes	49
3.1.1.	<i>Estrato arbóreo</i>	50
3.1.2.	<i>Estrato arbustivo</i>	54
3.1.3.	<i>Estrato herbáceo</i>	60
3.2.	Validación de los resultados obtenidos	63
3.2.1.	<i>Validación mediante puntos de verificación en el estrato arbóreo</i>	63
3.2.2.	<i>Validación mediante puntos de verificación en el estrato arbustivo</i>	65
3.2.3.	<i>Validación mediante puntos de verificación del estrato herbáceo</i>	67
3.3.	Desarrollo del plan de acción para mitigar el riesgo de incendio	69
3.3.1.	<i>Metodología</i>	69
3.3.1.1.	<i>Preparación de la cartografía</i>	70
3.3.1.2.	<i>Identificar los sectores críticos</i>	71
3.3.1.3.	<i>Complementar la información</i>	71

3.3.1.4.	<i>Definir las medidas a implementar</i>	<i>73</i>
3.3.2.	<i>Medidas de prevención y mitigación del riesgo de incendio forestal</i>	<i>73</i>
3.3.2.1.	<i>Instalación de letreros con mensajes de precaución o indicaciones básicas</i>	<i>73</i>
3.3.2.2.	<i>Construcción de líneas cortafuegos</i>	<i>74</i>
3.3.2.3.	<i>Otras medidas de prevención y mitigación de incendios forestales</i>	<i>75</i>
CONCLUSIONES.....		77
RECOMENDACIONES.....		78
TRABAJOS FUTUROS		
GLOSARIO		
BIBLIOGRAFÍA		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Interpretación de los valores del NDVI.....	14
Tabla 2-1:	Sensores utilizados en teledetección.....	15
Tabla 3-1:	Características de las cámaras multispectrales con matriz de canales ópticos ..	19
Tabla 4-1:	Características de varias plataformas de observación satelitales.....	20
Tabla 5-1:	Características de varios drones usados en teledetección.....	23
Tabla 6-1:	Actividad fotosintética de la vegetación según el valor de NDVI.....	25
Tabla 7-1:	Factores de la susceptibilidad de la vegetación frente a los incendios	26
Tabla 8-1:	Formatos de almacenamiento de imágenes digitales.....	27
Tabla 9-1:	Tipos de imágenes digitales.....	28
Tabla 1-2:	Porcentaje de la cubierta vegetal en riesgo de ignición.....	34
Tabla 2-2:	Susceptibilidad de la cubierta vegetal a los incendios.....	34
Tabla 3-2:	Calificación para la plataforma aérea (drone)	36
Tabla 4-2:	Calificación para la cámara multispectral.....	36
Tabla 1-3:	Resultados del procesamiento de la muestra 1 del estrato arbóreo	50
Tabla 2-3:	Resultados del procesamiento de la muestra 2 del estrato arbóreo	51
Tabla 3-3:	Calificación de los parámetros del IRI	53
Tabla 4-3:	Valor y Categoría del IRI	53
Tabla 5-3:	Resultados del procesamiento de la muestra 1 del estrato arbustivo.....	54
Tabla 6-3:	Resultados del procesamineto de la muestra 2 del estrato arbustivo.....	55
Tabla 7-3:	Resultados del procesamiento de la muestra 3 del estrato arbustivo.....	56
Tabla 8-3:	Resultados del procesamiento de la muestra 4 del estrato arbustivo.....	57
Tabla 9-3:	Calificación de los parámetros del IRI	59
Tabla 10-3:	Valor y Categoría del IRI	59
Tabla 11-3:	Resultados del procesamiento de la muestra 1 del estrato herbáceo	60
Tabla 12-3:	Resultados del procesamiento de la muestra 2 del estrato herbáceo	61
Tabla 13-3:	Calificación de los parámetros del IRI	63
Tabla 14-3:	Valor y Categoría del IRI	63
Tabla 15-3:	Coordenadas de los puntos de verificación del estrato arbóreo.....	64
Tabla 16-3:	Coordenadas de los puntos de verificación en el estrato arbustivo	66
Tabla 17-3:	Coordenadas de los puntos de verificación en el estrato herbáceo.....	68
Tabla 18-3:	Información acerca de los sectores críticos	71
Tabla 19-3:	Información complementaria acerca de los sectores críticos.....	72
Tabla 20-3:	Información complementaria acerca de los sectores críticos.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Evolución de los sistemas de teledetección.	7
Figura 2-1:	Elementos de un sistema de teledetección	9
Figura 3-1:	Principio de funcionamiento de un sistema de teledetección.....	10
Figura 4-1:	Representación gráfica de una onda electromagnética	11
Figura 5-1:	Espectro electromagnético	12
Figura 6-1:	Respuesta espectral de la vegetación a la luz solar	13
Figura 7-1:	Distribución de los valores de reflectancias.....	15
Figura 8-1:	Resolución espacial de un sensor.....	16
Figura 9-1:	Resolución espectral del satélite Landsat 8.....	17
Figura 10-1:	Resolución radiométrica del Landsat MS	17
Figura 11-1:	Sensor multiespectral Parrot Sequoia	18
Figura 12-1.	Fotografía del satélite Landsat 8	20
Figura 13-1:	Plataforma aerotransportada	21
Figura 14-1:	Drones de ala fija y ala rotatoria	22
Figura 15-1:	Drone multirrotor comercial.....	23
Figura 16-1:	Triángulo de fuego.....	24
Figura 17-1:	Imagen multiespectral de cuatro bandas	27
Figura 18-1:	Umbralización de una imagen en escala de grises	29
Figura 19-1:	Clasificación no supervisada mediante clustering	30
Figura 1-2:	Área de estudio	32
Figura 2-2:	Categorización del IRI	35
Figura 3-2:	Conexión de los elementos del sensor MicaSense Rededge MX.....	37
Figura 4-2:	(a) Vista del diseño del soporte (b) soporte impreso.....	38
Figura 5-2.	Sistema de adquisición de imágenes	38
Figura 6-2:	Menú “Home” de la cámara MicaSense	39
Figura 7-2:	Menú “ <i>settings</i> ” de la cámara MicaSense	40
Figura 8-2:	Menú “Live View” de la cámara MicaSense	40
Figura 9-2:	Captura del panel de reflectancias en la banda roja	41
Figura 10-2:	Menú para agregar fotos	43
Figura 11-2:	Menú para calibrar reflectancias	43
Figura 12-2:	Menú para exportar las imágenes calibradas	44
Figura 13-2:	Resultado de la corrección radiométrica en una imagen sin procesar.....	44
Figura 14-2:	Diagrama de flujo para el procesamiento de imágenes.....	45
Figura 15-2:	Panel principal de la interfaz gráfica desarrollada mediante GUIDE Matlab...	47

Figura 16-2:	Panel de análisis mediante regiones de interés (ROI's).....	48
Figura 17-2:	Ventana para seleccionar la región de interés (ROI)	48
Figura 1-3:	Ubicación de los puntos de verificación del estrato arbóreo.....	63
Figura 2-3:	Imágenes de los puntos de verificación del estrato arbóreo.....	65
Figura 3-3:	Ubicación de los puntos de verificación del estrato arbustivo	66
Figura 4-3:	Imágenes de los puntos de verificación en el estrato arbustivo	67
Figura 5-3:	Ubicación de los puntos de verificación del estrato herbáceo	68
Figura 6-3:	Imágenes de los puntos de verificación en el estrato herbáceo.....	69
Figura 7-3:	Cartografía de la zona de estudio.....	70
Figura 8-3:	Ubicación de los sectores críticos en la zona de estudio.....	71
Figura 9-3:	Información complementaria de los sectores críticos en la zona de estudio.....	72
Figura 10-3:	Letreros con señalética preventiva.....	74
Figura 11-3:	Ubicación de la señalética preventiva dentro de la zona de estudio	74
Figura 12-3:	Ubicación de la línea Cortafuegos en la zona de estudio.....	75

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3:	Porcentajes de cubierta vegetal y suelo desnudo del estrato arbóreo	53
Gráfico 2-3:	Porcentajes de cubierta vegetal y suelo desnudo del estrato arbustivo	59
Gráfico 3-3:	Porcentajes de cubierta vegetal y suelo desnudo del estrato herbáceo	62

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** EQUIVALENCIAS DE CARACTERÍSTICAS DEL COMBUSTIBLE VEGETAL A LAS CATEGORÍAS DEL NIVEL 3 DEL SISTEMA CORINE LAND COVER.
- ANEXO B:** ESTRUCTURA DE INTERFAZ GUIDE DEL ALGORITMO DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES DESARROLLADOS EN MATLAB.
- ANEXO C:** FÓRMULAS PARA CALCULAR LA SUPERFICIE CAPTURADA EN CADA IMAGEN.

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tuvo por objetivo determinar el riesgo de incendios forestales mediante el procesamiento de imágenes multiespectrales en zonas con presencia de vegetación, para la obtención de las imágenes se utilizó un sistema de adquisición de imágenes basado en una plataforma de vehículo aéreo no tripulado y un sensor multiespectral de cinco bandas, se tomaron imágenes aéreas de cada estrato de vegetación (arbóreo, arbustivo y herbáceo) en la zona aledaña al centro de salud ESPOCH-LIZARZABURU. Posteriormente se procedió a realizar las correcciones radiométricas en cada imagen utilizando el software Agisoft y mediante MATLAB se desarrolló el algoritmo para calcular el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), en base a dicho índice se realizó la separación entre suelos descubiertos y la vegetación, mediante la clasificación de imágenes no supervisada y segmentación de las imágenes; posteriormente los resultados obtenidos (porcentaje de vegetación con valores de NDVI entre 0.1 y 0.3), en conjunto con la susceptibilidad del combustible vegetal, permitieron establecer el riesgo de incendio de la cubierta vegetal del lugar, siendo útil para establecer medidas de prevención y mitigación en las zonas identificadas con riesgo de incendio. Finalmente se determinó que la vegetación del lugar correspondiente al estrato arbóreo tiene un bajo riesgo de incendio debido a la presencia de poca cantidad de combustible en capacidad de arder; el estrato arbustivo presenta un riesgo de incendio moderado debido a la distribución discontinua del combustible vegetal y el estrato herbáceo presenta un riesgo de incendio alto ya que casi en su totalidad corresponde a vegetación reseca y muerta que arde con facilidad. El proyecto demostró que es posible determinar el riesgo de incendio de zonas con vegetación a partir del procesamiento de imágenes multiespectrales en conjunto con otros parámetros obtenidos a partir de las características intrínsecas de la vegetación.

Palabras Clave: <TELEDETECCIÓN>, <IMÁGENES MULTIESPECTRALES>, <PROCESAMIENTO DE IMÁGENES>, <ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA>, <CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES NO SUPERVISADA>, <SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES>, <BOSQUE DE LOS BÚHOS ESPOCH>.

ABSTRACT

This degree work was aimed to determine the risk of forest fires by processing multispectral images in areas with vegetation. An image acquisition system based on an Unmanned Aerial Vehicle platform and a five-band multispectral sensor was used to obtain the images. Aerial images were taken of each vegetation stratum (arboreal, shrub, and herbaceous) surrounding the ESPOCH-LIZARZABURU health center. Afterward, the radiometric corrections were carried out in each image using the Agisoft software, and through MATLAB, the algorithm was developed to calculate the normalized difference vegetation index (NDVI). Based on this index, the separation between uncovered soils and vegetation was carried out by classifying unsupervised images and segmentation of the images. Subsequently, the results obtained (percentage of vegetation with NDVI values between 0.1 and 0.3) and the susceptibility of the vegetable fuel allowed to establish the fire risk of the vegetation cover of the place. They were helpful to establish prevention and mitigation measures in areas identified as fire-risk zones. Finally, it was determined that the vegetation of the place corresponding to the arboreal stratum has a low risk of fire due to a small amount of fuel capable of burning. The shrub stratum presents a moderate fire risk due to the discontinuous distribution of vegetable fuel, and the herbaceous stratum presents a high fire risk since, almost in its entirety, it corresponds to dry and dead vegetation that burns quickly. The project showed that it is possible to determine the fire risk of vegetated areas from multispectral image processing in cooperation with other parameters obtained from the intrinsic characteristics of the vegetation.

Keywords: <REMOTE SENSING>, <MULTISPECTRAL IMAGES>, <IMAGE PROCESSING>, <NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX>, <UNSUPERVISED CLASSIFICATION OF IMAGES>, <IMAGE SEGMENTATION>, <THE FOREST OF OWLS-ESPOCH>.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la vegetación por parte de la Teledetección es una de las aplicaciones más importantes de esta área de la Geografía, gracias a los datos obtenidos de los sensores de un sistema de teledetección que recibe la radiación electromagnética es posible llegar a conocer no sólo el grado de salubridad de una cubierta vegetal, sino también características más complejas como la actuación de los diferentes pigmentos de la hoja, su estructura, forma, grado de humedad y estrés hídrico que posee la vegetación.(Díaz ,2015, p.29)

El estudio de los índices de vegetación no es algo nuevo ya que desde la década de 1970 se llevaban estudios de teledetección gracias al lanzamiento de satélites meteorológicos y de recursos naturales como: Nimbus, Tiros-NOAA, ATS-Geos, Landsat y SPOT cada uno con objetivos específicos y características particulares. En los últimos años el desarrollo de los vehículos aéreos no tripulados (drones) y también de los sensores de observación remota han permitido el desarrollo de nuevas plataformas versátiles para la adquisición de imágenes remotas con infinidad de aplicaciones en cartografía, termografía y agricultura, que en conjunto con la amplia variedad de software de procesamiento de las imágenes digitales, permiten analizar lo que ocurre en las cubiertas vegetales mediante diferentes parámetros como los índices de vegetación.(Kharuf-Gutierrez et al., 2018, pp.81-83)

En base al desarrollo de las tecnologías antes mencionadas, se han desarrollado diversas investigaciones como el trabajo desarrollado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Cuba. Titulado: “Análisis de imágenes multiespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados” en este trabajo se realizaron pruebas experimentales con dos de los mejores softwares de procesamiento de imágenes disponibles en el mercado, Agisoft Photoscan y Pix4D, generándose orto mosaicos 3D y mapas de índices NDVI (Índice Normalizado Diferencial de Vegetación) en los cultivos de caña de azúcar. (Kharuf-Gutierrez et al., 2018, p.80)

A nivel nacional existen varias investigaciones relacionadas con teledetección, como es el caso de la investigación realizada en la Escuela Superior Politécnica del Ejercito titulada: “Diseño e implementación de un sistema de visión artificial para análisis de datos NDVI en imágenes espectrales de cultivos de brócoli obtenidos mediante una aeronave pilotada remotamente ” en la cual se presenta una técnica de visión artificial aplicada a la detección de características en el desarrollo de cultivos de brócoli, mediante la aplicación de un sistema de visión por computador, basado en imágenes espectrales adquiridas por medio de una cámara Survey 2 adaptada a una plataforma aérea (drone) y procesadas en el lenguaje de programación Matlab, para

posteriormente a ello tener como resultado el NDVI de mencionados cultivos.(Bautista et al., 2019,p.13)

En la Universidad Central del Ecuador también se ha desarrollado un trabajo de titulación llamado “Monitoreo de maíz duro mediante índices de vegetación obtenidos por imágenes satelitales en Loja y Manabí.” La investigación se desarrolló en dos cantones de la zona maicera ecuatoriana, Pindal (Loja) y Rocafuerte (Manabí), con la finalidad de realizar una metodología para el monitoreo en el cultivo de maíz durante el periodo invierno y verano de 2016. Las técnicas de teledetección, permitieron el análisis, tratamiento, clasificación y determinación de la superficie sembrada de maíz duro para cada ciclo de siembra. Los índices de vegetación y suelo aplicados a las imágenes satelitales proporcionaron información sobre la cantidad de vegetación y suelo que se puede encontrar durante el desarrollo del cultivo.(Valdano y Guaman ,2018, p.17)

A nivel local se encuentra el trabajo desarrollado en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo titulado: “Determinación del estado fisiológico en una plantación de pinus radiata D. Don, mediante técnicas de teledetección en la comunidad de Totoras, parroquia Achupallas, cantón Alausí, provincia de Chimborazo”, La investigación determinó el estado fisiológico de una plantación de Pinus radiata D. Don, mediante teledetección por imágenes satelitales Rapideye que ayudaron a desarrollar mapas de los NDVI de la plantación, posteriormente se analizaron en la imagen satelital los valores de NDVI para parcelas sanas y enfermas (Novoa, 2016, p.1).

Por otro lado, según el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias en un informe del 24 de septiembre de 2019 reportó a nivel nacional un total de 1540 incendios afectando a cerca de 17000 hectáreas, las provincias que reportan la mayor afectación por incendios forestales son: Loja, Imbabura, Pichincha, Chimborazo, Carchi, Guayas y el Oro, la provincia de Chimborazo es la tercera a nivel nacional afectada por el número de incendios forestales con 143. (SNGRE , 2019)

En la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En la carrera de Ingeniería en Electrónica , Telecomunicaciones y Redes no se ha realizado una aplicación enfocada en la prevención de incendios forestales mediante imágenes multiespectrales obtenidas mediante plataformas aéreas (drones). Con el fin de ampliar la investigación sobre las aplicaciones de la teledetección a nivel local el presente trabajo busca realizar las primeras incursiones en el uso de las cámaras multiespectrales y posterior procesamiento de las imágenes obtenidas para detectar zonas de vegetación con riesgo de incendio, además también busca dar a conocer este tipo de tecnologías existentes en la institución y que futuras investigaciones desarrollen y amplíen su uso.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Es posible determinar el riesgo de incendios forestales mediante el procesamiento de imágenes multiespectrales en determinadas zonas con presencia de vegetación?

SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuáles son los parámetros que permiten evaluar la calidad de vegetación y la manera en que se relacionan con el nivel de riesgo de incendio forestal?

¿Es factible diseñar un sistema para la adquisición mediante plataforma aérea (dron y cámara) de imágenes multiespectrales y posterior procesamiento de las mismas?

¿Cómo se implementará el sistema antes mencionado sobre el escenario propuesto que permita la adquisición de imágenes multiespectrales y posterior procesamiento?

¿De qué manera se evaluará los resultados obtenidos del procesamiento de las imágenes multiespectrales?

¿Cuál es el plan de acción que ayude a mitigar el riesgo de incendio en las zonas identificadas?

JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

Hoy en día el uso de cámaras multiespectrales es particularmente útil para actividades agrícolas y forestales, ya que con base en la información generada se pueden analizar rasgos fisiológicos y tomar decisiones sobre el manejo de cultivos o zonas forestales. Esta utilidad ha hecho que principalmente durante la última década las cámaras multiespectrales sean más asequibles y pequeñas, a fin de equiparlas en drones con los cuales capturar datos con el detalle y la frecuencia que se requiera (Vargas, 2019), este tipo de tecnología es idónea para realizar el análisis del estado pirogénico de la vegetación que permita estimar el nivel de riesgo de incendio, debido a que las imágenes obtenidas guardan información acerca del estado de salud de la cubierta vegetal.

El desarrollo de este trabajo de titulación está enmarcado en las líneas de investigación ESPOCH 2012-2017, resolución 582.CP 2012, que resuelve en su literal b, apartado V; “desarrollo de aplicaciones de software para procesos de gestión y administración pública y privada. Educación “, y también en el Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017, apartado 7.3 que manifiesta, “Fortalecer los mecanismos jurídicos e institucionales que promueven la conservación, protección y producción forestal sustentable, especialmente con especies nativas, para contrarrestar procesos de deforestación, degradación, fragmentación, erosión, desertificación e incendios forestales”

Las imágenes multiespectrales provenientes de sensores aerotransportados, permiten visualizar el comportamiento de la vegetación en bandas espectrales imperceptibles al ojo humano como el

infrarrojo cercano (NIR), en donde la actividad fotosintética de la planta es mayor, permitiendo conocer el estado de salud de las diferentes cubiertas vegetales.

JUSTIFICACIÓN APLICATIVA

A lo largo de la ejecución del proyecto será necesario la adquisición de imágenes multiespectrales para tal fin será necesario el empleo de una cámara multiespectral, la cámara propiedad de la Facultad de Informática y Electrónica es una MicaSense Rededge MX especialmente diseñada para acoplarla a drones de pequeño tamaño y para aplicaciones de agricultura de precisión, estudio ambiental y forestal. Captura simultáneamente imágenes en cuatro bandas espectrales discretas rojo, verde, azul, infrarrojo cercano (R, G, B, y NIR). Incorpora un sensor de luz incidente o DLS que permite comparar datos tomados en diferentes condiciones de luz ambiental. Su funcionamiento es totalmente autónomo guardando las imágenes en una tarjeta SD extraíble también incorpora conexiones para configurar el controlador de disparo y sistemas de almacenamiento adicional externo (tycgis, 2019).

Para realizar el sobrevuelo, la cámara antes mencionada usará el dron propiedad de la Escuela de Automatización y Control marca DJI modelo Phantom 3, el procesamiento de las imágenes multiespectrales se realizará a través de los programas Agisoft y Matlab. Este proyecto estará dividido en tres partes, la primera consiste en la captura de imágenes usando un sistema de adquisición de imágenes aéreas (dron y cámara multiespectral), las imágenes multiespectrales se almacenaran en la memoria de la cámara, posteriormente se importaran los archivos a un computador donde se les aplicará un preprocesamiento y posteriormente el procesamiento de las imágenes en esta etapa se utilizará tanto el software de Agisoft como Matlab, con la información ya procesada se procederá a realizar el análisis de la misma y desarrollar el plan de mitigación.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar el riesgo de incendios forestales mediante el procesamiento de imágenes multiespectrales en zonas con presencia de vegetación.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar acerca de los parámetros que permiten evaluar la calidad de vegetación y la manera en que se relacionan con el nivel de riesgo de incendio forestal.
- Establecer los parámetros que permitan asignar niveles de riesgo de incendio forestal.
- Diseñar un sistema para la adquisición mediante plataforma aérea (dron y cámara) de imágenes multiespectrales y posterior procesamiento de las mismas.
- Implementar el algoritmo que permita realizar el procesamiento de las imágenes multiespectrales obtenidas en el sobrevuelo
- Validar los resultados obtenidos del procesamiento de las imágenes multiespectrales en la zona aledaña al centro de salud ESPOCH-LIZARZABURU.
- Desarrollar un plan de acción que ayude a mitigar el riesgo de incendio en las zonas identificadas.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Observación remota o teledetección

La teledetección se define como “la adquisición de información sobre un objeto a distancia, es decir, sin que haya contacto físico entre el objeto o sistema observado y el observador”. (Castaño et al., 1996: p.183)

Dicho de otra forma, la teledetección mide la energía emitida por la superficie de la tierra dependiendo del origen de dicha energía, la teledetección puede clasificarse en: teledetección pasiva cuando la fuente de energía es el sol y teledetección activa cuando la energía es emitida desde la plataforma del sensor como por ejemplo los sistemas de radar. (Bravo, 2017, p.7)

Las ventajas más relevantes que ofrece la teledetección son:

- Permite estudiar la evolución en el tiempo de eventos en la superficie terrestre, ya que en el caso de los satélites de observación realizan un recorrido cada cierto tiempo por el mismo lugar.
- Es posible cubrir grandes extensiones de superficie (Landsat abarca 34000 Km²) con resoluciones de varias decenas o cientos de kilómetros por pixel .
- Gracias al desarrollo de sensores que operan en bandas fuera del espectro electromagnético visible (infrarrojos) se puede obtener valiosa información imperceptible al ojo humano. (Castaño et al., 1996: p.184)

1.1.1. Evolución histórica de la teledetección.

El desarrollo de la teledetección a lo largo de la historia ha estado relacionado con el avance tecnológico del momento, debido a que en ella convergen inventos y conocimientos variados en los campos de óptica, sensores detectores de luz, plataformas de observación, etc. En la Figura 1-1 muestra que la teledetección moderna inició con la guerra fría cuando en 1957 la Unión Soviética lanzó su primer satélite, el SPUTNIK que se podría considerar como la precursora de las modernas plataformas satelitales de observación de la tierra, más tarde en 1960 la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) puso en órbita el satélite de observación de la tierra TIROS-I (*Television Infrared Observation Satellite-I*) usado para adquirir datos muy valiosos de la superficie y la atmósfera terrestre (Martínez y Martín, 2010, p.3). Desde 1979 la familia de estos satélites pasó a ser llamados NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

Junto al lanzamiento de satélites también se enviaron misiones tripuladas como *Mercury* de 1961 y *Gemini* entre 1965 y 1966, que capturaron cerca de 35000 imágenes de la superficie terrestre y el océano. Más tarde en 1969 las misiones *Apollo-9* realizaron el primer experimento con cámaras multispectrales denominado *S065*. Con el fin de estudiar los recursos naturales de la superficie

del planeta, las fotografías se captaron usando filtros multispectrales y películas en blanco y negro sensibles a diferentes longitudes de onda incluyendo la banda de los infrarrojos. (Ortiz, 2019, p.6) (Martinez y Martín, 2010, p.3)

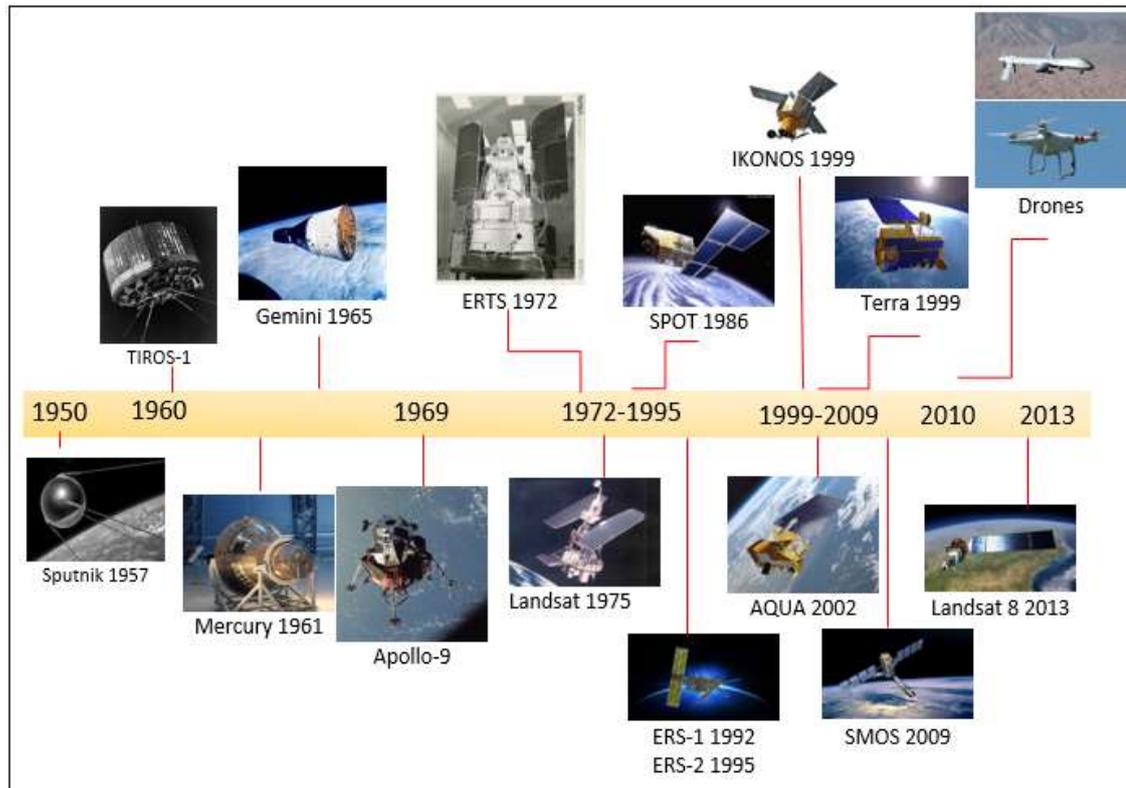


Figura 1-1: Evolución de los sistemas de teledetección.

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

Entre 1972 y 1995 se lograron importantes hitos en la teledetección, la NASA viendo los muy buenos resultados obtenidos de la fotografía multispectral del Apollo-9, en 1972 puso en órbita El primer satélite de la serie ERTS (*Earth Resources Technology Satellites*), renombrado como programa LANDSAT desde 1975 ambos proyectos han sido muy útiles en las aplicaciones civiles de teledetección, el proyecto LANDSAT continúa hasta la actualidad siendo el Landsat 8 el último satélite puesto en órbita en 2013. En 1986 Francia y otros países lanzan el satélite SPOT (*Système Pour l'Observation de la Terre*) destinado a capturar información tridimensional de la superficie terrestre, entre 1991 y 1995 la Agencia Espacial Europea pone en órbita los satélites ERS (*European Remote Sensing Satellite*) ERS-1 y ERS-2 como complemento de los sensores ópticos del Landsat y SPOT (Martinez y Martín, 2010, p.2).

A partir de 1999 hasta 2009 resaltan los siguientes proyectos IKONOS-2 lanzado en 1999 enfocado a la fotografía de alta resolución, en 1999 la NASA lanza el satélite TERRA y en 2002 AQUA destinados al estudio del medio ambiente y los efectos de cambio climático, en 2009 la Agencia Espacial Europea lanza el satélite SMOS (*Soil Moisture and Ocean Salinity satellite*) con el objetivo de medir el nivel de humedad en el suelo y la salinidad de los océanos. (Martinez y Martín, 2010, p.2)

A partir de la década de los noventa con el avance de la tecnología empezaron a popularizarse en el ámbito militar el uso de los vehículos aéreos no tripulados (drones) como el *Predator*, sin embargo la masificación del uso de este tipo de tecnología en otras áreas no llegaría hasta después del 2010, actualmente existe una amplia variedad de drones que se emplean en aplicaciones como cartografía, teledetección, termografía, agricultura de precisión, aplicaciones forestales, etc. (Cuerno, 2015, pp. 29-30; Díaz, 2015, p.7)

1.1.2. Componentes de un sistema de teledetección

Normalmente un sistema de teledetección como se muestra en la Figura 2-1 consta de: (Chuvieco, 1995, pp.27-28)

- **Fuente de energía:** es la encargada de generar la radiación electromagnética que va a ser captada por el sensor. Puede tratarse de una fuente de tipo pasiva como la luz solar o de tipo activa que emite la radiación electromagnética y luego es captada su reflejo por el sensor.
- **Cubierta terrestre:** son los rasgos tanto naturales como los creados por el hombre (vegetación, rocas, ríos, ciudades, estructuras, etc.) los cuales reflejan la energía proveniente de la fuente hacia el sensor.
- **Sistema sensor:** compuesto de dos partes, el dispositivo sensor (cámaras, radar, sensores óptico-electrónicos, etc.) y la plataforma de observación (satélite, avión, drone, etc.), es el encargado de captar la energía reflejada de la cubierta terrestre, almacenarla o enviarla a un sistema de recepción.
- **Sistema de recepción-comercialización:** recibe la información del sistema sensor, la guarda en un formato que más convenga y la distribuye a los usuarios.
- **Interprete:** es una persona la cual mediante procedimientos y técnicas visuales o procesamiento de imágenes digitales convierte la información en temas clave (forestal, agricultura, medio ambiente, etc.) para de esta manera facilitar su estudio.
- **Usuario final:** es la persona que se beneficia del trabajo realizado por el intérprete y es el encargado de analizar el documento y de tomar decisiones a partir del mismo.

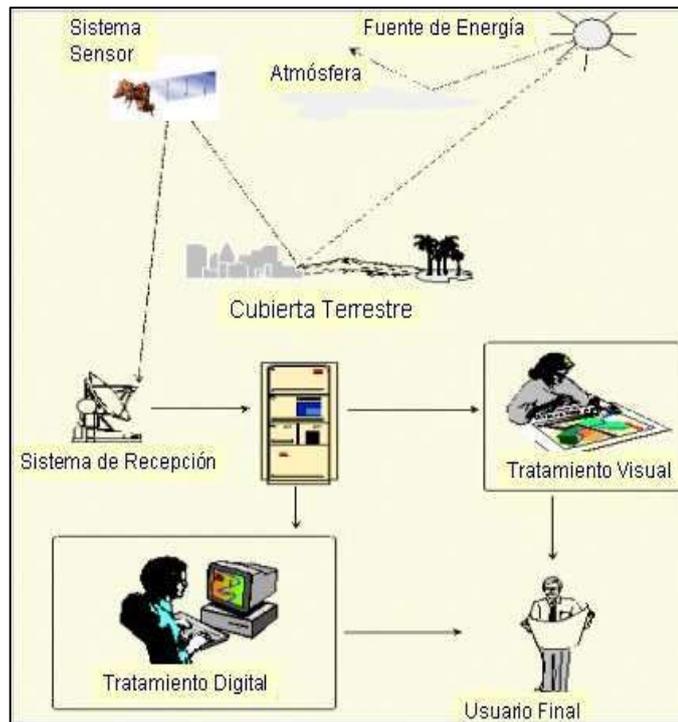


Figura 2-1: Elementos de un sistema de teledetección

Fuente: (Chuvieco, 1995)

1.1.3. Principales aplicaciones

Las aplicaciones más importantes de la teledetección son: (Ortiz, 2019, p.9)

- Estudios de impactos ambientales a partir de inventarios regionales de medio ambiente
- Cartografía de la cobertura vegetal del suelo
- Evaluación rápida de las condiciones de estrés vegetal, debido a sequias o incendios
- Cartografía de áreas forestales quemadas y seguimiento de la regeneración de la vegetación
- Prever el rendimiento de cultivos agrícolas
- Estudio de los efectos de sequias y excesivo pastoreo en pastizales
- Estudio de los niveles de salinidad de las masas de agua
- Cartografía geológica para la exploración petrolífera
- Realizar inventarios del medio ambiente de una región para estudiar el impacto ambiental
- Cartografía de depósitos volcánicos nuevos
- Control de movimiento de icebergs y glaciares
- Monitoreo en tiempo real de masas nubosas
- Cartografía de la temperatura de la superficie de los océanos
- Controlar la turbidez y contenido de algas de las masas de agua

1.1.4. Principios físicos de la teledetección

Todo sistema de teledetección tiene tres principales elementos indispensables: sensor, objeto observado y un flujo energético, este último se trata de energía electromagnética proveniente del sol que es la más empleada, aunque puede ser emitida por el propio objeto e incluso emitida por el propio sistema del sensor como es el caso del radar. El sol u otra fuente de energía ilumina la superficie terrestre la cual refleja esa energía dependiendo de la cubierta presente sobre la misma, el flujo energético es detectado por el sensor y se transmite a las estaciones receptoras o almacena los datos en una memoria, de la misma manera la observación remota puede usar la energía emitida por las propias cubiertas de la superficie terrestre (por ejemplo en la Figura 3-1(a) la fogata emite radiación infrarroja), el flujo energético también puede ser generado por el propio sistema del sensor (radar o lidar) como muestra la Figura 3-1 (b), independientemente del origen del flujo energético, la energía captada por el sensor será radiación electromagnética. (Chuvienco, 1995, pp. 45-46; Lara, 2015, pp.32-33)

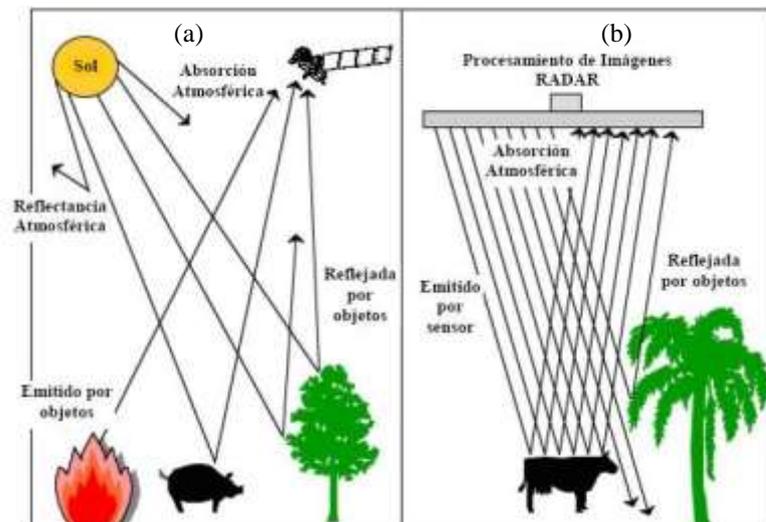


Figura 3-1: Principio de funcionamiento de un sistema de teledetección

Fuente: (Lara , 2015)

La radiación electromagnética se traslada de un lugar a otro con un movimiento ondulatorio como se observa en la Figura 4-1, en donde la onda electromagnética se propaga a la velocidad de la luz mediante los campos eléctrico y magnético entrelazados.

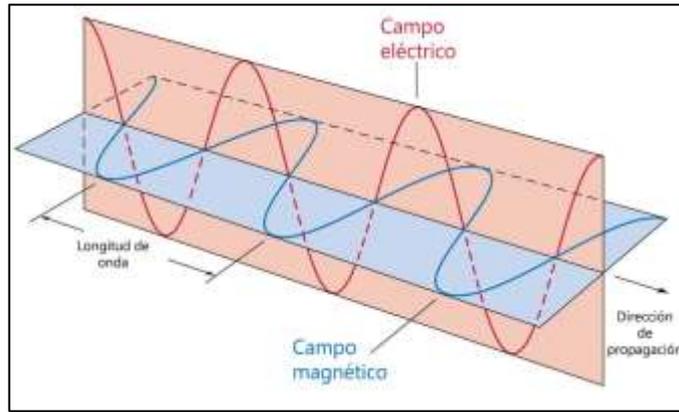


Figura 4-1: Representación gráfica de una onda electromagnética

Fuente: (Vergara, 2016)

Para definir físicamente una onda se emplean dos parámetros, que se relacionan mediante la Ecuación 1-1, donde c es la velocidad de la luz ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$), la longitud de onda se expresa en metros (m) y la frecuencia en Hertz (Hz). (Chuvieco, 1995, p. 47)

- Longitud de onda (λ): es la distancia entre dos crestas consecutivas de una misma oscilación.
- Frecuencia (F): es el número de ciclos que pasan por un punto fijo por unidad de tiempo.

$$c = \lambda F \quad \text{Ecuación 1-1}$$

La energía que contiene una onda se puede calcular mediante la energía asociada a un fotón, y se expresa con la Ecuación 2-1 donde Q es la energía radiante de un fotón (en julios J), F la frecuencia y h la constante de Planck ($6,6 \times 10^{-34} \text{ J/s}$), en la Ecuación 2-1 se puede notar que a mayor longitud de onda la cantidad de energía será menor y viceversa, esto implica que la radiación en longitudes de onda largas es más difícil de detectar que las longitudes de onda cortas. (Chuvieco, 1995, p.48)

$$Q = hF \quad Q = h(c/\lambda) \quad \text{Ecuación 2-1}$$

1.1.4.1. La radiación electromagnética

Los sensores que se encuentran a bordo de una plataforma de observación son capaces de percibir información de cómo se comportan los objetos de la superficie terrestre en un amplio rango de longitudes de onda, que abarca desde la región visible hasta las distintas bandas del infrarrojo próximo, infrarrojo medio e infrarrojo térmico y de las microondas. (Martinez y Martín, 2010, p.5)

A partir de la Ecuación 1-1 se puede describir un amplio espectro de energía electromagnética que depende de su longitud de onda o frecuencia, a pesar de ser un espectro con valores continuos se establecen una serie de bandas como se observa en la Figura 5-1, empieza desde las longitudes de onda más cortas (rayos gamma, rayos X) hasta las longitudes kilométricas (usadas en

radiocomunicaciones), para aplicaciones como la teledetección resaltan las siguientes bandas espectrales (Ortiz ,2019 ,p.10):

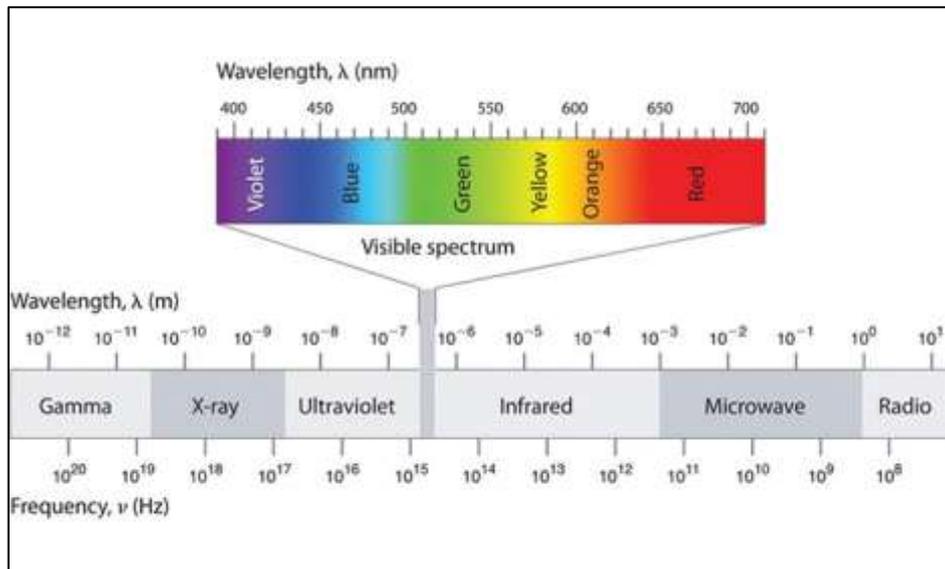


Figura 5-1: Espectro electromagnético

Fuente: (Bravo, Quintana y Contreras , 2019)

- Espectro visible (0,4 a 0,7 micrómetros μm) es la radiación electromagnética que pueden percibir nuestros ojos, suelen distinguirse tres bandas elementales, que son azul (0,4 a 0,5 μm), verde (0,5 a 0,6 μm), y rojo (0,6 a 0,7 μm).
- Infrarrojo cercano (0,7 a 1,3 micrómetros μm) o NIR (*Near Infrared*), esta banda espectral resulta de especial importancia por su capacidad de distinguir masas vegetales y concentraciones de humedad.
- Infrarrojo de onda corta (1,3 a 3 micrómetros μm) o SWIR (*Short Wave Infrared*), se utiliza para detectar la saturación de humedad del suelo o la cantidad de agua que posee la vegetación.
- Infrarrojo medio (3 a 8 micrómetros μm) o MWIR (*Mid Wave Infrared*), En esta banda se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y la emisión de la superficie terrestre, es usado para medir concentraciones de vapor de agua, ozono, aerosoles en la atmósfera.
- Infrarrojo lejano (8 a 14 micrómetros μm) o LWIR (*Long Wave Infrared*), incluye la porción emisiva del espectro terrestre, se utilizan para detectar las emisiones térmicas de los objetos que destacan cuando el ambiente tiene una temperatura diferente.
- Microondas (a partir de 1mm a 1cm). Es de gran interés por ser un tipo de energía transparente a las nubes. (Ortiz, 2019, p.11)

1.1.4.2. Respuesta espectral de la vegetación

Todos los objetos situados sobre la superficie terrestre como el suelo, nubes, ciudades, cuerpos de agua, vegetación, nieve, entre otros, al entrar en contacto con la energía electromagnética emitida por una fuente reflejarán parte de esa energía dependiendo de su longitud de onda de una

forma característica, conocida como respuesta espectral o signatura espectral, (Castaño et al.,1996: p.185).

De las numerosas respuestas espectrales asociadas con los objetos de la superficie terrestre, es de interés particular el estudio de la respuesta espectral de la vegetación. En la Figura 6-1 se observa la forma característica de dicha respuesta espectral para diferentes clases de vegetación, se puede notar la baja reflectancia existente en el rango del espectro visible (de 0,4 a 0,7 μm) para cualquier tipo de vegetación, en el rango del color verde (entorno a los 0,5 μm) resalta un pico de valor de reflectancia debido a la presencia de la clorofila en las hojas, esta es la radiación que podemos observar y asociarla con la vegetación saludable; en la zona del infrarrojo cercano (0,7 a 1,3 μm) la reflectancia es muy alta ya que las plantas saludables absorben poca energía de este rango de longitudes de onda, también se observa que la reflectancia es menor en la vegetación seca o enferma; en el rango del infrarrojo medio (1,3 a 8 μm) la reflectancia disminuye significativamente porque el agua contenida en las plantas absorbe la energía de estas longitudes de onda. (Cede et al., 2011, p.187)

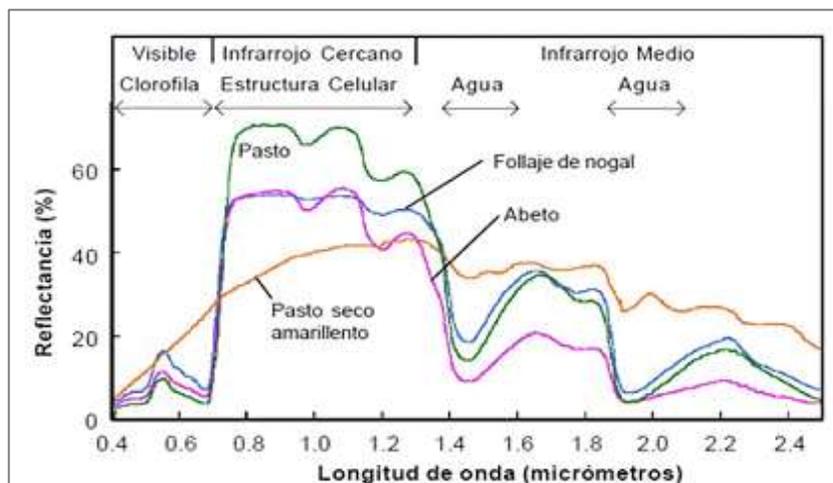


Figura 6-1: Respuesta espectral de la vegetación a la luz solar

Fuente: (Kharuf-Gutierrez et al., 2018)

1.1.4.3. El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Los índices de vegetación son una manera dinámica de estudiar el cambio de las coberturas terrestres basándose en la información proveniente de sensores de observación remota espaciales o aerotransportados (Ríos y Castillo 2004, p.3), los índices son en si operaciones algebraicas que se realizan con cada uno de los valores digitales de los pixeles entre las distintas bandas de una misma imagen, los resultados obtenidos de estas operaciones permiten diferenciar de mejor manera entre el suelo y la vegetación, así como determinar las cantidades y la vigorosidad de la vegetación según su contenido de clorofila, las bandas espectrales más usadas son: verde, rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo medio debido a que la respuesta espectral que tiene el agua, el suelo y la vegetación, presenta mayor actividad en estas bandas. (Muñoz, 2013, p.1; Ríos y Castillo, 2004, p.3)

El índice de vegetación de diferencia normalizada o NDVI por sus siglas en inglés (Rouse et al., 1974; citado en Muñoz, 2013). Es un índice que permite conocer tanto la cantidad de vegetación existente, así como la calidad de la misma, utiliza la reflectancia de las bandas del rojo y el infrarrojo cercano combinándolas en un cociente de la diferencia sobre la suma de dichas bandas, el resultado de la operación varía entre -1 a 1, la Tabla 1-1 muestra la interpretación aproximada de los distintos valores que puede tomar este índice. (Ortiz, 2019, p.43)

Tabla 1-1: Interpretación de los valores del NDVI

Valor del NDVI	Detalles
Menores a 0	Nubes, cuerpos de agua, nieve, edificaciones o vegetación muerta
0 - 0,33	Suelo desnudo, rocas o vegetación reseca y poco saludable
0,33 a 0,66	Vegetación sana
Mayores a 0,66	Vegetación muy saludable

Fuente: (Bravo, 2017)

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

El NDVI se calcula mediante la Ecuación 3-1 en donde:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad \text{Ecuación 3-1}$$

NIR: corresponde al valor de reflectancia o nivel digital de la banda del infrarrojo cercano.

RED: corresponde al valor de reflectancia o nivel digital de la banda del color rojo.

El NDVI pertenece al grupo conocido como índices “basados en la pendiente” porque al momento en el que se realiza el análisis de los valores resultantes, se comparan las pendientes de las líneas que atraviesan el origen y los píxeles representados en el gráfico como como el de la Figura 7-1 en donde los valores de reflectancia de la banda roja están ubicados sobre el eje X y los valores de la banda NIR en el eje Y. (Muñoz, 2013, p.3)

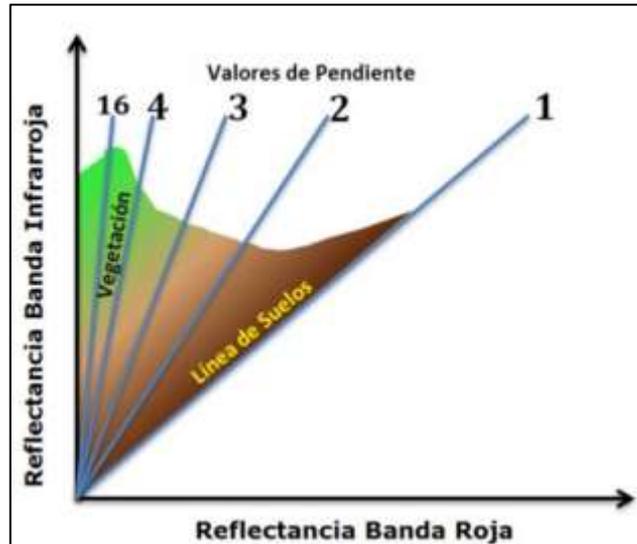


Figura 7-1: Distribución de los valores de reflectancias

Fuente: (Muñoz, 2013)

En el eje de coordenadas ROJO-NIR las rectas con diversos valores de NDVI convergen en el origen, las mismas representan el estado de salud de la vegetación la denominada línea de suelos representa a los valores de reflectancias del suelo desnudo y a medida que las rectas se alejan hacia la izquierda representan la vegetación más abundante y saludable. (Muñoz, 2013, p.4)

1.2. Sensores

Son los elementos encargados de captar los datos de la superficie que luego se almacenan digitalmente en forma de tablas y mapas, la gran demanda de estos elementos en el área de teledetección, ha provocado que en años recientes exista un gran avance en el desarrollo de nuevos sensores que cuentan con una alta resolución, gran fiabilidad y costo relativamente bajo, los sensores para teledetección más conocidos son: cámaras térmicas, sensores multiespectrales, sensores hiperespectrales, etc. Muchos de ellos especialmente diseñados para ser integrados a sobre VANT'S (vehículos aéreos no tripulados) la Tabla 2-1 muestra varios de los sensores existentes en el mercado junto con sus respectivas bandas espectrales de funcionamiento. (Díaz, 2015, pp: 7-14)

Tabla 2-1: Sensores utilizados en teledetección

Sensor	Número de bandas
Visible-RGB (cámara fotográfica)	380-780 nm
Visible (Cámara de Video)	380-780 nm
Infrarrojos	3 bandas 700-950 nm
Multiespectral	18 bandas 400-950 nm
Hiperespectral	400 bandas 450-950 nm
Térmico	8-12 um

Fuente: (Díaz, 2015)

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

1.2.1. La resolución de los sensores de observación remota

La resolución de un sistema sensor se define como la capacidad de registrar la información de la

superficie terrestre de manera detallada y depende del trabajo conjunto de los distintos componentes de dicho sistema, el significado de resolución abarca cuatro categorías: resolución espacial, resolución espectral, resolución radiométrica y resolución temporal. (Chuvieco, 1995, p.90)

1.2.1.1. Resolución espacial.

Es la capacidad para distinguir un objeto muy pequeño en una imagen, mide la separación existente entre dos objetos en una fotografía y es dependiente de la distancia del sensor a la superficie, en sensores óptico-electrónicos es la distancia sobre la superficie terrestre en metros que se corresponde con la unidad mínima de información de imagen llamada *pixel* es decir metros/pixel, en la Figura 8-1 se observa que mientras más pequeña es la distancia por pixel con más facilidad se puede distinguir a un objeto y sus detalles. (Bravo, 2017, p.12; Chuvieco, 1995, pp.90-91)

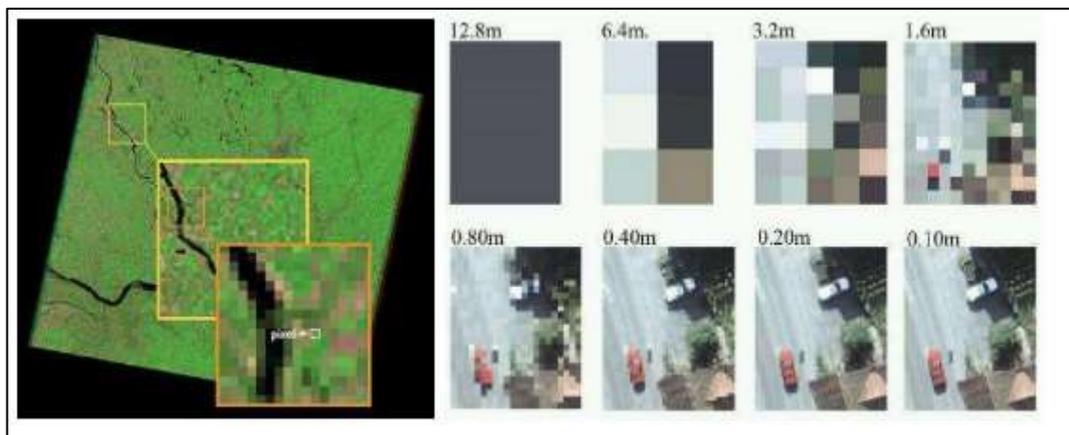


Figura 8-1: Resolución espacial de un sensor

Fuente: (Bravo, 2017)

1.2.1.2. Resolución espectral

Depende de la cantidad y el ancho de las bandas espectrales que puede detectar el sensor, es muy importante contar con información de varias bandas de frecuencia, cuanto mayor sea la resolución espectral de un sensor mayor será la información sobre el comportamiento de los objetos en la superficie. (Bravo, 2017, p.13). La Figura 9-1 muestra la resolución espectral del satélite Landsat 8 el cual consta de 11 bandas espectrales, cada una de las bandas desempeña tareas específicas como la bandas 1 y 9 sirven para corregir las distorsiones atmosféricas o las bandas 10 y 11 miden la energía térmica emitida por los objetos de la superficie, las bandas 2 a 4 captan la radiación visible y las bandas, la banda 5 capta la energía de infrarrojo cercano y las bandas 6 y 7 miden la energía del infrarrojo de onda corta (SWIR). (Rosentreter y Fenske, 2020)

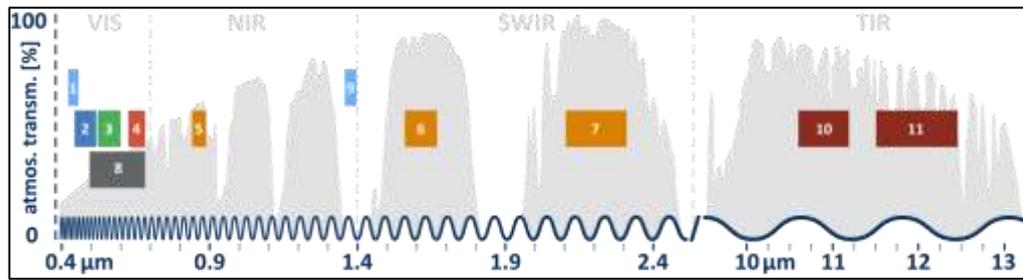


Figura 9-1: Resolución espectral del satélite Landsat 8

Fuente: (Rosentreter y Fenske , 2020)

1.2.1.3. Resolución radiométrica

Es la cantidad de bits disponibles para representar los niveles de brillo o la cantidad de tonos grises recogidos de una imagen, en los sensores ópticos-electrónicos cada pixel de la imagen puede tomar un valor específico en función de la resolución radiométrica, este valor es propio de cada sensor, por ejemplo, en la Figura 10-1 Landsat MS posee una profundidad de 8 bits por pixel, el satélite NOAA ofrece una profundidad de 10 bits por pixel. (Bravo, 2017, p.14)

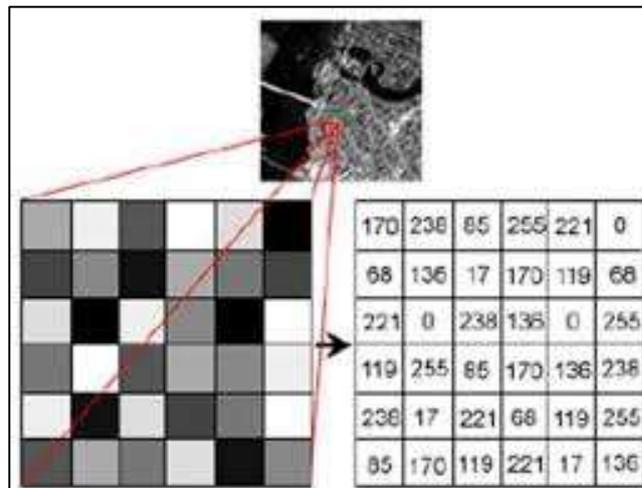


Figura 10-1: Resolución radiométrica del Landsat MS

Fuente: (Bravo, 2017)

1.2.1.4. Resolución temporal

Se trata del número de veces en un intervalo de tiempo en el que en los sensores de una plataforma de observación adquiere las imágenes de la misma zona de la cubierta terrestre, para las plataformas de observación satelitales la resolución temporal depende de la órbita en la que se ubiquen, por ejemplo, el satélite LANDSAT 8 tiene un periodo de revisita de 16 días. (Ortiz, 2019, p.14)

1.2.2. Tipos de sensores

Se pueden clasificar dos tipos básicos de sensores:

1.2.2.1. Sensores pasivos

Los sensores pasivos se limitan a recibir la energía que emiten ciertos objetos o la energía reflejada

por dichos objetos de una fuente como el sol, en cualquier caso la energía será la radiación electromagnética la cual proporciona información detallada de los objetos de la superficie terrestre (Bravo, 2017, p.11), los sensores que pertenecen a esta categoría son: Sensor fotográfico, sensor multiespectral, sensor hiperespectral y sensor térmico. (Díaz, 2015, pp.14-15)

1.2.2.2. *Sensores activos*

Este tipo de sensores detectan la radiación electromagnética reflejada por los elementos de la superficie terrestre pero la energía es generada por el mismo sistema sensor, tiene como ventaja de ser inmunes a la oscuridad o las condiciones atmosféricas adversas, son muy utilizados en la oceanografía y cartografía ejemplos de este tipo de sensores son el radar y el lidar (Avalos, 2012, p.18).

1.2.3. *El sensor multiespectral*

Este tipo de sensores abarcan varias bandas espectrales, tal es el caso de los sensores *Operational Land Imager (OLI)* y *Thermal Infra red Sensor (TIRS)* del satélite Landsat 8 que posee en conjunto 11 bandas espectrales, también existen sensores multiespectrales diseñados para montarlos sobre vehículos aéreo no tripulados como el de la Figura 11-1 que pueden tener hasta seis bandas espectrales, este tipo de sensores están enfocados al estudio de parámetros de la vegetación por lo que las bandas de frecuencia se encuentran en los rangos de verde, azul, rojo, e infrarrojos. (Díaz, 2015, p.14)



Figura 11-1: Sensor multiespectral Parrot Sequoia

Fuente: (MICASENSE, 2019)

La Tabla 3-1 muestra las principales características de varios sensores multiespectrales que han sido diseñados para la utilización en conjunto con los vehículos aéreos no tripulados.

Tabla 3-1: Características de las cámaras multispectrales con matriz de canales ópticos

Marca	Bandas espectrales	Resolución espacial	Peso (gramos)	Resolución radiométrica	Velocidad de disparo	Campo de visión	Conexiones	Dimensiones
SEQUOIA Parrot	4 (verde, rojo, borde rojo e infrarrojo cercano)	1280 x 960 píxeles 13 cm/píxel a 120 de altura de vuelo	72	10 bits	1 captura por segundo (todas las bandas)	61.9° HFOV	USB	5,9 cm x 4,1cm x 2,8 cm
MicaSense REDEEDGE-MX	5 Azul, verde, rojo, borde rojo, infrarrojo cercano NIR	1280 x 960 (1.2 MP por cada banda) 8 cm por píxel (por banda) a 120 m	232	12 bits	1 captura por segundo (todas las bandas)	47.2 ° HFOV 37 ° VFOV	USB Serial Ethernet WiFi	8.7cm x 5.9cm x 4.54cm
MicaSense Altum	6 bandas (rojo, verde, azul, borde rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo térmico)	2064 x 1544 (3.2 MP por cada banda) 160 x 120 infrarrojo térmico 5.2 cm por píxel a 120 metros	406.5	12 bits	1 capturapor segundo	48° HFOV multispectral 57° HFOV banda termica	WiFi Ethernet y USB	8.2 cm x 6.7 cm x 6.45 cm
Micasense Red edge-M	5 bandas (verde, rojo, borde rojo e infrarrojo cercano)	1280 x 960 (1.2 MP por cada banda) 8 cm por píxel a 122 metros	168	12 bits	1 captura por segundo (todas las bandas)	47.2 ° HFOV	Serial Ethernet GPS	9,4cm x 6,3cm x 4,6 cm

Fuente: (tycgis, 2019)

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

1.3. Plataformas de observación remota

1.3.1. Plataformas satelitales

Son satélites como el que se observa en la Figura 12-1, se clasifican según la órbita en la que se encuentren, los que se encuentran a una altura entre 600 y 900 kilómetros de altura, son de órbitas heliosíncronas (90° respecto al plano del Ecuador) los satélites como SPOT, Landsat, Sentinel, entre otros pertenecen a esta categoría y los satélites meteorológicos de órbita geostacionaria (36000 Km de altura). como: Meteosat y *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES), estas plataformas presentan limitaciones en cuanto a su resolución espacial debido a su altitud de operación, su resolución espectral es muy amplia ya que poseen sensores que detectan varias bandas y su resolución temporal dependerá de la órbita en la que se encuentren. (Martínez y Martín, 2010: pp.4-5)



Figura 12-1. Fotografía del satélite Landsat 8

Fuente: (EOS, 2020)

En la Tabla 4-1 se muestran las principales características de las plataformas satelitales más conocidas, también incluye información de los sensores, así como de los distintos tipos de resoluciones.

Tabla 4-1: Características de varias plataformas de observación satelitales

Descripción	PLATAFORMA						
	LANSAT 4	LANDSAT 5	LANDSAT 7	LANSAT 8	SENTINEL 2	EOS TERRA	EOS (TERRA Y AQUA)
Sensor	TM	TM	ETM+	OLI/TIRS	MSI	ASTER	MODIS
Altura de órbita	705 Km	705 Km	705 Km	705 Km	786 Km	708 Km	708 terra 705 aqua
Resolución radiométrica	8 bits	8bits	8 bits	16 bits	12 bits	8 y 16 bits	12 bits
Resolución espacial	30 m	30 m	30 m y 15m depende de de la banda espectral	30 m y 15m depende de la	10m, 20m y 60m depende de la banda	15m, 30m, y 90m depende de la	250m, 500m, 1000m Depende

				banda espectral	espectral	banda espectral	de la banda espectral
Resolución espectral	7 bandas	7 bandas	8 bandas	11 bandas	13 bandas	14 bandas	36 bandas
Resolución temporal	16 días	16 días	16 días	16 días	5 días	16 días	1 día
Dimensiones del campo de visión	180 Km x 180 Km	180 Km x 180 Km	180 Km x 180 Km	185 Km x 185 Km	290 Km Ancho de franja	60Km x 60Km	233 Km x 10 Km

Fuente: (Bravo, 2017)

Realizado por: Reinoso, Héctor, 2020

1.3.2. Plataformas aerotransportadas

Las plataformas aerotransportadas son principalmente aeronaves como de la Figura 13-1 transportan equipamiento como el Radar y el Lidar, las plataformas aerotransportadas presentan una resolución temporal que es dependiente de la disponibilidad de la aeronave y las condiciones atmosféricas, la resolución espectral y radiométrica dependerá del equipamiento que lleven a bordo y la resolución espacial de la altitud de vuelo, así como también la visibilidad del entorno. El uso de este tipo de plataformas es común en el ámbito militar o como complemento a la información proporcionada por las plataformas satelitales. (Palacios y Bueno, 2004, p.334)



Figura 13-1: Plataforma aerotransportada

Fuente: (Estomell, 2012)

1.3.3. Plataformas vehículos aéreos no tripulados (VANT'S)

Los vehículos aéreos no tripulados (VANTs), Unmanned Aerial Vehicle (UAVs) o Remotely Piloted Aircraft (RPAs) llamados también “drones” son pequeñas aeronaves fáciles de controlar desde un mando a distancia, pueden portar cámaras u otros dispositivos además de sensores que se usan en una infinidad de proyectos científicos y comerciales. (Leo, 2015, p.7; Reuter y Pedenovi, 2019, p.3)

En todo sistema de observación remota con drones pueden distinguirse dos segmentos claramente

definidos: (Giusiano, 2017, p.19)

- Segmento de vuelo: compuesto por el vehículo aéreo (marco, baterías, sensores, controladora, motores, etc.) y los medios de recuperación como el tren de aterrizaje, ruedas, cables, paracaídas, etc.
- Segmento de tierra: se compone de una estación de control que recibe la información del dron y a la vez envía órdenes y los sistemas lanzadores que pueden ser de tipo hidráulico, neumático, etc.

De manera general este tipo de plataformas se clasifican en dos tipos: (Díaz, 2015, pp.11-13)

- Ala fija: son más eficientes que los drones multirrotor, al ser muy veloces cubren grandes áreas lo que los hace idóneos para aplicaciones de cartografía y teledetección, requieren de espacio para el despegue y aterrizaje por lo que los hace menos maniobrables que los multirrotor, la Figura 14-1 (a) muestra este tipo de dron.
- Ala rotatoria: conocidos también como multirrotor o multicóptero, la sustentación del aparato se realiza mediante el giro de las hélices en el aire, permite un despegue y aterrizaje vertical, son muy maniobrables y precisos en los sobrevuelos, pueden elevar cargas voluminosas gracias a los multirrotor, la Figura 14-1 (b) muestra un aparato de este tipo.



Figura 14-1: Drones de ala fija y ala rotatoria

Fuente: (SITEP, 2020)

1.3.3.1. Drones comerciales

La oferta de este tipo de plataformas en el mercado es muy variada dependiendo de las aplicaciones, los drones para aplicaciones forestales y agrícolas son drones multirrotor como el mostrado en la Figura 17-1, ofrecen un tiempo de vuelo de hasta 30 minutos, pueden elevar un peso considerable y pueden cubrir una superficie de hasta 65 hectáreas, también se emplean los drones de ala fija por su mayor autonomía la cual ofrece hasta 90 minutos de vuelo y cubren un máximo de 3800 hectáreas, por lo general este tipo de drones acoplan en su parte inferior una cámara fotográfica, un sensor térmico multiespectral o un sistema de aspersión. (Pino, 2019, p.17)



Figura 15-1: Drone multirotor comercial

Fuente: (GEOCOM, 2020)

Las características más relevantes de los drones comerciales más populares para las aplicaciones antes mencionadas se muestran en la Tabla 5-1 dentro de la variada lista de características, unos drones sobresalen frente a otros, la elección del mismo dependerá de la misión objetivo, superficie a cubrir, la resolución espacial deseada, las condiciones para el aterrizaje y despegue, etc.

Tabla 5-1: Características de varios drones usados en teledetección

Marca	Modelo	Aeronave						Vuelo asistido	Dimensiones (mm)	Batería	Control remoto		
		Peso máximo de despegue (Kg)	Máxima resistencia al viento (m/s)	Velocidad máxima	Altura máxima (msnm)	Duración máxima de vuelo (minutos)	Capacidad/ voltaje/ tipo				Frecuencia (GHz)	Distancia máxima (Km)	Precio (dólares)
Dji	Phantom 4	1,38	10	20	6000	28	si	289,5x289,5 x196	5350 mAh 15,2V Tipo LiPO	2,4	5	2000	
GoPro	Karma	1,3	-	15	4500	15	no	303 x 411 x 117	5100mAh 14.8V LiPO	2,4	1	850	
Syma	X8 Pro	0,645	-	8	-	9	no	500x500x190	2000mAh 7.4 V tipo LiPO	2.4	0, 2	225	
Dji	Phantom 3	1,24	10	16	6000	23	si	290x290x193	4480 mAh 15,2V tipo LiPO 4S	2,4	5	1800	

Fuente: (DJI, 2020)

Realizado por: Reinoso, Héctor, 2020

1.4. Incendios Forestales

Un incendio forestal ocurre cuando el fuego se propaga de manera descontrolada en zonas con presencia de vegetación afectando a la flora y fauna del lugar. (SNGRE, 2019)

1.4.1. Características del fuego y de los incendios forestales

El fuego es una reacción química en la que intervienen tres elementos: material combustible, aire para obtener oxígeno y una fuente de calor esta última se encarga de llevar al combustible hasta el punto de encendido, los tres elementos mencionados forman parte del triángulo de fuego de la Figura 16-1. (Denham, 2007, p.3)

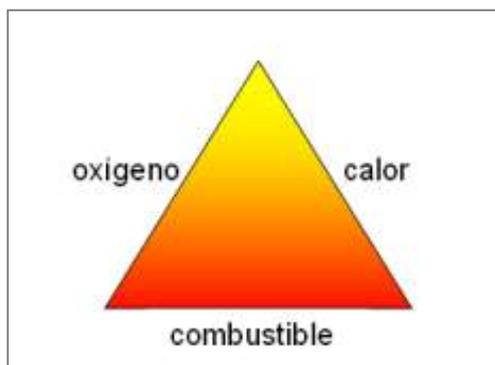


Figura 16-1: Triángulo de fuego

Fuente: (Denham, 2007)

Los incendios forestales se inician en un punto o foco y se extienden debido al calor que las llamas provocan. A pesar de que los tres elementos se pueden encontrar en cualquier zona con vegetación un foco de incendio no puede producirse si no se inicia, según la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE, 2019) los incendios forestales pueden iniciar por:

- Causas naturales como caídas de rayos, erupciones volcánicas o roce de ramas con líneas eléctricas de alta tensión.
- La actividad humana (antropogénica)
- Temporadas de estiaje prolongadas y calurosas que permite que el fuego se propague rápidamente sobre la vegetación seca.
- Fuertes vientos que avivan el fuego y lo extienden rápidamente.
- Porque concurren tres elementos químicos: oxígeno, calor y combustible

1.4.2. El combustible

Es uno de los factores más importantes dentro del triángulo del fuego, la mayoría de veces resulta ser un elemento decisivo en el comportamiento del incendio, el combustible vegetal tiene varias propiedades intrínsecas las cuales afectan a la intensidad y la rapidez de propagación del fuego estas son: (Zárate, 2004, p.44)

- Combustibilidad: es la capacidad de un sistema forestal para arder y propagar el fuego.

- Distribución espacial: se refiere a como se distribuye la vegetación sobre la superficie, tanto en el plano vertical y horizontal, la disposición puede ser de tipo continua o discontinua.
- Carga de combustible: cantidad de combustible seco por unidad de superficie se expresa en toneladas por hectárea (Tn/Ha).

1.4.3. Actividad fotosintética

El índice de vegetación normalizada o NDVI se puede utilizar para estimar la cantidad de vegetación sin importar que tipo de especies vegetales cubran la superficie, este índice es uno de los más utilizados debido a que permite establecer la relación entre la severidad del fuego y la cantidad de vegetación quemada. Por lo tanto, los diferentes valores del NDVI se pueden agrupar en diferentes categorías según la actividad fotosintética como se observa en la Tabla 6-1. (Moreno, 2016, p.255)

Tabla 6-1: Actividad fotosintética de la vegetación según el valor de NDVI

Actividad fotosintética	Valores de NDVI	Estado de la vegetación
Nula	Menor a 0	Vegetación muerta, objetos o suelos desnudos
Muy baja	0 a 0,1	
Baja	0,1 a 0,2	Vegetación poco saludable o reseca
Media	0,2 a 0,3	
Media-Alta	0,3 a 0,4	Vegetación saludable
Alta	0,4 a 0,6	
Muy alta	Mayor a 0,6	Vegetación muy saludable

Fuente: (Moreno, 2016)

Realizado por: Reinoso, Héctor, 2020

El daño causado por un incendio se puede evaluar comparando los valores del NDVI antes y después de un incendio forestal, los datos obtenidos en investigaciones como la realizada por Gerardo Moreno titulada: “ANÁLISIS DE INCENDIOS FORESTALES MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y TELEDETECCIÓN. ESTUDIO DE CASO EN SIERRA DE GATA”, mediante el uso de imágenes satelitales han revelado que en fechas previas al incendio el valor de la actividad fotosintética del lugar era en promedio mayores a 0,2 en un 88,6% de la superficie, mientras que en fechas posteriores al incendio la actividad fotosintética mayor a 0,2 era de apenas el 11,41% de la superficie, también la categoría de la actividad fotosintética previa al incendio independientemente del tipo de vegetación se encontraba entre media y baja , posterior al incendio paso a ser muy baja y nula. (Moreno, 2016, pp: 261-262)

1.4.4. Susceptibilidad de la vegetación frente a los incendios de la cobertura vegetal

Este parámetro está relacionado con las propiedades de la vegetación y se define como: “Características intrínsecas de la vegetación y los ecosistemas (carga de combustibles,

disposición y combustibilidad), que le brindan cierto grado de probabilidad de incendiarse, propagar y mantener el fuego”(IDEAM, 2011 ,p.14).

La susceptibilidad vegetal depende de los siguientes factores:(IDEAM, 2011, p.32)

- Tipo de combustible vegetal: es el combustible vegetal predominante en un ecosistema.
- Duración del combustible dominante: duración del combustible dominante en horas desde su ignición (1h,10h y 100h).
- Carga total de combustible: cantidad de combustible vegetal expresada en Toneladas por Hectárea (Tn/Ha).

Utilizando la clasificación de la cobertura vegetal según el sistema *Corine Land Cover nivel 3* (ver Anexo A), se puede obtener los factores antes mencionados para los principales tipos de cobertura vegetal con su respectiva calificación entre 1 y 5 dependiendo del comportamiento de cada factor para cada tipo de cobertura, como se observa en la Tabla 7-1. (IDEAM, 2011 ,p.36)

Tabla 7-1: Factores de la susceptibilidad de la vegetación frente a los incendios

Clasificación Corine Land Cover -Nivel 3	Tipo de combustible	Calificación	Duración de combustible	Calificación	Carga total de combustible	Calificación
3.1.5: Plantación forestal	Árboles	2	100 horas	2	más de 100 Tn/Ha	5
3.2.3 : Vegetación secundaria o en transición	Árboles y arbustos	3	10 horas	3	50-100 Tn/Ha	4
3.2.2: Arbustal	Arbustos	4	10 horas	3	50-100 Tn/Ha	4
3.2.1: Herbazal	Hierbas	4	10 horas	3	1-50 Tn/Ha	3
2.4.4: Pastos con espacios naturales	Pastos/Hierbas	4	1 hora	4	50-100 Tn/Ha	4
2.3.3: Pastos enmalezados	Pastos	5	1 hora	4	1-50 Tn/Ha	3
3.3.3: Tierras desnudas y degradadas	No combustibles	1	No combustibles	1	No combustibles	1

Fuente: (IDEAM, 2011)

Realizado por: Reinoso, Héctor, 2020

1.5. Tratamiento digital de imágenes

1.5.1. Concepto de imagen digital multiespectral

Las imágenes digitales multiespectrales están compuestas por varias matrices, en las que cada celda o pixel tiene asociado un valor numérico o Nivel Digital (ND), la imagen es obtenida mediante sensores óptico-electrónicos capaces de captar la radiación proveniente de las distintas coberturas en intervalos regulares y la almacenan en un pixel de una matriz específica dependiendo de la longitud de onda que pueda captar el sensor. La variedad de niveles digitales que puede almacenar un pixel depende de la resolución radiométrica del sensor, con una

resolución radiométrica de 8 bits los valores pueden variar entre 0 y 255 ; una vez que la radiación ha sido convertida a un valor numérico, la imagen digital multispectral correspondiente será almacenada en algún dispositivo magnético u óptico. (Lira, 2010, p.3-4; Flores, 2015, p.20)

En la Figura 17-1 se observa de manera gráfica como está compuesta una imagen digital multispectral, organizada de manera matricial donde los ejes X e Y corresponden a la ubicación espacial de la imagen (coordenadas geográficas), y el eje Z está conformado por las diferentes bandas espectrales o canales que los sensores son capaces de detectar. (Chuvieco, 1995, p.206)

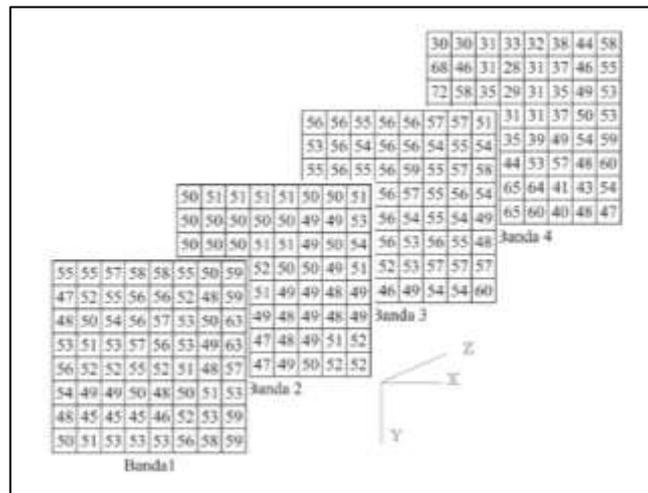


Figura 17-1: Imagen multispectral de cuatro bandas

Fuente: (Lira , 2010)

Las imágenes digitales se pueden almacenar en diferentes formatos, en donde cada formato presenta una extensión específica para cada archivo correspondiente, la Tabla 8-1 contiene los diferentes formatos de imágenes digitales más usados.

Tabla 8-1: Formatos de almacenamiento de imágenes digitales

EXTENSIÓN	NOMBRE	PROPIEDADES
GIF	Formato de intercambio de gráficos	Almacena imágenes de 8 bits Tiene como máximo 256 colores
JPEG	Grupo Conjunto de Expertos en Fotografía	Compresión con pérdida de datos Muy utilizado actualmente
BMP	Imagen de mapas de bits	Formato de imagen básico Compresión sin pérdida de datos Compresión de hasta un 10%
PNG	Gráficos de red portátiles	Formato de compresión sin pérdida 24 bits para representar colores
TIF/TIFF	Formato de imágenes etiquetadas	Formato detallado Guarda imágenes de alta calidad Guarda con 48 bits de color Alta compatibilidad
RAW	Bruto o Crudo	No realiza ningún proceso de compresión Almacenamiento sin realizar ningún tratamiento Formato disponible en cámaras digitales especializadas

Fuente: (Bautista, 2018)

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

Al momento de realizar el procesamiento de imágenes digitales, se manejan varios tipos de imágenes, como los que contiene la Tabla 9-1.

Tabla 9-1: Tipos de imágenes digitales

TIPO DE IMAGEN	PROPIEDADES
Imagen RGB (Red-Green-Blue)	Utiliza tres canales para reproducir los colores en la pantalla Utiliza 8 bits por canal (24 bits por cada pixel) Reproduce hasta 16,7 millones de colores
Imágenes indexadas	Reduce los colores a un máximo de 256 Tamaño reducido de la imagen
Imágenes en escala de grises	Utiliza diferentes tonalidades de gris Con 8 bits se puede representar hasta 256 tonos de gris Cada pixel tiene un valor de brillo entre 0 y 255
Imágenes binarias	Profundidad de 1 bit (valores de 0 o 1) Utiliza los colores blanco y negro para representar los pixeles de una imagen

Fuente: (Bautista, 2018)

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

1.5.2. Pre-procesamiento de datos

Son tratamientos digitales que se aplican a los valores numéricos de cada pixel, dichos tratamientos no son más que operaciones matemáticas como: cálculos estadísticos básicos, cálculos con matrices, etc. Que suprimen cualquier anomalía de las imágenes digitales provenientes de los distintos tipos de señales las cuales tienen una serie de distorsiones o errores respecto a la imagen real. (Basterra, 2011, p.27; Arozarena, 2016, p.9)

1.5.2.1. Correcciones geométricas

Este tipo de correcciones son necesarias debido a:

- El funcionamiento irregular de las plataformas de observación (drones, satélites, aviones, etc.) lo que repercute directamente en el movimiento del sensor (alabeo, cabeceo, cambio de altura y velocidad). (Arozarena, 2016, p.9)
- El objetivo de las correcciones geométricas es modificar la geometría de los pixeles de la imagen, generalmente orientado al cambio de un sistema geométrico a otro, tratando de mantener la radiometría de la imagen original. (Arozarena, 2016, p.9)

1.5.2.2. Correcciones radiométricas

Este tipo de correcciones están relacionadas con la resolución radiométrica de la imagen, son necesarias debido a que los pixeles pueden registrar valores numéricos erróneos durante la captura de los datos, los errores en los valores de los pixeles se pueden deberse a varios factores como: fenómenos de absorción y dispersión atmosférica o la mala calibración del sensor que contrarreste las deficiencias de construcción del mismo. Para llevar a cabo la corrección de los efectos atmosféricos se hace uso modelos matemáticos que relacionen el valor registrado del ND con los valores reales de la superficie observada, por otro lado, las deficiencias del sensor se corrigen mediante los datos de calibración asociadas al mismo. (Arozarena, 2016, p.9)

1.5.3. *Procesamiento de datos*

El procesamiento digital de imágenes es el conjunto de técnicas y procesos usados para descubrir o resaltar la información contenida en una imagen digital mediante el uso de un computador. (Torres, 1996, p.2)

1.5.3.1. *Segmentación de Imágenes*

La segmentación de imágenes es una técnica que consiste en subdividir una imagen en distintas partes o regiones con la finalidad de separar partes de interés del resto de la imagen, la segmentación también se considera como la clasificación de los píxeles de una imagen en diferentes clases con características propias, los algoritmos de segmentación de imágenes utilizan métodos como la detección de bordes, detección de líneas, detección de puntos aislados, umbralización, crecimientos de regiones, división y fusión de regiones. (Palomino y Román, 2012, p.11)

1.5.3.2. *Umbralización de imágenes*

Este procedimiento se utiliza para convertir una imagen en escala de grises Figura 18-1 (a) a una imagen en blanco y negro Figura 18-1 (b) asignando el color negro a todos los valores de gris menores a un valor específico (umbral) y un color blanco a todos los valores de gris superiores a dicho umbral como se observa en la Figura 24-1. (MathWorks, 2020)

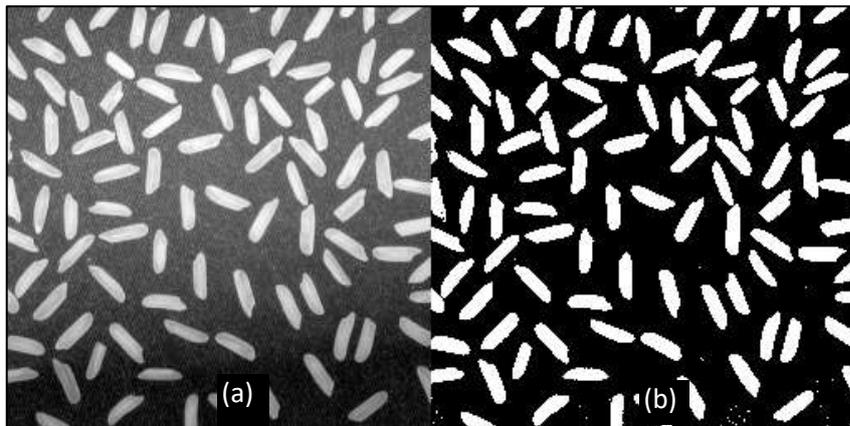


Figura 18-1: Umbralización de una imagen en escala de grises

Fuente: (MathWorks, 2020)

1.5.3.3. *Operaciones entre bandas*

Son procedimientos en los que se realizan operaciones matemáticas como: suma, resta, multiplicación y división de los valores o ND de cada píxel de una imagen multiespectral o multitemporal de la misma zona, se obtiene como resultado una nueva imagen, generalmente estas operaciones se usan para detectar cambios en sistemas dinámicos como los sistemas meteorológicos, coberturas vegetales, etc. (Salvatierra, 2004, pp.42-45; Arozarena, 2016, p.25)

1.5.3.4. *Clasificación de imágenes*

Es un procedimiento mediante el cual un computador agrupa píxeles de una imagen por clases o

categorías, parte de la premisa que los valores de nivel digital de cada pixel por banda, contiene información que identifica al objeto de la imagen multispectral, los sistemas de clasificación trataran de asignar cada pixel a una clase determinada para posteriormente mediante algoritmos formar clases correspondientes. Los métodos para realizar la clasificación son:(Arozarena, 2016, p.26-27)

- Clasificación no supervisada: en este método se agrupa pixeles con similares valores radiométricos en cada banda espectral basándose en fórmulas matemáticas, en este método no se conoce de antemano información real sobre el terreno de dichas agrupaciones, posteriormente se deberá interpretar y modificar dichas clases con la ayuda de información existente (mapas, fotos aéreas, etc.). El algoritmo de clustering, ISODATA o k-means es el más usado en este tipo de clasificación, es un proceso iterativo que consiste en: definir el número de clases a separar (valores k), mediante la distancia euclídea determinar un estimador matemático discriminante, definir el centroide de cada clase en el espacio espectral, asignar cada pixel al centroide más próximo según el estimador matemático, como resultado se obtiene un clúster y a partir de la anterior clasificación se obtienen nuevos centroides de clase, los cuales sí coinciden con los anteriores centroides el proceso iterativo termina. (Arozarena, 2016, p.27)

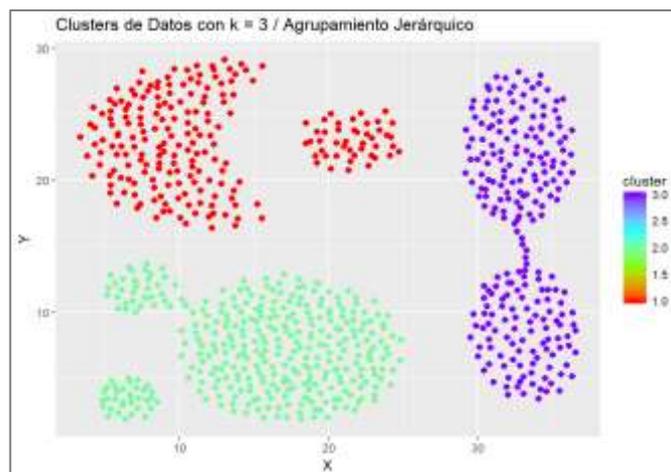


Figura 19-1: Clasificación no supervisada mediante clustering

Fuente: (Delgado, 2019)

- Clasificación supervisada: para este tipo de clasificación es necesario conocer de antemano las clases u objetos que existen en la imagen, posteriormente se seleccionan muestras representativas en la imagen que servirán para posteriormente mediante criterios estadísticos agrupar cada pixel en diversas clases definitivas. (Arozarena, 2016, p.28). Este tipo de clasificación cuenta con dos etapas, la etapa de entrenamiento en la cual el intérprete identifica áreas de entrenamiento, delimitando sobre la imagen original grupos de pixeles correspondientes a las diferentes clases temáticas como pueden ser zonas arbustivas, bosques, agua, hielo, áreas agropecuarias, etc. Una vez creadas las áreas de entrenamiento se calculan diversas operaciones de estadística elemental en cada clase: media, desviación estándar, rango, separabilidad, a partir de los valores de ND de todos los pixeles; posteriormente en la etapa de clasificación se agrupan los ND de cada pixel en

una clase temática correspondiente, para lo cual se empleará diversos procedimientos matemáticos como: clasificación por paralelepípedos, clasificación por mínima distancia, máxima verosimilitud, entre otros. (Suquilanda, 2020, pp. 27-28)

1.5.4. Software de procesamiento de imágenes

El procesamiento de las imágenes capturadas se realizó mediante el programa MATLAB y Agisoft Metashape en sus versiones estudiante y prueba respectivamente, puntualizados a continuación.

1.5.4.1. Matlab.

MATLAB (*Matrix Laboratory*) es un lenguaje de alto desempeño que permite realizar una variedad de cálculos numéricos con vectores y matrices, como caso particular puede también trabajar con números escalares tanto reales como complejos, al ser MATLAB una herramienta especializada en el manejo de matrices permite realizar fácilmente operaciones sobre imágenes de tipo RGB, TIFF o RAW, ya que estas imágenes se almacenan como vectores bidimensionales (matrices), en cuanto al procesamiento de imágenes destaca la *Toolbox* llamada “*Image Processing Toolbox*”. La cual proporciona un conjunto completo de algoritmos estándar de referencia y aplicaciones de flujo de trabajo para el procesamiento, análisis y la visualización de imágenes, así como para el desarrollo de algoritmos. Entre otras características que ofrece Matlab están: control de flujo, gestión de errores, programación orientada a objetos, creación de interfaces graficas mediante el “*Graphical User Interfase Development Environment (GUIDE)*”, comunicación con programas en otros lenguajes de programación, etc.(Bautista, 2018, pp.43-44)

1.5.4.2. Agisoft Metashape

Es un software lanzado al mercado en 2010 especializado en el procesamiento de imágenes digitales y generación de mapas espaciales en 3D para el uso en Sistemas de Información Geográfica (SIG), Agisoft se utiliza ampliamente en: triangulación fotogramétrica, modelado de elevaciones digitales, generación de orto mosaicos georreferenciados, medición de distancias, áreas, volúmenes, procesamiento de imágenes multiespectrales y térmicas, modelado en 3D con texturizado, procesamiento de imágenes de satélite, procesamiento en la nube, etc. (Agisoft, 2020)

CAPÍTULO II

2. METODOLOGÍA PARA LA ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE LOS DATOS

2.1. Escenario

El área de estudio se encuentra dentro de la jurisdicción de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, el área abarca el “Bosque de los búhos” como se observa en la Figura 1-2, las coordenadas del lugar son: $78^{\circ}41'6.91''\text{O}$ $1^{\circ}38'57.61''\text{S}$, se encuentra a una altitud de 2850 m.s.n.m, el lugar presenta una temperatura promedio de 13.9°C , precipitación anual de 385.4 mm y una humedad relativa promedio de 74.5%, el suelo presenta una textura arenosa con una densidad de 13,5 gr/cc el suelo tiene un bajo contenido de nitrógeno y fósforo, altos niveles de potasio, niveles medios de materia orgánica y un pH neutro. (Lozano et al., 2018, p.14)

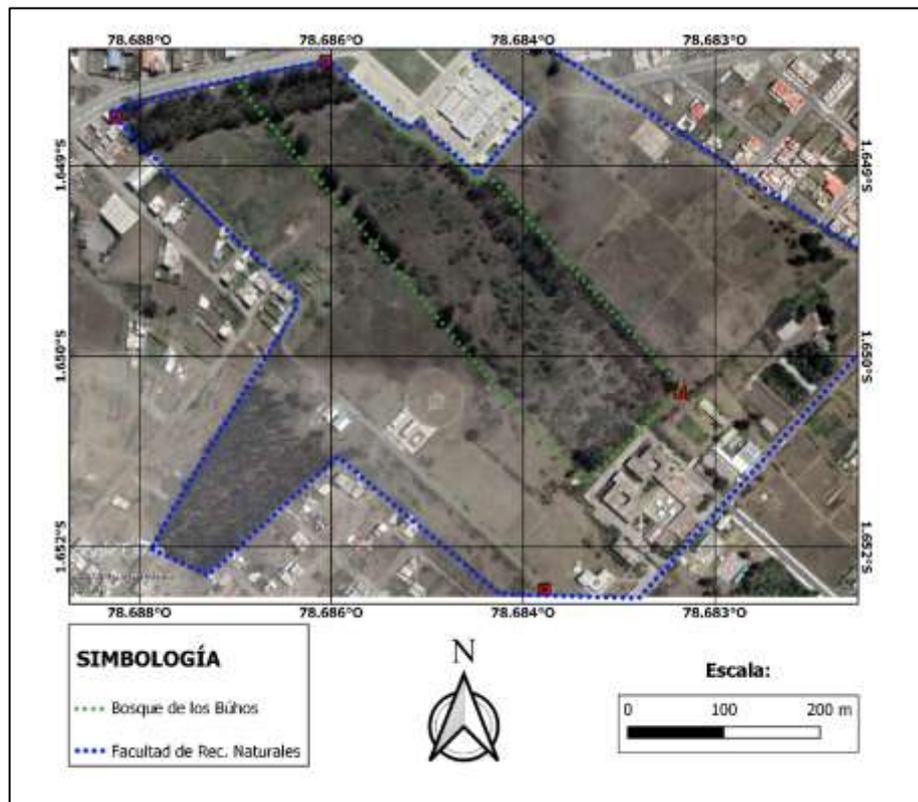


Figura 1-2: Área de estudio

Fuente: (GoogleEarth, 2020)

La flora del lugar ha sido estudiada y clasificada en tres diferentes estratos los cuales son: estrato arbóreo, estrato arbustivo y el estrato herbáceo.

- Estrato arbóreo, según su nombre común a este estrato pertenecen: el capulí, Puma maki, acacia amarilla, acacia fina, algarrobo, guarango, nogal, eucalipto, cholán, quishuar, cepillo rojo, ciprés y molle. (Lozano et al., 2018, pp:16-20)

- Estrato arbustivo, a este estrato listando su riqueza florística por sus nombres comunes pertenecen: Agave azul, agave verdeo pita, cactus o tuna, retama amarilla, Izo, lantana morada, supirrosa, sixe o carrizo de pampa, chamana. (Lozano et al., 2018, pp:16-20)

- Estrato herbáceo, a este estrato conocidos por sus nombres comunes pertenecen: amor seco, ñachak, orejas de conejo, tagetes, macela, lechuguilla, aliso de mar, garra de tigre, cedillo, falso chocho, tronadora, chipil, urañan, llantén monte, huaicundo paridor, flatsedge, grama fina, paja, sacama, avena loca, helecho, nigua, faroles, musgo, hierba mora, chamico y abrojo. (Lozano et al., 2018, pp:16-20)

En cuanto a la fauna que se puede encontrar en este bosque aves, como: búhos, tórtolas, colibríes, etc., también una variedad de insectos como: saltamontes, moscas, abejas y artrópodos en general, también se ha podido observar lagartijas y madrigueras de roedores. Otras características del lugar están que presenta una topografía regular y en cuanto a su hidrografía no cuenta con fuentes de agua ni ningún río, las precipitaciones son la única fuente de agua. El lugar de estudio a partir agosto del 2016 paso a ser nombrado sendero ecológico de la Facultad de Recursos Naturales, se compone de dos senderos llamados “Flora Nativa” y “de los Búhos” El Sendero de Flora Nativa tiene un recorrido de 187 metros, mientras que el Sendero de los Búhos cuenta con un recorrido de 540 metros, ambos senderos recorren la zona de estudio, en donde se puede observar una variada flora y fauna propia de la zona (ESPOCH, 2016).

Debido a que el lugar alberga varias especies tanto de plantas como de animales además de ser una de las pocas áreas verdes dentro del área urbana, es necesario determinar el riesgo de la zona frente a un incendio forestal, con la finalidad de establecer medidas de prevención y mitigación.

2.2. El nivel de riesgo de incendio forestal de la zona de estudio

El riesgo de incendio forestal está condicionado por varios factores como:

- Características de la vegetación y su estado
- Condiciones meteorológicas
- Condiciones socio-económicas de la población
- Orografía, etc.

Dentro de todos estos factores, de acuerdo con Zárate (2004, p.44) el material vegetal combustible es un factor muy relevante y en varias ocasiones decisivo en el comportamiento de un incendio por lo tanto, los parámetros para determinar el nivel de riesgo de incendio forestal estarán directamente relacionados con el estado de la vegetación.

2.2.1. Porcentaje de la cubierta vegetal en riesgo de ignición

Este parámetro se puede determinar a partir de la información acerca de la actividad fotosintética de la vegetación de la Sección 1.4.3, se categoriza según el riesgo de ignición y se le asigna una calificación dependiendo del porcentaje de vegetación que se encuentra en el rango de actividad fotosintética media y baja como muestra la Tabla 1-2.

Tabla 1-2: Porcentaje de la cubierta vegetal en riesgo de ignición

Actividad fotosintética media y baja	Categoría	Calificación
Menor al 10%	Muy baja	1
10% - 35%	Baja	2
35% - 50%	Moderada	3
50% - 75%	Alta	4
Mayor al 75%	Muy alta	5

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

2.2.2. Susceptibilidad de la vegetación a los incendios forestales

Para identificar la susceptibilidad de las distintas coberturas vegetales a los incendios forestales a partir de la información de la Sección 1.4.4, se realizó un proceso de recalificación y recategorización en función de los distintos tipos de combustibles representativos del entorno, posteriormente se los calificó en un rango del 1 al 5 otorgándoles mayores valores a aquellos combustibles que presenten mayor susceptibilidad a los incendios tal como se observa en la Tabla 2-2. (Chivatá, 2017, p.13)

Tabla 2-2: Susceptibilidad de la cubierta vegetal a los incendios

Combustible dominante	Susceptibilidad	Calificación
Arboles	Baja	2
Árboles y arbustos	Moderada	3
Arbustos	Alta	4
Hierbas	Alta	4
Pastos / Hierbas	Muy alta	5
Pastos	Muy alta	5
No combustibles	Muy baja	1

Fuente: (Chivatá, 2017)

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

2.2.3. Índice de riesgo de incendio (IRI)

$$IRI = Pv * Sc$$

Ecuación 1-2

Donde:

- Pv : es la calificación del porcentaje de la cubierta vegetal en riesgo de ignición
- Sc : es la calificación de la susceptibilidad de la cubierta vegetal a los incendios

El IRI expresa que tan expuesta esta la superficie vegetal a sufrir un incendio ya sea provocada por causas naturales o antropogénicas, el resultado de la Ecuación 1-2 se lo categoriza mediante la tabla de doble entrada de la Figura 2-2 en donde:

- Verde: Riesgo de incendio bajo o nulo
- Amarillo: Riesgo de incendio moderado
- Naranja: Riesgo de incendio Alto
- Rojo: Riesgo de incendio Muy alto

		Porcentaje de vegetación (Pv)				
		1	2	3	4	5
Susceptibilidad del combustible (Sc)	1	1	2	3	4	5
	2	2	4	6	8	10
	3	3	6	9	12	15
	4	4	8	12	16	20
	5	5	10	15	20	25

Figura 2-2: Categorización del IRI

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

2.3. Hardware

2.3.1. Componentes del sistema

Con la finalidad de diseñar el sistema para la adquisición de imágenes aéreas multiespectrales mediante la plataforma aérea (dron y cámara), es necesario realizar una comparación entre las diferentes alternativas de los elementos que conformaran el sistema, para seleccionar las opciones que mejor se ajusten a las necesidades del proyecto.

2.3.1.1. Plataforma aérea (drone)

De acuerdo con Bautista (2018, p.33) los criterios sobre los que se selecciona un vehículo aéreo no tripulado para utilizarlo como plataforma de observación remota son:

- Facilidad de manejo
- Portabilidad
- Capacidad de carga
- Autonomía

La Tabla 3-2 muestra la valoración de 1 a 5 siendo 1 el menos apto y 5 el más apto para la utilización en el proyecto de cada uno de los modelos de drones comerciales considerados en la Tabla 5-1 mostrada en el capítulo anterior, la valoración se asigna dependiendo del desempeño del drone en un criterio determinado, posteriormente se suma el puntaje y se selecciona la opción con la mayor calificación.

Tabla 3-2: Calificación para la plataforma aérea (drone)

	Dji Phantom 3	Dji Phantom 4	GoPro Karma	Syma X8 pro
Facilidad de manejo	5	5	3	3
Portabilidad	4	5	3	2
Capacidad de carga	3	5	4	1
Autonomía	4	5	2	1
Total	16	20	12	7

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

Tomando en consideración los valores de la suma total de Tabla 3-2, resaltan dos opciones con los puntajes mayores y teniendo en cuenta que el precio del Phantom 3 es 1800 dólares y el Phantom 4 es de 2000 dólares, se utilizará como plataforma aérea es el drone Phantom 3 ya que ofrece similares prestaciones al Phantom 4.

2.3.1.2. Cámara multiespectral

La adquisición de imágenes multiespectrales (espectro visible e infrarrojos) requiere sensores remotos o cámaras multiespectrales, dentro de la variada oferta existente en el mercado, al igual que con los drones se debe establecer criterios que permitan elegir la opción que más se ajuste a los requerimientos del proyecto, según Bautista (2018, p.39) dichos criterios son:

- Resolución de la imagen
- Dimensiones
- Peso
- Número de bandas
- Intervalo de captura

La Tabla 4-2 muestra la valoración de cada uno de los modelos de cámaras multiespectrales a partir de la información de la Tabla 3-1 del capítulo anterior, el procedimiento para la valoración de cada modelo comercial de cámara es igual al utilizado para el drone, posteriormente se suma el puntaje y se selecciona la opción con la mayor calificación.

Tabla 4-2: Calificación para la cámara multiespectral

	Sequoia Parrot	MicaSense Rededge Mx	MicaSense Altum	Micasense Red edge M
Resolución	2	4	5	4
Dimensiones	5	4	3	3
Peso	5	3	1	3
Numero de bandas	3	4	5	4
Intervalo de captura	5	5	5	5
Total	20	20	19	19

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

Al observar la Tabla 4-2, se concluye que la mejor opción de cámara multispectral está dividida entre la Sequoia Parrot y la MicaSense Rededge MX, sin embargo, la cámara Sequoia Parrot sobresale entre las demás por sus dimensiones reducidas y peso ligero, razón por la cual se optará por la opción MicaSense Rededge MX ya que ofrece mejores prestaciones en cuanto a número de bandas y resolución espacial.

2.3.2. Sistema de adquisición de imágenes

El sistema diseñado para la adquisición de imágenes consta de los dos dispositivos anteriormente seleccionados, el sensor multispectral cámara MicaSense MX Rededge y el dron Phantom 3. La cámara Rededge-MX cuenta con 4 conectores: alimentación/disparo de captura (PWR/TGR), módulo sensor de luz DSL/módulo GPS (DSL/GPS), conector USB para el módulo Wi-fi y puerto de conexión Ethernet (COMM). Para la captura de imágenes se realizará una configuración de componentes de manera que se pueda integrar la plataforma aérea y la cámara tal como se puede observar en la Figura 3-2, el tiempo de captura entre imágenes se configurará mediante el temporizador del software de la cámara, de esta forma se puede controlar el número de fotografías a capturar durante todo el recorrido del dron. La alimentación se realizará mediante una batería externa a través del conector PWR. (MICASENSE, 2019)

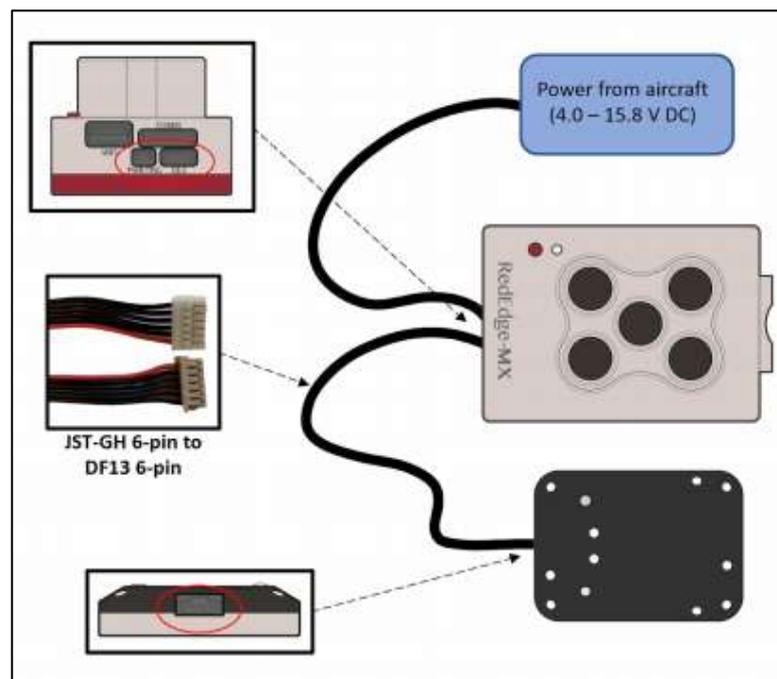


Figura 3-2: Conexión de los elementos del sensor MicaSense Rededge MX

Fuente: (MICASENSE, 2019)

Debido a que el estabilizador de la cámara (gimbal) del Phantom 3, no permite enganchar la cámara multispectral, se ha diseñado un adaptador como el que se observa en la Figura 4-2 (a), para que permita anclar la cámara al dron, para crear el adaptador se ha utilizado un programa

de modelamiento tridimensional y una impresora 3D, la pieza obtenida es la que se observa en la Figura 4-2 (b), esta debe ser resistente, ligera y se debe fijar firmemente al dron.

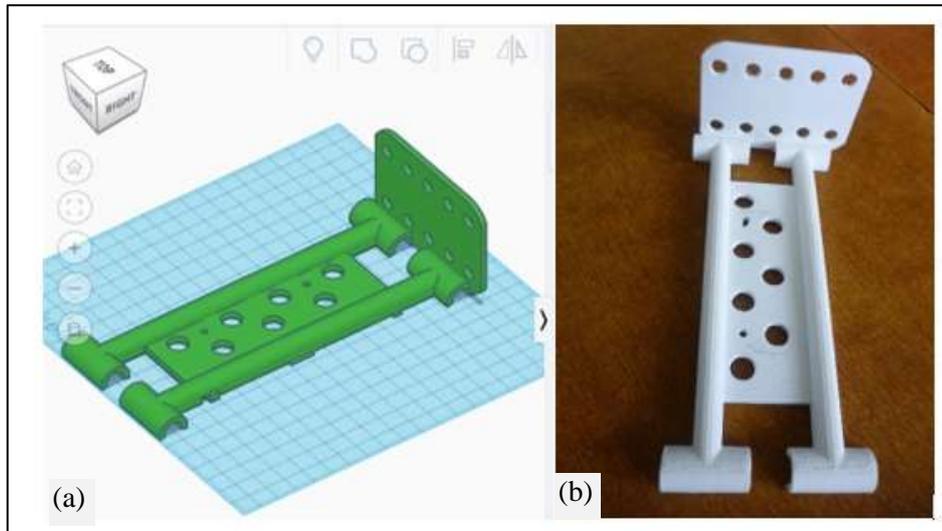


Figura 4-2: (a) Vista del diseño del soporte (b) soporte impreso

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

En la Figura 5-2 se observa el sistema de adquisición de imágenes, al adaptador van anclados tanto la cámara Micasense Rededge MX y la batería externa para la alimentación de la cámara el adaptador a su vez está acoplado en el dron Phantom 3, también se puede observar el módulo GPS/ DSL montado en un soporte.

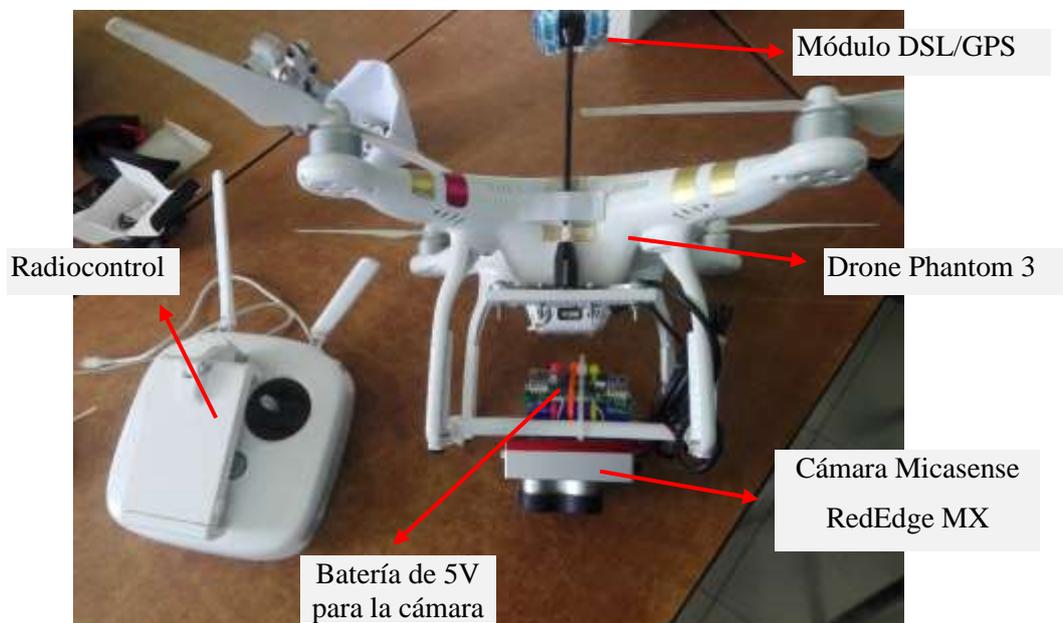


Figura 5-2. Sistema de adquisición de imágenes

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

2.4. Software

2.4.1. Software de la cámara Micasense RedEdge MX

Para poder realizar la captura de imágenes, la cámara multiespectral precisa de una configuración previa al vuelo, se accede al menú de la cámara mediante una interfaz Wi-Fi o Ethernet, utilizando la dirección IP 192.168.10.254 y la contraseña “micasense”, una vez habilitado el menú, se despliega la interfaz de la Figura 6-2. En la que se puede observar el resumen general del estado de la cámara.



Figura 6-2: Menú “Home” de la cámara MicaSense

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

Para configurar el modo de captura, se debe seleccionar la opción “settings” como se muestra en la Figura 7-2, seguidamente configurar el modo de auto captura en “timer”, el periodo de captura en 2 segundos y la altitud de inicio de captura en 20 metros, una vez realizados estos ajustes deberán ser guardados mediante la opción “save”.

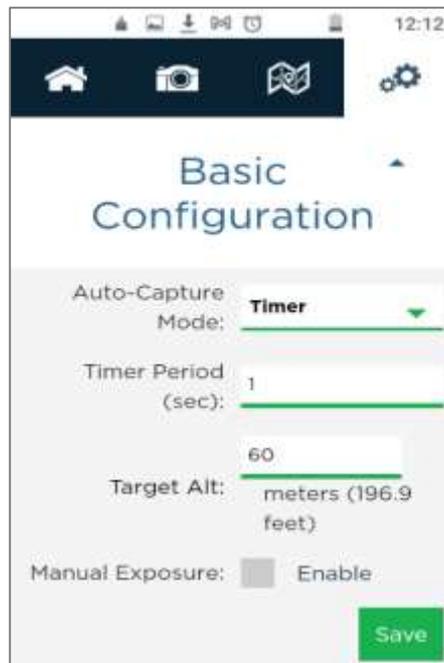


Figura 7-2: Menú “*settings*” de la cámara MicaSense

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

Para realizar el posterior preprocesamiento a la adquisición de imágenes, es necesario realizar las capturas del panel de reflectancias que viene con la cámara, primero se coloca el panel sobre el piso, después se coloca la cámara a un metro de altura sobre el panel sin provocar sombras sobre el mismo, seguidamente se debe abrir la pestaña “*Live View*” del menú y seleccionar la opción “QR”, como se muestra en la Figura 8-2.

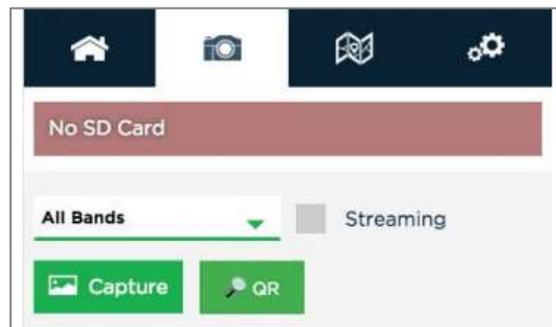


Figura 8-2: Menú “*Live View*” de la cámara MicaSense

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

La cámara detectará el código QR del panel de reflectancias y realizará las capturas de manera automática, como se muestra en la Figura 9-2.



Figura 9-2: Captura del panel de reflectancias en la banda roja

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

2.4.2. Preprocesamiento de imágenes

La finalidad de realizar el preprocesamiento de las imágenes crudas obtenidas por la cámara multiespectral es obtener una representación lo más exacta posibles de los valores reflejados por la superficie estudiada. En el caso de el sensor Micasense Rededge MX, precisa de una calibración radiométrica la cual convierte los valores de los píxeles en valores de radiancia espectral absoluta la corrección radiométrica consiste en realizar varios ajustes como: (MicaSense Knowledge Base, 2020)

- Compensar el nivel de negro del sensor
- Ajustar el tiempo de exposición y la ganancia de cada sensor
- Compensar la sensibilidad del sensor
- Ajustar los efectos de viñeta del lente

La Ecuación 2-2 representa al modelo de calibración radiométrica RedEdge utilizado para calcular la radiancia absoluta. (MicaSense Knowledge Base, 2020)

$$L = V(x, y) * \frac{a_1}{g} * \frac{p - p_{BL}}{t_e + a_2 y - a_3 t_e y} \quad \text{Ecuación 2-2}$$

Donde:

- p : es el valor del píxel sin procesar normalizado entre 0 y 1
- p_{BL} : es el valor del nivel de negro normalizado contenido en los metadatos
- a_1, a_2, a_3 : son los coeficientes de calibración radiométrica
- $V(x, y)$: es la función polinomial de viñeta para la ubicación de píxeles (x, y)
- t_e : es el tiempo de exposición de la imagen

- g : es la configuración de ganancia del sensor contenida en los metadatos
- x, y : son la columna de píxeles y el número de fila, respectivamente
- L : es la radiancia espectral en $W/m^2 / sr / nm$

El modelo de viñeta se utiliza para corregir la disminución a la sensibilidad de la luz por parte de los píxeles más alejados del centro de la imagen, RedEdge utiliza el modelo de viñeta radial descrito mediante la Ecuación 3-2, Ecuación 4-2 y Ecuación 5-2. (MicaSense Knowledge Base, 2020)

$$r = \sqrt{(x - C_x)^2 + (y - C_y)^2} \quad \text{Ecuación 3-2}$$

$$k = 1 + k_0 * r + k_1 * r^2 + k_2 * r^3 + k_3 * r^4 + k_4 * r^5 + k_5 * r^6 \quad \text{Ecuación 4-2}$$

$$V(x, y) = \frac{I(x, y)}{k} \quad \text{Ecuación 5-2}$$

Donde:

- r : es la distancia del píxel (x, y) desde el centro de la viñeta, en píxeles
- (x, y) : es la coordenada del píxel que se está corrigiendo
- k : es el factor de corrección por el cual se debe dividir el valor de píxel sin procesar para corregir la viñeta
- $I(x, y)$: es la intensidad original del píxel en x, y
- $V(x, y)$: es la intensidad corregida de píxel en x, y

1.1.1.1. Corrección radiométrica en Software Agisoft

Al realizar la corrección radiométrica utilizando el software Agisoft, se realizan automáticamente los cálculos entre los metadatos, las imágenes y las Ecuaciones 2-2, 3-2, 4-2 y 5-2 los pasos para realizar la calibración de reflectancias son:

1) Agregar fotos: Las imágenes de MicaSense RedEdge-MX se pueden cargar todas a la vez para todas las bandas. Abrir el menú “Workflow” y elegir la opción “Add Photos”, seleccionar todas las imágenes, incluidas las imágenes de calibración de reflectancia, y hacer clic en el botón “Ok”. En el cuadro de diálogo “Add Photos” de la Figura 10-2, elegir la opción “Multi-camera system”.

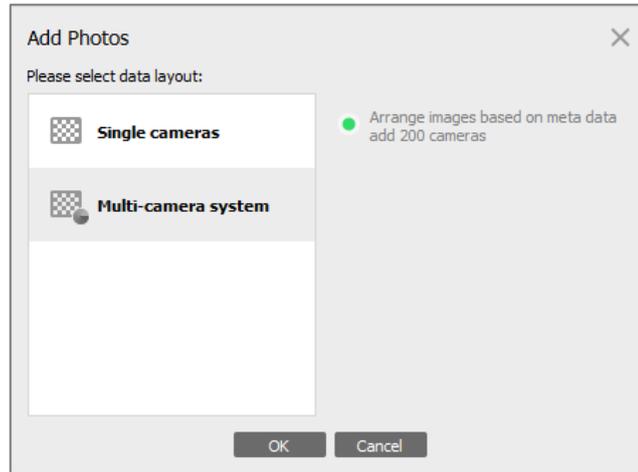


Figura 10-2: Menú para agregar fotos

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

2) Ubicar los paneles reflectantes e ingresar los valores de calibración: Abrir el menú “*Tools*” y elegir la opción “*Calibrate Reflectance*” se despliega el menú de la Figura 11-2, presionar el botón “*Locate Panels*”, luego ingresar manualmente los valores de reflectancia del panel de calibración impresos en el mismo correspondientes a cada banda, luego marcar las opciones “*Use reflectance panels*” y “*Use sun sensor*” en el cuadro de diálogo y hacer clic en “*Ok*” para iniciar el proceso de calibración.

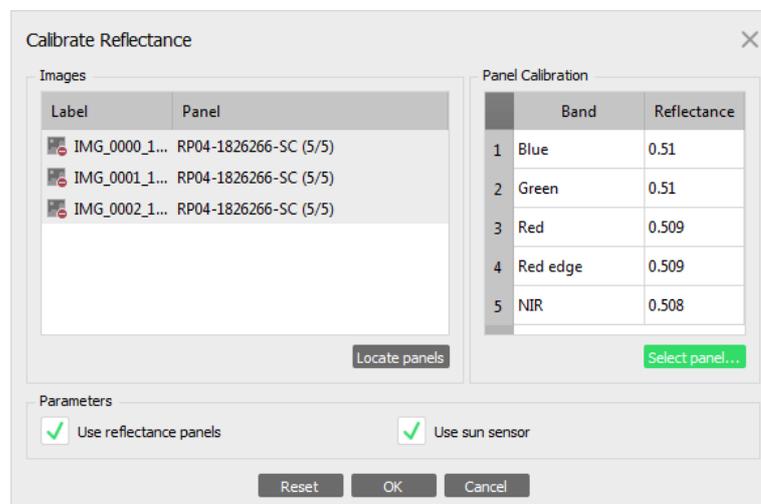


Figura 11-2: Menú para calibrar reflectancias

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

3) Exportar las imágenes calibradas: los pasos son *File*→*Export*→*Convert Images*, dejar los parámetros por defecto y pulsar en “*Ok*”, seguidamente se debe seleccionar la carpeta donde se guardará las imágenes corregidas.

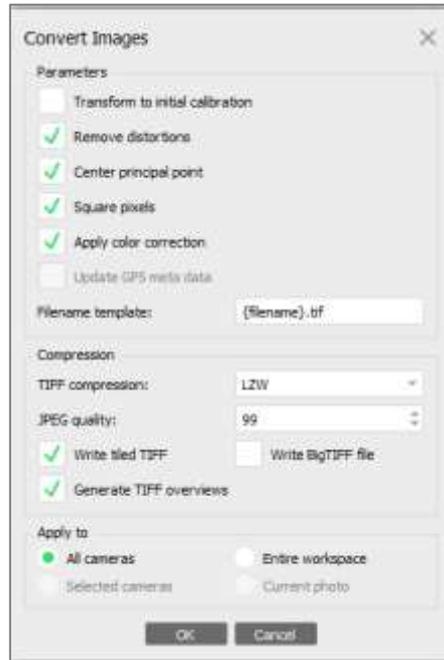


Figura 12-2: Menú para exportar las imágenes calibradas

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

El resultado de la calibración se observa en la Figura 13-2, al lado izquierdo (a) la imagen cruda sin procesar y al lado derecho (b) la imagen con la calibración de reflectancias.

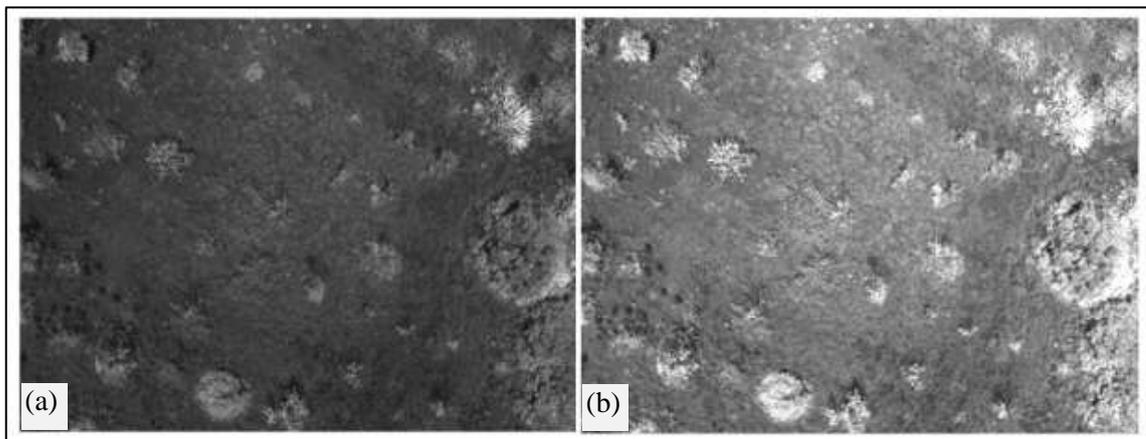


Figura 13-2: Resultado de la corrección radiométrica en una imagen sin procesar

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

2.4.3. Procesamiento digital de imágenes

Las capturas obtenidas por el sistema de adquisición de imágenes son almacenadas en formato TIFF, estas imágenes están compuestas por cinco diferentes matrices donde cada una representa un canal (visible e infrarrojo), las matrices serán seleccionadas para realizar cálculos entre bandas, realizar la clasificación no supervisada y segmentar los valores. El algoritmo de procesamiento de imágenes se lo desarrolló utilizando el programa computacional MATLAB.

2.4.3.1. Diseño del Algoritmo de procesamiento digital de imágenes

La Figura 14-2 muestra un diagrama de flujo resumido con las funciones y operaciones más importantes empleadas por el algoritmo de procesamiento de imágenes, para una mejor comprensión del funcionamiento del algoritmo (ver Anexo B).

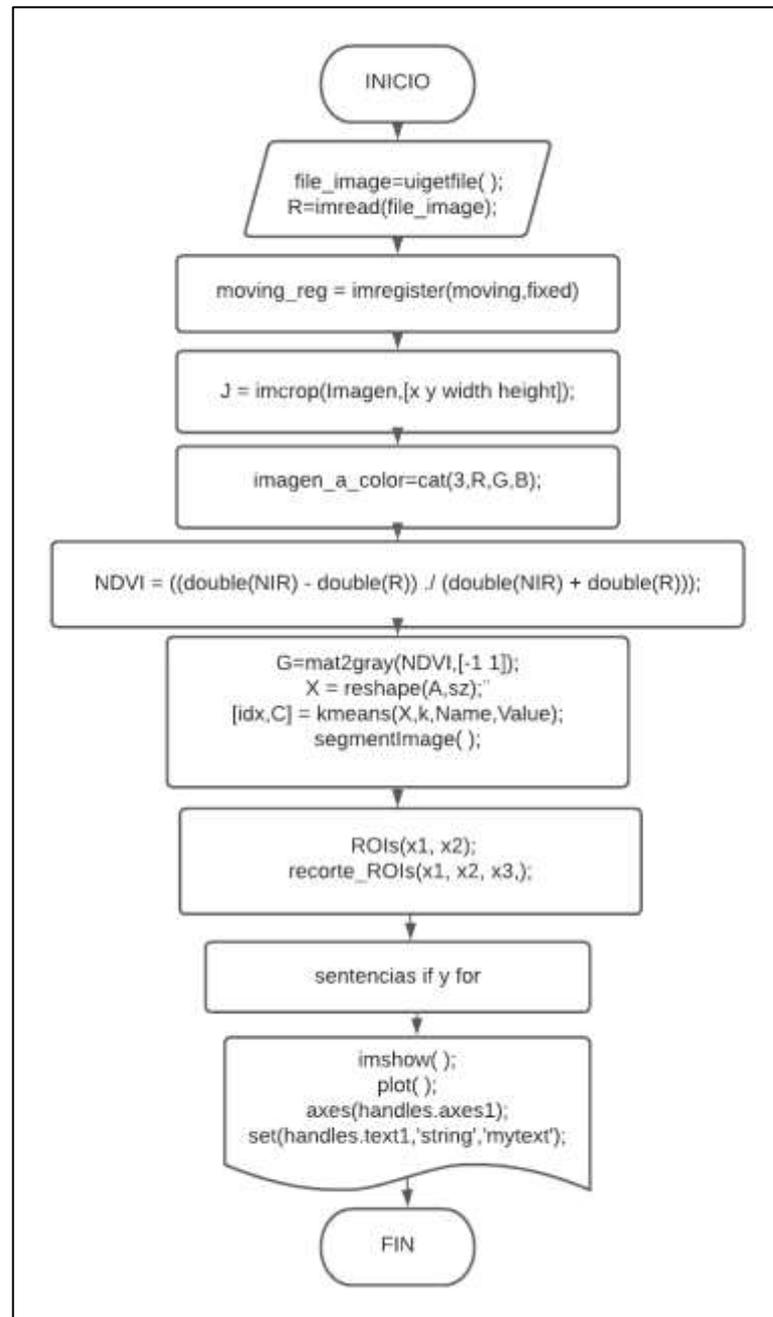


Figura 14-2: Diagrama de flujo para el procesamiento de imágenes

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

A continuación, se detalla de forma breve el contenido del flujograma

- **Uigetfile():** Abre un cuadro de diálogo de selección de archivos.
- **Imread():** Lee la imagen del archivo especificado.

- **imregister(moving, fixed):** Esta función es la encargada de alinear las imágenes provenientes de la cámara multispectral, utilizando una técnica conocida como Registro de imágenes basada en la intensidad, requiere de dos parámetros de entrada que son una imagen de referencia y la imagen desplazada a alinear, como resultado se obtiene la imagen alineada con respecto a la imagen de referencia.
- **imcrop():** Se utiliza esta función para recortar los bordes negros de las imágenes que se forman como producto de la alineación, precisa de cuatro parámetros: las coordenadas de un pixel de origen y las distancias en pixeles a recortar en eje vertical y horizontal.
- **cat():** se utiliza para concatenar varias matrices de iguales dimensiones, concatenando las matrices de los colores Rojo, Verde y Azul se obtiene una imagen visible de colores reales.
- **Operación NDVI:** se trata de operaciones entre matrices correspondientes a las bandas del rojo y el NIR, con la finalidad de obtener el índice de vegetación de diferencia normalizada, para realizar dichos cálculos es necesario convertir el tipo de dato de entero sin signo a uno de doble precisión.
- **mat2gray():** esta función convierte una imagen de valores numéricos de cualquier tipo a una imagen en escala de grises con valores entre 0 y 1 siendo cero el color negro y uno el color blanco, es de utilidad a la hora de realizar la umbralización de una imagen o segmentaciones mediante clasificación de imágenes, las variables a ingresar son la imagen original y un vector con los valores máximo y mínimo de la imagen.
- **segmentImage():** esta función permite umbralizar una imagen usando un valor numérico o umbral, los parámetros que se ingresan en la función son: la imagen a umbralizar en escala de grises y el valor umbral , como resultado se obtiene una imagen de tipo binaria con valores 0 (negro) para valores inferiores al umbral y 1 (blanco) para valores superiores al umbral.
- **reshape():** se utiliza esta función para reorganizar los valores matriciales de una imagen en un array, este paso es necesario para poder realizar la clasificación no supervisada mediante el algoritmo de clustering o isodata.
- **kmeans():** esta función es el algoritmo de clustering o isodata descrito anteriormente, permite segmentar una imagen en k regiones cada una etiquetada con un número, los parámetros de entrada son la imagen a segmentar en escala de grises y el número de regiones k.
- **ROIs () y recorte_ROIs():** ambas funciones trabajan en conjunto y fueron creadas utilizando la Toolbox de Matlab, sirven para analizar la imagen mediante recortes de áreas de interés o ROI's, realizan acciones como: selección de áreas en una imagen mediante un polígono, almacenamiento de coordenadas del polígono y segmentación de la imagen.
- **Sentencias if y for:** se utilizan estas estructuras para realizar procedimientos como: encontrar valores umbral dentro de un vector, contabilizar el número de pixeles dentro de un rango específico o discriminar valores de suelos desnudos dentro de una imagen.

- El resultado final será la obtención de diversas imágenes y datos que representan de manera gráfica el valor del NDVI, imágenes RGB, diagrama de reflectancias, porcentajes, etc. lo que permitirá saber qué nivel de riesgo de incendio existe y se podrá tomar decisiones para crear un plan de contingencia para prevenirlos, los resultados se mostrarán utilizando funciones como: *imshow()*, *plot()*, *axes*, *statictext*, etc.

2.4.3.2. Interfaz GUIDE

Para que las acciones de ingresar, extraer y visualizar la información se realicen de manera interactiva para el usuario, se implementó una interfaz gráfica mediante el uso del entorno GUIDE de Matlab y el algoritmo anteriormente descrito, la interfaz cuenta con dos ventanas, la primera se observa en la Figura 15-2.

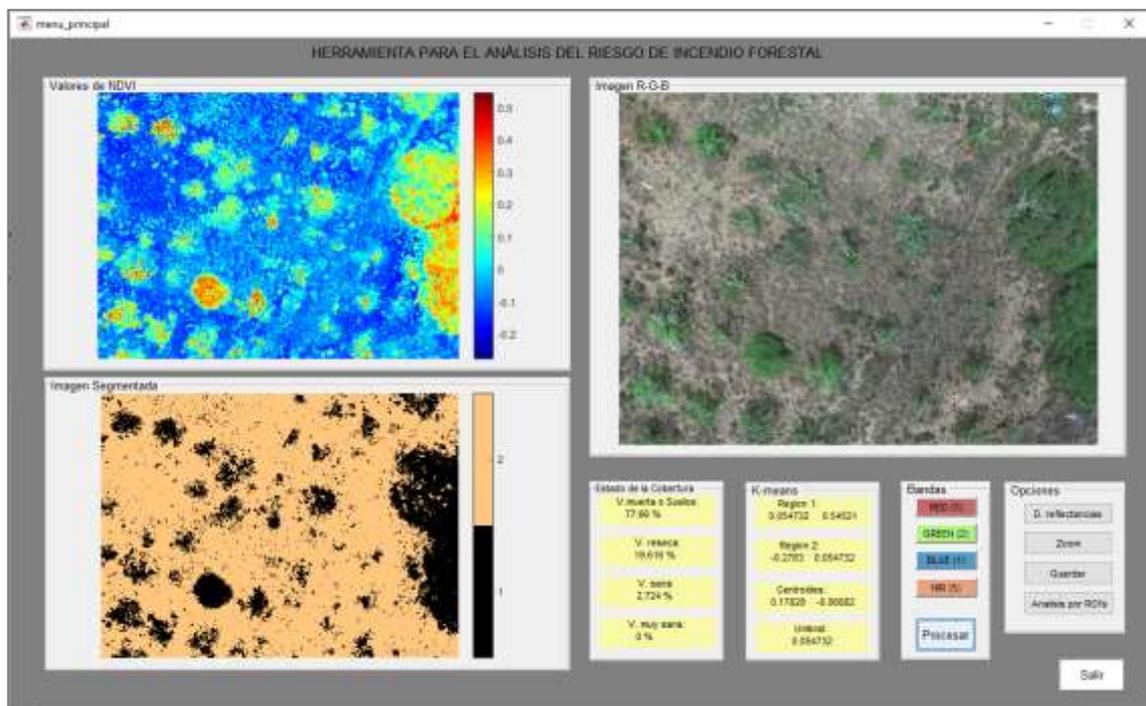


Figura 15-2: Panel principal de la interfaz gráfica desarrollada mediante GUIDE Matlab

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

En esta ventana, los botones realizan acciones como: cargar las imágenes de cada banda, procesar las imágenes, graficar el diagrama de reflectancias, realizar un acercamiento a la imagen de NDVI, guardar la imagen NDVI y abrir la ventana de análisis mediante ROI (Región de Interés). En los paneles tipo *axes*, se muestran los resultados del procesamiento: la imagen RGB, una imagen del NDVI con escala de color y la imagen segmentada en dos zonas, en los paneles que agrupan objetos de tipo *statictext* se muestran los diferentes porcentajes correspondientes a vegetación y suelo desnudo, también muestra información acerca del proceso de segmentación como: valores de centroides, rangos de cada región y valor del umbral de segmentación.

La segunda ventana mostrada en la Figura 16-2, permite realizar un análisis más sectorizado del comportamiento de la vegetación, ya que emplea una herramienta para realizar recortes mediante polígonos de ROI (Región de Interés), esta herramienta se ejecuta al pulsar el botón “Nuevo ROI” el cual despliega una ventana de selección como en la Figura 17-2, la Figura 16-2 muestra en el panel derecho la imagen de la región de interés recortada y en el panel izquierdo muestra en que zona del diagrama general ROJO-NIR de reflectancias se ubican los valores de reflectancias de la ROI recortada, en el panel ubicado en el lado superior derecho que agrupan objetos de tipo *statictext*, indica mediante porcentajes la cantidad de cobertura de superficie de la región de interés que se encuentran en cada uno de los rangos según la Tabla 6-1 de valores de NDVI y también el rango de valores de NDVI del recorte.

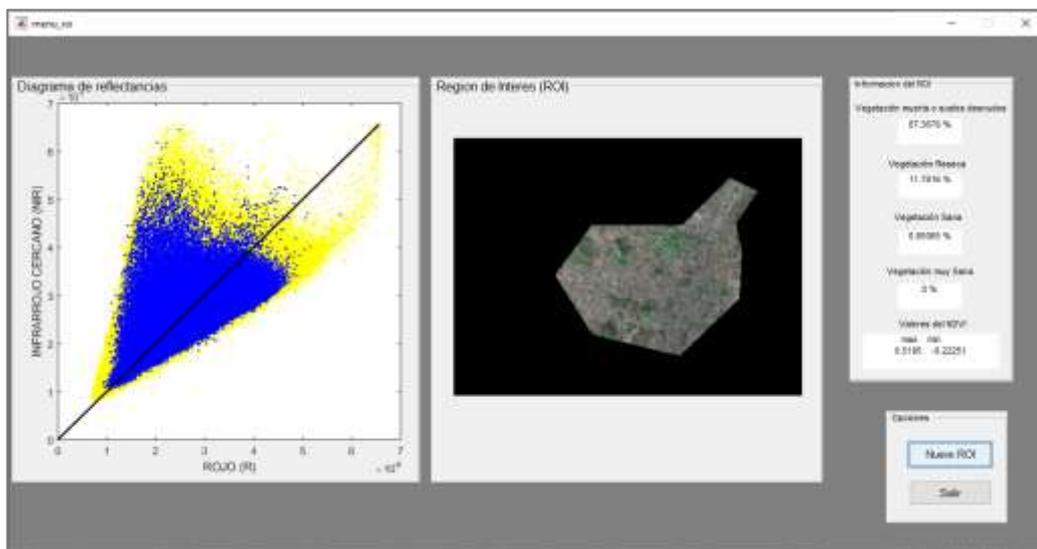


Figura 16-2: Panel de análisis mediante regiones de interés (ROI's)

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

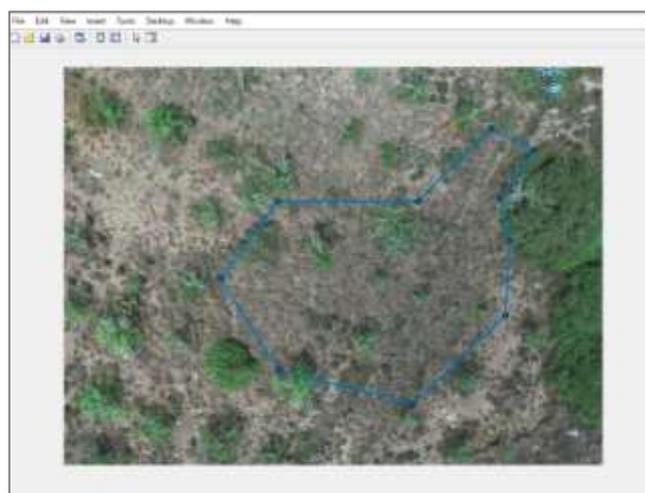


Figura 17-2: Ventana para seleccionar la región de interés (ROI)

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados que se muestran a continuación son las imágenes procesadas mediante el algoritmo desarrollado en Matlab, los resultados obtenidos son: la imagen a color RGB, el índice de vegetación de la cubierta vegetal, la imagen segmentada, diagrama de reflectancias, resultados numéricos, etc; que servirán para analizar e interpretar en qué medida la cubierta vegetal es más o menos propensa a sufrir un incendio, con la finalidad de mantener un orden en el procesamiento y análisis se ha dividido el escenario de estudio en los tres estratos mencionados en la Sección 2.1. los cuales son:

- Estrato arbóreo
- Estrato arbustivo
- Estrato herbáceo

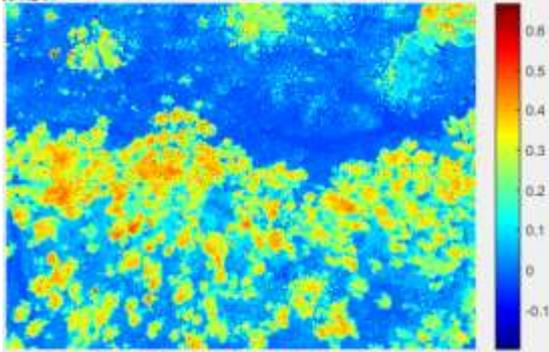
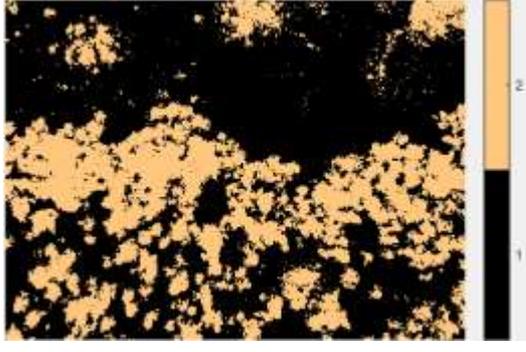
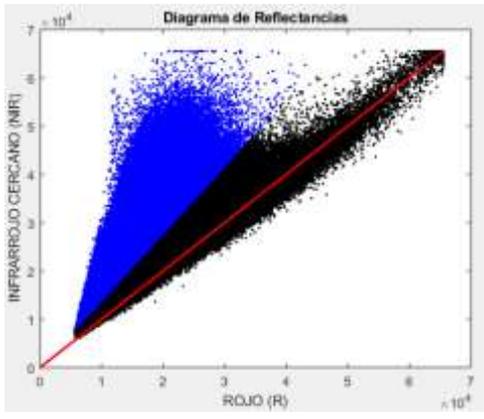
De cada uno de los estratos se han recolectado varias capturas durante el sobrevuelo, a las que se denominan muestras.

3.1. Resultados e interpretación del procesamiento de las imágenes

Las Tablas 1-3, 2-3, 5-3, 6-3, 7-3, 8-3, 11-3 y 12-3 reúnen los resultados obtenidos del procesamiento de las imágenes de las muestras para los tres estratos antes mencionados, se emplearon las imágenes de las bandas 3 y 5 de la cámara Micasense RedEdge para calcular el NDVI utilizando la ecuación descrita en el Capítulo I, esta operación entre bandas permite conocer el estado de la vegetación con sus correspondientes valores de rango -1 y 1 en diferentes tonalidades, también se utilizaron las bandas 1, 2 y 3 para formar una imagen RGB ubicada en la esquina inferior izquierda de cada tabla, utilizando los valores de NDVI se realizó la segmentación de la imagen en dos regiones que me permite separar los suelos desnudos de las regiones con vegetación, el resultado de la segmentación se visualiza en la esquina superior derecha de cada tabla, la esquina inferior derecha de cada tabla alberga un diagrama de reflectancias, visto en la Sección 1.1.4.3 el mismo permite conocer de qué forma se distribuyen los valores de NDVI el plano Rojo-Infrarrojo Cercano (NIR), además de los resultados mediante imágenes también se obtuvo información en forma de datos numéricos que se ubican bajo cada imagen los cuales serán de utilidad para la interpretación de los resultados. Además, todas las tablas incluyen las coordenadas geográficas de cada captura y la superficie en metros cuadrados cubiertos por la captura.

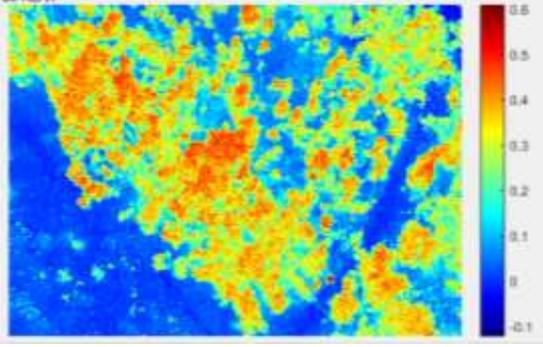
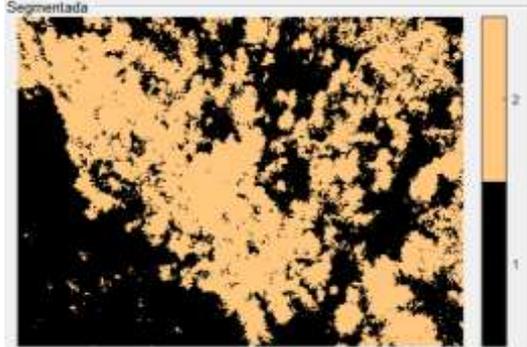
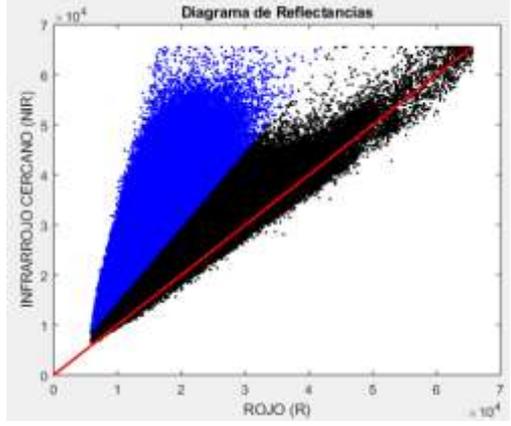
3.1.1. Estrato arbóreo

Tabla 1-3: Resultados del procesamiento de la muestra 1 del estrato arbóreo

Coordenadas	Latitud: 1°38'52.7478''O
	Longitud: 78°41'10.6080''
	Altitud: 2933.197 m.s.n.m
	Superficie: 2214.740 m ²
Valores de NDVI	Imagen Segmentada
	
Vegetación muerta o suelos desnudos: -0.181 a 0.164 Vegetación reseca: 0.164 a 0.3 Vegetación saludable: 0.3 a 0.6 Vegetación muy saludable: mayor a 0.6	Rango de valores NDVI región 1: -0.181 a 0.164 Rango de valores NDVI región 2: 0.164 a 0.686 Centroides de la Región 1: 0.031 Centroides de la Región 2: 0.297 Valor umbral: 0.164
Imagen RGB	Diagrama de reflectancias
	
Vegetación muerta o suelos desnudo: 65.86% Vegetación reseca: 17.68% Vegetación saludable: 16.46% Vegetación muy saludable: 0.003%	Reflectancias de la cubierta vegetal (color azul) Reflectancias del suelo desnudo o vegetación muerta (color negro) Línea de suelo teórica (color rojo)

Realizado por: Reinoso, Héctor, 2020

Tabla 2-3: Resultados del procesamiento de la muestra 2 del estrato arbóreo

Coordenadas	Latitud: 1°38'52.9674''O
	Longitud: 78°41'9.6432''S
	Altitud: 2914.192 m.s.n.m
	Superficie: 1058.098 m ²
Valores de NDVI	Imagen Segmentada
	
Vegetación muerta o suelos desnudos: -0.121 a 0.199 Vegetación enferma o reseca: 0.199 a 0.3 Vegetación saludable: 0.3 a 0.6 Vegetación muy saludable mayor a 0.6	Rango de valores NDVI región 1: -0.121 a 0.199 Rango de valores NDVI región 2: 0.199 a 0.611 Centroide de la Región 1: 0.064 Centroide de la Región 2: 0.333 Valor umbral: 0.199
Imagen RGB	Diagrama de reflectancias
	
Vegetación muerta o suelos desnudo: 50.8 % Vegetación enferma o reseca: 16.94 % Vegetación saludable: 32.26 % Vegetación muy saludable: 0.0003%	Reflectancias de la cubierta vegetal (color azul) Reflectancias del suelo desnudo o vegetación muerta (color negro) Línea de suelo teórica (color rojo)

Realizado por: Reinoso, Héctor, 2020

Al interpretar todas las imágenes de NDVI de las Tablas 1-3 y 2-3 se puede observar que los colores representativos de la cubierta vegetal saludable corresponde a los tonos cálidos (amarillo, naranja y rojo), mientras que el suelo desnudo, vegetación reseca o la vegetación muerta corresponde a los tonos más fríos (azul y celeste), estos últimos son los predominantes en la superficie de cada muestra, utilizando las imágenes RGB se confirma que en su mayoría son suelos desnudos con pequeñas cantidades de vegetación muerta y la vegetación saludable corresponde en su mayoría a las copas de los árboles.

Como resultado de la segmentación de las imágenes de NDVI se sabe que el umbral de segmentación para cada imagen es en promedio 0.182 el cual está por encima del límite teórico de 0, otro dato relevante resultado de la segmentación son los valores de los centroides de cada región, si se calcula la diferencia y el valor absoluto entre cada par de centroides de cada muestra se obtienen los siguientes resultados: muestra 1= 0.266 y muestra 2= 0.269, los pares de centroides de cada imagen segmentada se encuentran bastante espaciados entre sí, es decir que existe una clara diferenciación entre los valores de NDVI correspondientes a suelos desnudos y la cubierta vegetal.

Finalmente, los diagramas de reflectancias muestran la manera en que los valores de reflectancias correspondientes al suelo desnudo y vegetación se distribuyen en el plano Rojo-NIR, los puntos en color negro representan al suelo desnudo mientras que la cubierta vegetal está representada por el color azul, en ambas muestras se observa que los valores se concentran de manera equitativa a ambos lados de la línea del umbral, también los valores de reflectancias en la parte superior izquierda del diagrama son prácticamente inexistentes lo que da a entender que la vegetación muy saludable es muy escasa.

El Gráfico 1-3 agrupa los porcentajes mostrados en la parte inferior izquierda de las Tablas 1-3 y 2-3, los mismos representan a la razón entre la superficie que ocupa una determinada categoría de cobertura vegetal (suelo desnudo, vegetación reseca, vegetación saludable y vegetación muy saludable) respecto a la superficie total capturada en el sobrevuelo, en donde se sabe que: la superficie promedio total capturada fue de: 1636.419 m² de la cual, 954.523 m² correspondiente al 58.33% de superficie son los suelos desnudos o la vegetación muerta, 283.264m² que representa el 17.31 % están cubiertos por vegetación enferma o reseca, 398.632m² correspondiente al 24.36% representa la vegetación saludable y 0.0002 m² correspondiente al 0.001% está cubierto por vegetación muy saludable, para averiguar cómo se calcula las superficie capturada en una imagen y las áreas correspondientes a cada muestra (ver Anexo C).

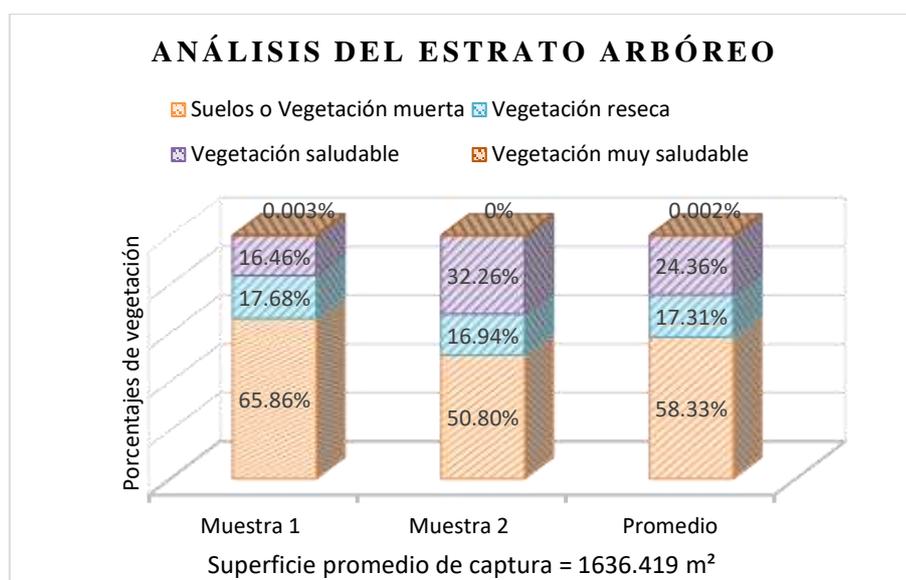


Gráfico 1-3: Porcentajes de cubierta vegetal y suelo desnudo del estrato arbóreo

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

Según el gráfico anterior el porcentaje promedio de vegetación que se encuentra en el rango de actividad fotosintética media y baja (vegetación reseca), corresponde al 17.31% en superficie 283.264 m² y de acuerdo con la información de la Tabla 1-2 este valor es un porcentaje bajo por lo tanto se le asignó una calificación de 2, de manera similar utilizando la Tabla 2-2 se pudo calificar la susceptibilidad de combustible con un valor de 2 debido a que la cubierta vegetal predominante son árboles.

Tabla 3-3: Calificación de los parámetros del IRI

Porcentaje de la cubierta vegetal en riesgo de ignición (Pv)	Categoría	Calificación
17.31 %	Baja	2
Susceptibilidad de la cubierta vegetal a los incendios (Sc)	Categoría	Calificación
Árboles	Baja	2

Realizado por: Reinoso, Héctor, 2020

Finalmente utilizando las calificaciones antes mencionadas y la Ecuación 1-2, se calcula el Índice de Riesgo de Incendio (IRI), que en este caso tiene un valor de 4, posteriormente utilizando la Figura 2-2, se lo categorizó al estrato arbóreo, con un riesgo de incendio forestal bajo.

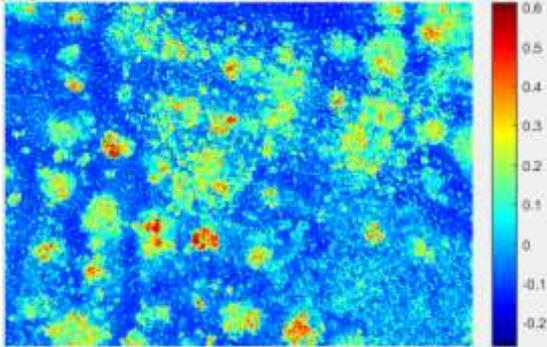
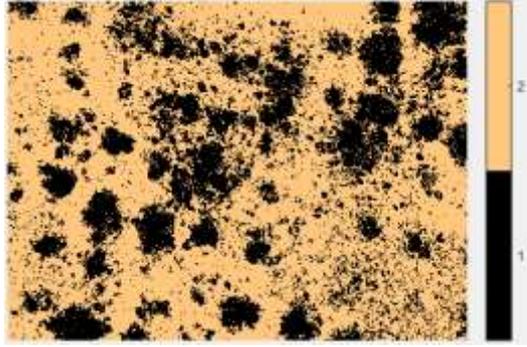
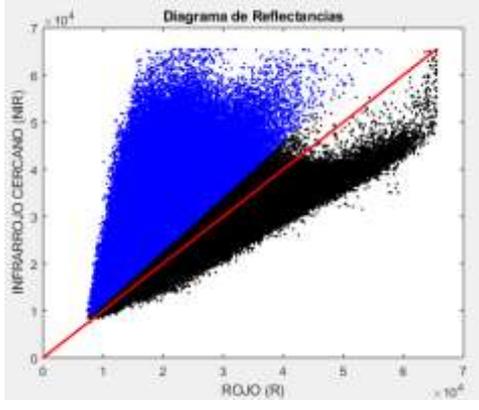
Tabla 4-3: Valor y Categoría del IRI

Pv	Sc	IRI	Categoría
2	2	4	Riesgo de incendio bajo

Realizado por: Reinoso, Héctor, 2020

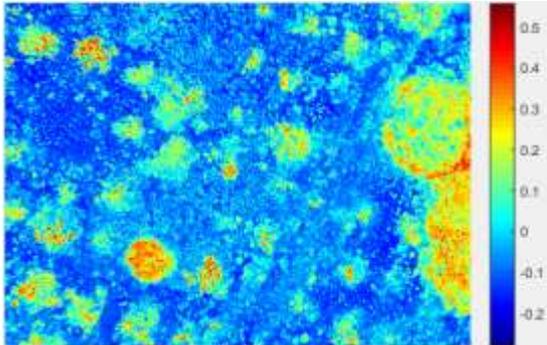
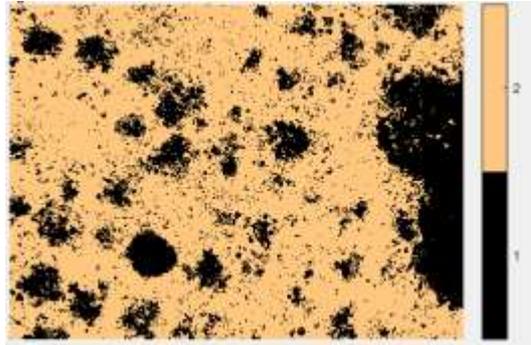
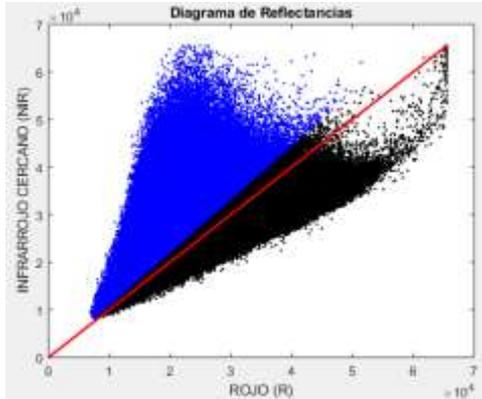
3.1.2. Estrato arbustivo

Tabla 5-3: Resultados del procesamiento de la muestra 1 del estrato arbustivo

Coordenadas	Latitud: 1°38'53.8912" S
	Longitud: 78°41'9.6277" O
	Altitud: 2901.463 m.s.n.m
	Superficie: 519.607m ²
Valores de NDVI	Imagen Segmentada
	
<p>Vegetación muerta o suelos desnudos: -0.275 a 0.035</p> <p>Vegetación enferma o reseca: 0.035 a 0.3</p> <p>Vegetación saludable: 0.3 a 0.6</p> <p>Vegetación muy saludable: mayor a 0.6</p>	<p>Rango de valores NDVI región 1: 0.035 a 0.612</p> <p>Rango de valores NDVI región 2: -0.275 a 0.035</p> <p>Centroide de la Región 1: 0.131</p> <p>Centroide de la Región 2: -0.061</p> <p>Valor umbral: 0.035</p>
Imagen RGB	Diagrama de reflectancias
	
<p>Vegetación muerta o suelos desnudo: 65.865 %</p> <p>Vegetación enferma o reseca: 30.879 %</p> <p>Vegetación saludable: 3.26 %</p> <p>Vegetación muy saludable: 0.0003%</p>	<p>Reflectancias de la cubierta vegetal (color azul)</p> <p>Reflectancias del suelo desnudo o vegetación muerta (color negro)</p> <p>Línea de suelo teórica (color rojo)</p>

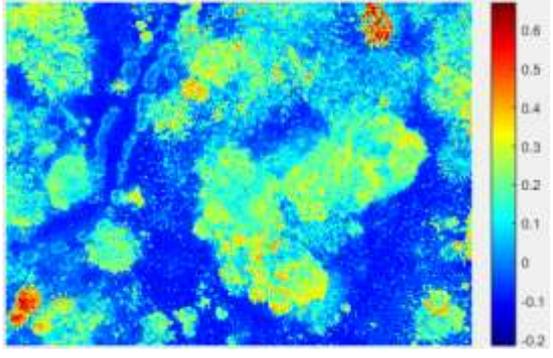
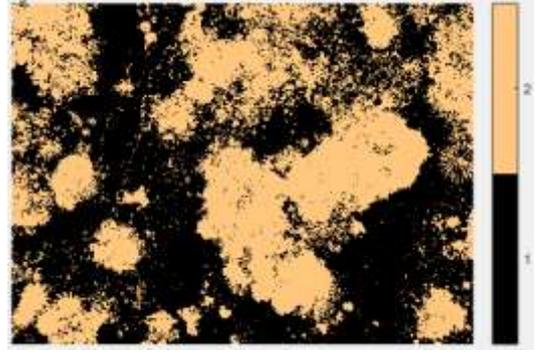
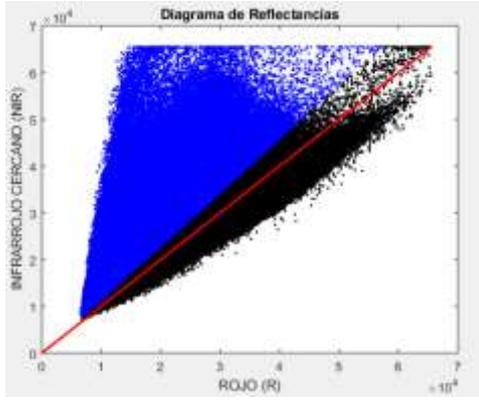
Realizado por: Reinoso, Héctor, 2020

Tabla 6-3: Resultados del procesamiento de la muestra 2 del estrato arbustivo

Coordenadas	Latitud: 1°38'54.2270''S
	Longitud: 78°41'8.9966''O
	Altitud: 2904.437 m.s.n.m
	Superficie: 628.456 m ²
Valores de NDVI	Imagen Segmentada
	
<p>Vegetación muerta o suelos desnudos: -0.285 a 0.0243</p> <p>Vegetación reseca: 0.0243 a 0.3</p> <p>Vegetación saludable: 0.3 a 0.6</p> <p>Vegetación muy saludable: mayor a 0.6</p>	<p>Rango de valores NDVI región 1: 0.0243 a 0.560</p> <p>Rango de valores NDVI región 2: -0.285 a 0.0243</p> <p>Centroide de la Región 1: 0.128</p> <p>Centroide de la Región 2: -0.079</p> <p>Valor umbral: 0.0243</p>
Imagen RGB	Diagrama de reflectancias
	
<p>Vegetación muerta o suelos desnudo: 72.269 %</p> <p>Vegetación reseca: 24.994 %</p> <p>Vegetación saludable: 2.737 %</p> <p>Vegetación muy saludable: 0%</p>	<p>Reflectancias de la cubierta vegetal (color azul)</p> <p>Reflectancias del suelo desnudo o vegetación muerta (color negro)</p> <p>Línea de suelo teórico (color rojo)</p>

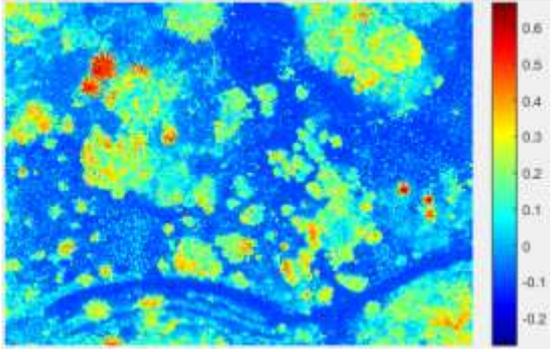
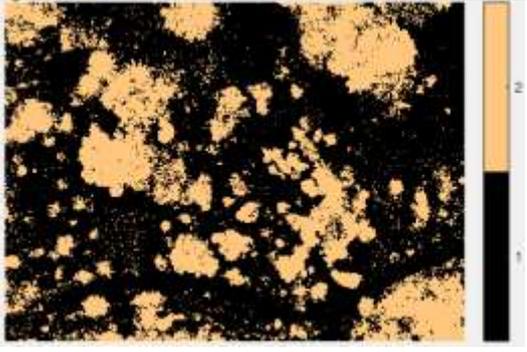
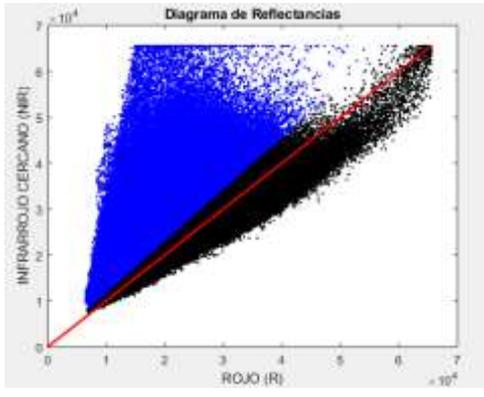
Realizado por: Reinoso, Héctor, 2020

Tabla 7-3: Resultados del procesamiento de la muestra 3 del estrato arbustivo

Coordenadas	Latitud: 1°39'0.5933''S
	Longitud: 78°41'3.1639''O
	Altitud: 2891.534
	Superficie: 928.416m ²
Valores de NDVI	Imagen Segmentada
	
<p>Vegetación muerta o suelos desnudos: -0.229 a 0.0695</p> <p>Vegetación enferma o reseca: 0.0695 a 0.3</p> <p>Vegetación saludable: 0.3 a 0.6</p> <p>Vegetación muy saludable: mayor a 0.6</p>	<p>Rango de valores NDVI región 1: -0.229 a 0.0695</p> <p>Rango de valores NDVI región 2: 0.0695 a 0.669</p> <p>Centroide de la Región 1: -0.040</p> <p>Centroide de la Región 2: 0.179</p> <p>Valor umbral: 0.0695</p>
Imagen RGB	Diagrama de reflectancias
	
<p>Vegetación muerta o suelos desnudo: 55.858 %</p> <p>Vegetación enferma o reseca: 38.273 %</p> <p>Vegetación saludable: 5.822 %</p> <p>Vegetación muy saludable: 0.048 %</p>	<p>Reflectancias de la cubierta vegetal (color azul)</p> <p>Reflectancias del suelo desnudo o vegetación muerta (color negro)</p> <p>Línea de suelo teórica (color rojo)</p>

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

Tabla 8-3: Resultados del procesamiento de la muestra 4 del estrato arbustivo

Coordenadas	Latitud: 1°39'0.643''S
	Longitud: 78°41'3.566''O
	Altitud: 2892.785
	Superficie: 987.626 m ²
Valores de NDVI	Imagen Segmentada
	
<p>Vegetación muerta o suelos desnudos: -0.2758 a 0.0624</p> <p>Vegetación enferma o reseca: 0.0624 a 0.3</p> <p>Vegetación saludable: 0.3 a 0.6</p> <p>Vegetación muy saludable > 0.6</p>	<p>Rango de valores NDVI región 1: -0.276 a 0.062</p> <p>Rango de valores NDVI región 2: 0.062 a 0.669</p> <p>Centroide de la Región 1: -0.055</p> <p>Centroide de la Región 2: 0.180</p> <p>Valor umbral: 0.0624</p>
Imagen RGB	Diagrama de reflectancias
	
<p>Vegetación muerta o suelos desnudo: 66.64 %</p> <p>Vegetación enferma o reseca: 27.822%</p> <p>Vegetación saludable: 5.514 %</p> <p>Vegetación muy saludable: 0.025 %</p>	<p>Reflectancias de la cubierta vegetal (color azul)</p> <p>Reflectancias del suelo desnudo o vegetación muerta (color negro)</p> <p>Línea de suelo teórico (color rojo)</p>

Realizado por: Reinoso, Héctor, 2020

Al analizar las imágenes de valores de NDVI de las Tablas 5-3, 6-3, 7-3 y 8-3 se puede ver que los valores inferiores a 0 representados por los tonos de azul oscuro en la barra de color de cada imagen son valores correspondientes a suelos descubiertos, los cuales se encuentran en la mayor parte de cada muestra y están dispersos entre la vegetación dando a entender que la distribución horizontal de la cubierta vegetal es discontinua, esta característica del lugar es beneficiosa ya que evitaría la propagación del fuego en caso de incendios. En cada muestra los valores en torno al valor umbral de cada imagen están representados por el color celeste, son los más abundantes entre la vegetación en cada muestra, dando a interpretar que la mayor parte de la vegetación se encuentra enferma o muy reseca, por otro lado, los valores cercanos y superiores a 0.3 representados por los tonos amarillos y rojos son escasos en todas las muestras dando a entender que existe poca vegetación saludable entre los arbustos.

Como resultado de la segmentación de la imagen de valores de NDVI se obtienen valores umbral de: muestra 1=0.0350 , muestra 2= 0.0243, muestra 3= 0.0695 y muestra 4 = 0.0624 como se observa los valores son superiores al valor teórico de 0 para el suelo descubierto, todos los valores de NDVI que se encuentren por debajo de estos valores umbral fueron interpretados como suelos desnudos y los valores superiores al umbral interpretados como vegetación, otro dato relevante es la distancia entre centroides de cada muestra, estas son: muestra 1 = 0.192, muestra 2 = 0.207, muestra 3= 0.219 y muestra 4 = 0.235 , como se observa los centroides están bastante espaciados entre sí por lo que se puede afirmar que existe una clara diferenciación entre suelos desnudos y vegetación.

La imagen RGB de cada muestra permite comprobar el análisis realizado con las imágenes de valores NDVI, se puede distinguir claramente el suelo descubierto, la vegetación reseca y la vegetación sana, además de restos de vegetación muerta en las muestras 3 y 4. Finalmente en los gráficos de reflectancias muestran la distribución de los valores de reflectancias en el plano ROJO-NIR, en todas las muestras se puede apreciar que la línea del valor umbral es muy próxima a la línea de suelo desnudo teórico (línea roja), esto significa que el suelo de estas muestras casi refleja por igual la energía recibida en las bandas rojo e infrarrojo cercano, en todos los diagramas de reflectancias se observa muy poca o nula concentración de puntos en la parte superior izquierda del diagrama, dando a entender que vegetación muy saludable con valores de NDVI mayores a 0.6 es escasa.

El Grafico 2-3 agrupa los porcentajes mostrados en la parte inferior izquierda de las Tablas 5-3, 6-3, 7-3 y 8-3, los mismos representan a la razón entre la superficie que ocupa una determinada categoría de cobertura vegetal (suelo desnudo, vegetación reseca, vegetación saludable y vegetación muy saludable) respecto a la superficie total capturada en el sobrevuelo. La última barra muestra el porcentaje promedio para cada categoría de cobertura, la superficie promedio capturada fue de 766.026 m², de la cual: 499.143m² correspondiente al 65.16 % de superficie son

suelos desnudos o vegetación muerta, 233.561m² que representa el 30.49 % están cubiertos por vegetación enferma o reseca, 33.169 m² correspondiente al 4.33 % corresponden a vegetación saludable y 0.153 m² que corresponden al 0.02% está cubierto por vegetación muy saludable, para averiguar cómo se calcula las superficie capturada en una imagen y las áreas correspondientes a cada muestra (ver Anexo C).

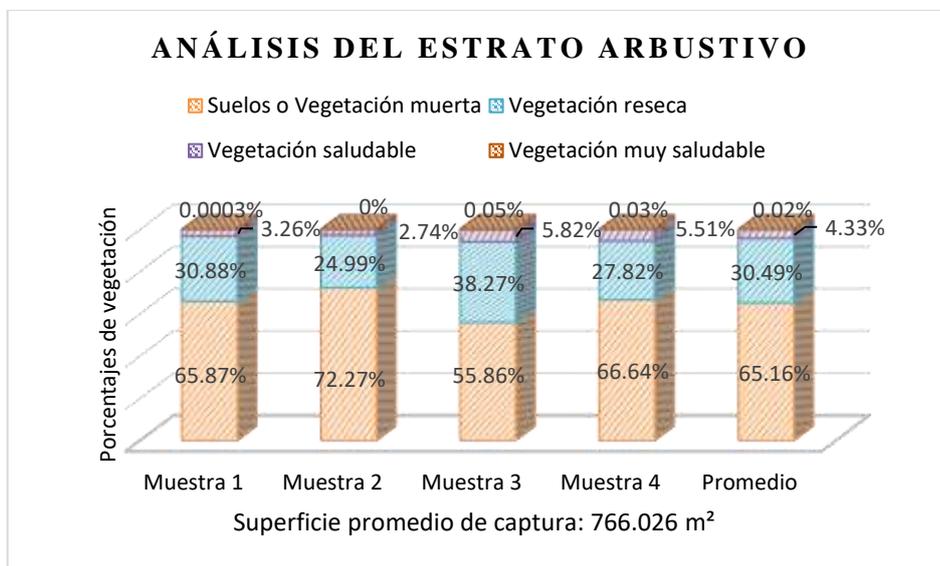


Gráfico 2-3: Porcentajes de cubierta vegetal y suelo desnudo del estrato arbustivo

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

De acuerdo al gráfico anterior el porcentaje promedio de vegetación que se encuentra en el rango de actividad fotosintética media y baja corresponde al 30.49 % (233.561m²), y según la información de la Tabla 1-2 este valor pertenece a una categoría baja, por lo tanto, se le asignó una calificación de 2, de manera similar utilizando la Tabla 2-2 se pudo calificar la susceptibilidad de combustible con un valor de 3 debido a que la cubierta vegetal predominante son arbustos.

Tabla 9-3: Calificación de los parámetros del IRI

Porcentaje de la cubierta vegetal en riesgo de ignición (Pv)	Categoría	Calificación
30.49 %	Baja	2
Susceptibilidad de la cubierta vegetal a los incendios (Sc)	Categoría	Calificación
Arbustos	Alta	4

Realizado por: Reinoso, Héctor, 2020

Finalmente utilizando las calificaciones antes mencionadas y la Ecuación 1-2, se calcula el Índice de Riesgo de Incendio (IRI), que en este caso tiene un valor de 8, posteriormente utilizando la Figura 2-2, se lo categorizó al estrato arbóreo, con un riesgo de incendio forestal moderado.

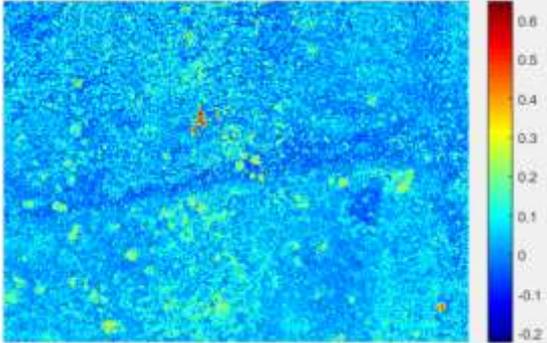
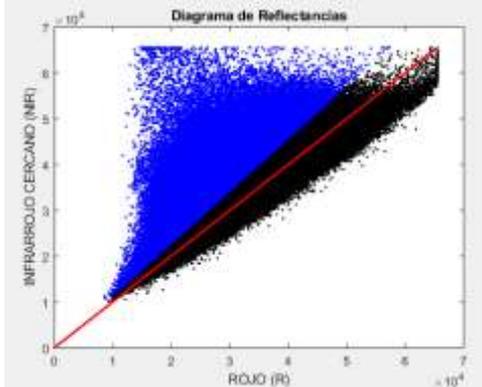
Tabla 10-3: Valor y Categoría del IRI

Pv	Sc	IRI	Categoría
2	4	8	Riesgo de incendio moderado

Realizado por: Reinoso, Héctor, 2020

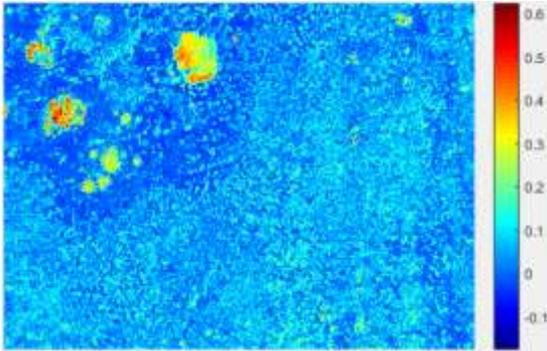
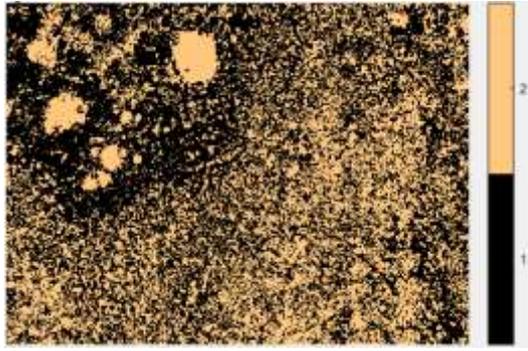
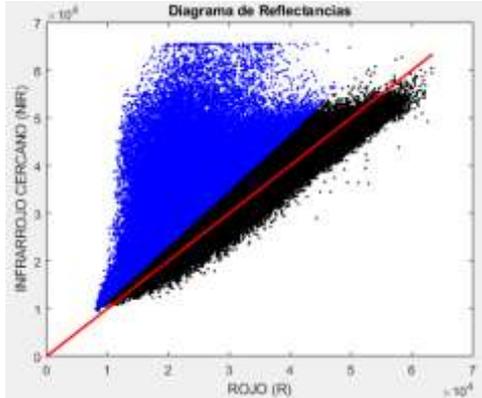
3.1.3. Estrato herbáceo

Tabla 11-3: Resultados del procesamiento de la muestra 1 del estrato herbáceo

Coordenadas	Latitud: 1°38'57.2636''S
	Longitud: 78°40'57.8881''O
	Altitud: 2894.02 m.s.n.m
	Superficie: 292.527 m ²
Valores de NDVI	Imagen Segmentada
	
<p>Vegetación muerta o suelos desnudos: -0.231 a 0.044</p> <p>Vegetación reseca: 0.044 a 0.3</p> <p>Vegetación saludable: 0.3 a 0.6</p> <p>Vegetación muy saludable: mayor a 0.6</p>	<p>Rango de valores NDVI región 1: -0.231 a 0.044</p> <p>Rango de valores NDVI región 2: 0.044 a 0.649</p> <p>Centroide de la Región 1: 0.0034</p> <p>Centroide de la Región 2: 0.084</p> <p>Valor umbral: 0.044</p>
Imagen RGB	Diagrama de reflectancias
	
<p>Vegetación muerta o suelos desnudo: 57.39 %</p> <p>Vegetación reseca: 42.023 %</p> <p>Vegetación saludable: 0.583 %</p> <p>Vegetación muy saludable: 0.004%</p>	<p>Reflectancias de la cubierta vegetal (color azul)</p> <p>Reflectancias del suelo desnudo o vegetación muerta (color negro)</p> <p>Línea de suelo teórica (color rojo)</p>

Realizado por: Reinoso, Héctor, 2020

Tabla 12-3: Resultados del procesamiento de la muestra 2 del estrato herbáceo

Coordenadas	Latitud: 1°38'56.6041''S
	Longitud: 78°40'57.3946''O
	Altitud: 2894.192 m.s.n.m
	Superficie: 297.044 m ²
Valores de NDVI	Imagen Segmentada
	
Vegetación muerta o suelos desnudos: -0.175 a 0.051 Vegetación reseca: 0.051 a 0.3 Vegetación saludable: 0.3 a 0.6 Vegetación muy saludable: mayor a 0.6	Rango de valores NDVI región 1: -0.175 a 0.051 Rango de valores NDVI región 2: 0.051 a 0.625 Centroides de la Región 1: 0.009 Centroides de la Región 2: 0.093 Valor umbral: 0.051
Imagen RGB	Diagrama de reflectancias
	
Vegetación muerta o suelos desnudos: 56.06 % Vegetación reseca: 42.654 % Vegetación saludable: 1.287% Vegetación muy saludable: 0.001%	Reflectancias de la cubierta vegetal (color azul) Reflectancias del suelo desnudo o vegetación muerta (color negro) Línea de suelo teórica (color rojo)

Realizado por: Reinoso, Héctor, 2020

Al analizar los resultados del procesamiento de las muestras del estrato herbáceo, se puede notar que en las imágenes de valores de NDVI de las Tablas 11-3 y 12-3 la mayor parte de la superficie presenta valores de NDVI en torno a 0.1 y menores a 0 que corresponden a la coloración celeste y azul respectivamente, dando a entender que la zona está ocupada mayoritariamente por vegetación reseca, vegetación muerta y suelo descubierto, también existen zonas de la imagen

con tonos rojizos y amarillos pero ocupan una porción mínima de superficie, esto significa que en el lugar la vegetación saludable es mínima. En la imagen RGB se puede observar que en ambas muestras la mayor parte de la superficie están cubiertas de vegetación, también se aprecian las partes de suelo descubierto y la poca vegetación saludable del lugar.

Los resultados de realizar la segmentación de los valores de NDVI revelan que el umbral de segmentación promedio es 0.0475 que se ubica por encima del valor teórico de 0, también al hallar la distancia entre cada par de centroides se obtiene: muestra 1= 0,08 y muestra 2= 0.084, en ambas muestras los centroides están poco espaciados, dando a interpretar que la diferencia entre suelo desnudo y cubierta con vegetación reseca no está clara, por lo que se puede decir que en el lugar existe acumulación de vegetación muerta entre la vegetación reseca que el algoritmo interpreta como suelo desnudo.

El Grafico 3-3 agrupa los porcentajes mostrados en la parte inferior izquierda de las Tablas 11-3 y 12-3, los mismos representan a la razón entre la superficie que ocupa una determinada categoría de cobertura vegetal (suelo desnudo, vegetación reseca, vegetación saludable y vegetación muy saludable) respecto a la superficie total capturada en el sobrevuelo, la superficie promedio capturada fue de 294.786 m².de la cual: 167.232m² corresponden al 56.73 % de superficie son suelos desnudos o vegetación muerta, 124.81 m² que representa el 42.34 % están cubiertos por vegetación enferma o reseca, 2.77m² correspondiente al 0.94% corresponden a vegetación saludable y 0.009m² correspondiente al 0.0025% está cubierto por vegetación muy saludable, para averiguar cómo se calcula las superficie capturada en una imagen y las áreas correspondientes a cada muestra (ver Anexo C).

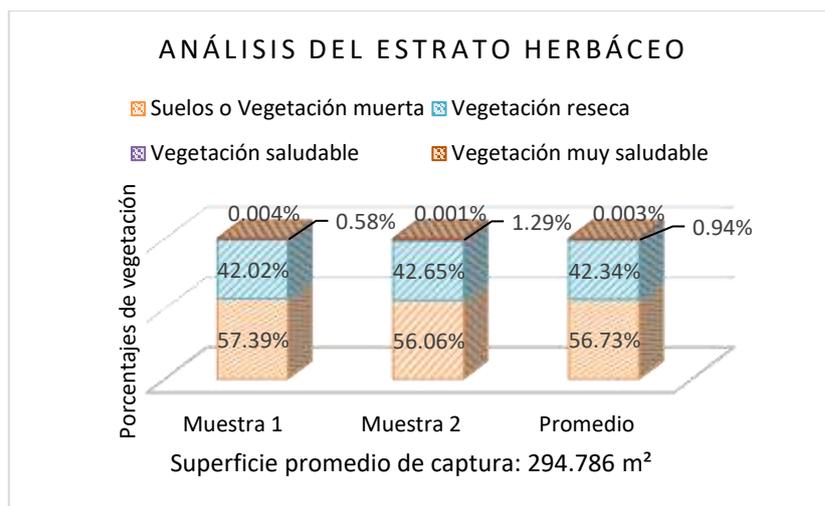


Gráfico 3-3: Porcentajes de cubierta vegetal y suelo desnudo del estrato herbáceo

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

De acuerdo con el Gráfico 3-3 el porcentaje de vegetación que se encuentra en el rango de actividad fotosintética media y baja (vegetación reseca), corresponde al 42.34 % (124.81m²) y

según la información de la Tabla 1-2 este valor es un porcentaje moderado y se le asignó una calificación de 3, posteriormente utilizando la Tabla 2-2 se calificó la susceptibilidad de combustible con un valor de 4, ya que la cubierta vegetal predominante son herbazales.

Tabla 13-3: Calificación de los parámetros del IRI

Porcentaje de la cubierta vegetal en riesgo de ignición (Pv)	Categoría	Calificación
42.34 %	Moderada	3
Susceptibilidad de la cubierta vegetal a los incendios (Sc)	Categoría	Calificación
Herbazal	Alta	4

Realizado por: Reinoso, Héctor, 2020

Finalmente utilizando las calificaciones antes mencionadas y la Ecuación 1-2, se halla el índice de riesgo de incendio (IRI), que en este caso tiene un valor de 12, luego mediante la Figura 2-2, se lo categorizó al estrato arbóreo, con un riesgo de incendio forestal alto.

Tabla 14-3: Valor y Categoría del IRI

Pv	Sc	IRI	Categoría
3	4	12	Riesgo de incendio alto

Realizado por: Reinoso, Héctor, 2020

3.2. Validación de los resultados obtenidos

Para la validación de los resultados se planteó salidas de campo a la zona de estudio, la finalidad del trabajo de campo fue el de tomar puntos de verificación en las imágenes procesadas para posteriormente identificarlos y verificar el estado de la vegetación entorno a dichos puntos.

3.2.1. Validación mediante puntos de verificación en el estrato arbóreo

Se ubicaron varios puntos de verificación en dos de las muestras del estrato arbóreo como se observa en la Figura 1-3 y utilizando la herramienta “superposición de imágenes” de *Google Earth* se los ubicó geográficamente mediante su latitud y longitud como se muestra en la Tabla 15-3, también se utilizó la herramienta “Análisis por ROI’s” descrita en la Sección 2.4.3.2 para conocer el estado de la vegetación entorno a cada punto y poder contrastar la información de las fotografías del lugar.

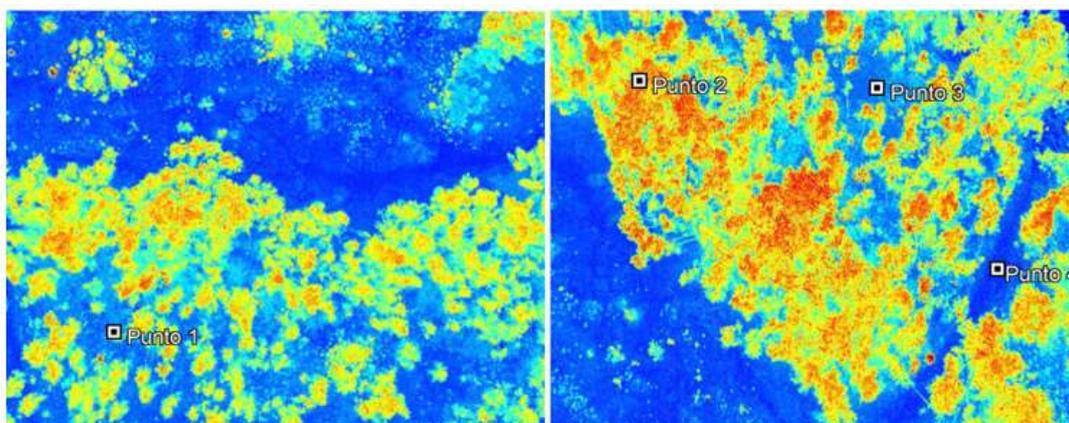


Figura 1-3: Ubicación de los puntos de verificación del estrato arbóreo

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

Tabla 15-3: Coordenadas de los puntos de verificación del estrato arbóreo

ESTRATO ARBÓREO	
PUNTOS	UBICACIÓN
Punto 1	Lat: 1°38'52.30"S Long: 78°41'10.63"O
Punto 2	Lat: 1°38'52.59"S Long: 78°41'11.39"O
Punto 3	Lat: 1°38'51.91"S Long: 78°41'10.98"O
Punto 4	Lat: 1°38'52.05"S Long: 78°41'10.21"O

Realizado por: Reinoso, Héctor, 2020

En la Figura 2-3 se observa los lugares correspondientes a cada uno de los puntos de verificación, la Figura 2-3(a) muestra un área parcialmente despejada de bosque cuya superficie está cubierta de hojarasca seca, unos cuantos arbustos y hierbas al igual que en la Figura 2-3(c) donde además existe restos muertos de un árbol, por otro lado al verificar el rango de valores de NDVI se obtuvo en el Punto 1 (Figura 2-3(a)) valores de -0.03 a 0.6 y en el Punto 3 (Figura 2-3(c)) valores de -0.037 a 0.278 lo cual confirma lo que se observa en las imágenes, que en ambos sitios existe desde vegetación muerta con valores inferiores a cero hasta vegetación saludable con valores cercanos a 0.6; la Figura 2-3(b) correspondiente al Punto 2 se encuentra cubierto por las copas de los árboles mismas que tiene un rango de valores de NDVI de 0.24 a 0.53 confirmando que este tipo de vegetación tiene un estado saludable como se observa en su respectiva imagen, finalmente el Punto 4 mostrado en la Figura 2-3(d) corresponde al suelo desnudo al interior del bosque el conjunto de valores NDVI para este punto es de -0.06 a 0.097 que son valores muy cercanos o inferiores a cero propios de suelos sin vegetación u objetos inertes corroborando de esta manera lo que se observa en la imagen correspondiente a este punto de verificación.

De forma general el estrato arbóreo se encuentra poblado principalmente por arboles altos y saludables que en ningún caso podrían incendiarse, también bajo los árboles se pudo encontrar hojarasca seca, pequeños hierbas, matorrales y restos de actividades silvícolas en pequeñas cantidades que no podrían ocasionar un gran incendio. Por lo tanto, la categoría de riesgo de incendio bajo o nulo en el estrato arbóreo esta correctamente asignada.



Figura 2-3: Imágenes de los puntos de verificación del estrato arbóreo

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

3.2.2. Validación mediante puntos de verificación en el estrato arbustivo

Se ubicaron varios puntos de verificación en dos de las muestras del estrato arbustivo como se observa en la Figura 3-3 y utilizando la herramienta “superposición de imágenes” de *Google Earth* se los ubicó geográficamente mediante su latitud y longitud como se muestra en la Tabla 16-3, también se utilizó la herramienta “Análisis por ROI’s” descrita en la Sección 2.4.3.2 para conocer el estado de la vegetación entorno a cada punto y poder contrastar la información de las fotografías del lugar.

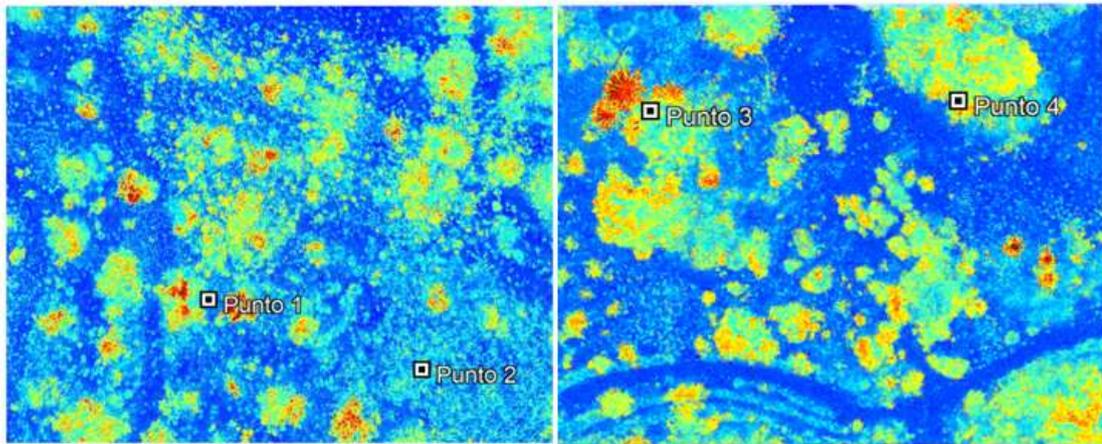


Figura 3-3: Ubicación de los puntos de verificación del estrato arbustivo

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

Tabla 16-3: Coordenadas de los puntos de verificación en el estrato arbustivo

ESTRATO ARBUSTIVO	
PUNTOS	UBICACIÓN
Punto 1	Lat: 1°38'54.04"S Long: 78°41'9.86"O
Punto 2	Lat: 1°38'53.96"S Long: 78°41'9.45"O
Punto 3	Lat: 1°39'0.50"S Long: 78°41'3.98"O
Punto 4	Lat: 1°39'0.89"S Long: 78°41'3.57"O

Realizado por: Reinoso, Héctor, 2020

La Figura 4-3 agrupa las fotografías correspondientes a los puntos de verificación anteriormente listados, la Figura 4-3(a) corresponde al Punto 1 en el lugar se encontró arbustos que no superan los 1.5 metros de altura, verdes en sus centros y rodeados de vegetación reseca, vegetación muerta y suelos desnudos, los valores teóricos de NDVI del lugar tienen un rango de -0.15 a 0.69 que se corresponde con los distintos tipos de cobertura presentes en este punto; en el punto de verificación 2 que se observa en la Figura 4-3(b) se encontró material vegetal reseco y muerto con escasa vegetación en estado saludable, el rango de valores de NDVI de -0.202 a 0.220 confirma el estado de la vegetación del Punto 2. Los puntos de verificación 3 y 4 corresponden a la Figura 4-3(c) y Figura 4-3(d) respectivamente, en ambas imágenes se encontró arbustos de hasta 5 metros de altura bajo los cuales existe abundante vegetación reseca y muerta rodeada de suelos desnudos, los valores teóricos de NDVI de -0.015 a 0.62 para el Punto 3 y de -0.064 a 0.477 para el Punto 4 en ambos puntos los valores negativos y cercanos a cero son los más abundantes, estos rangos de valores de NDVI coinciden con el estado de la vegetación de las Imágenes mostradas.

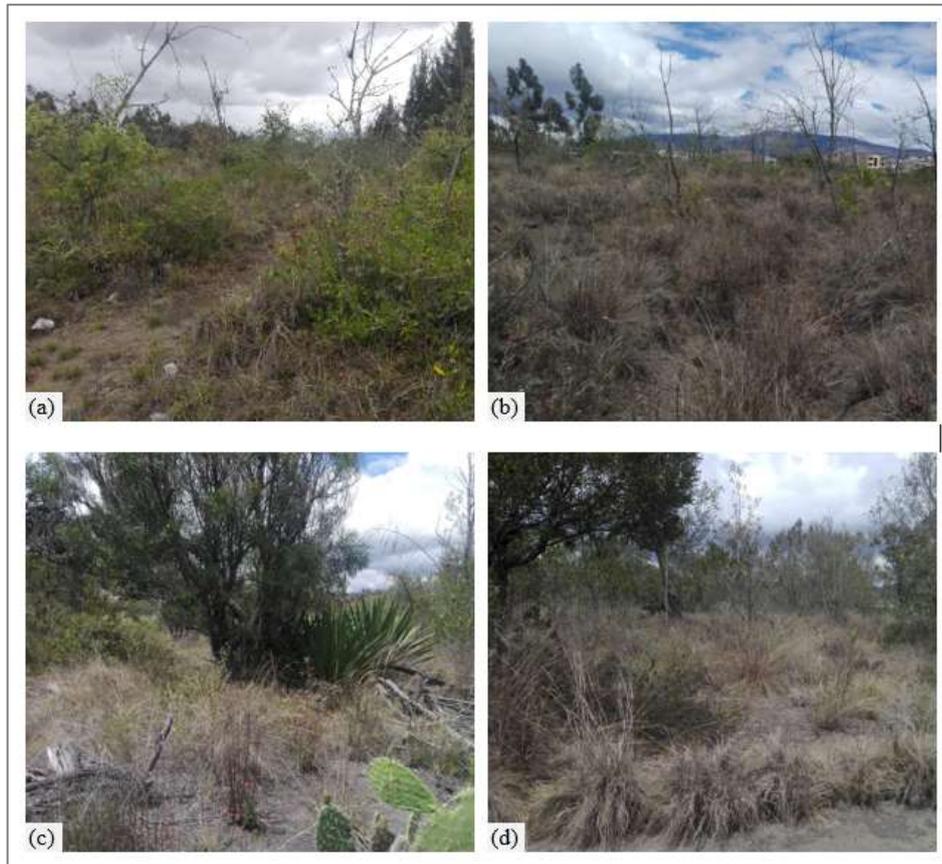


Figura 4-3: Imágenes de los puntos de verificación en el estrato arbustivo

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

En general la zona correspondiente al estrato arbustivo presenta una importante acumulación de combustible vegetal reseco y muerto, el cual no está distribuido de forma uniforme por toda el área al estar separado por suelo desnudo, de forma que si se iniciara un incendio este no podría extenderse por todo el área, pero si afectaría a la vegetación cercana al origen del fuego dependiendo que tan dispersa se encuentre esta última, por tanto la categoría asignada de nivel de riesgo de incendio moderada para el estrato arbustivo es la más adecuada.

3.2.3. Validación mediante puntos de verificación del estrato herbáceo

Se ubicaron varios puntos de verificación en dos de las muestras del estrato herbáceo como se observa en la Figura 5-3 y utilizando la herramienta “superposición de imágenes” de *Google Earth* se los ubicó geográficamente mediante su latitud y longitud como se muestra en la Tabla 17-3, también se utilizó la herramienta “Análisis por ROI’s” descrita en la Sección 2.4.3.2 para conocer el estado de la vegetación entorno a cada punto y poder contrastar la información de las fotografías del lugar.

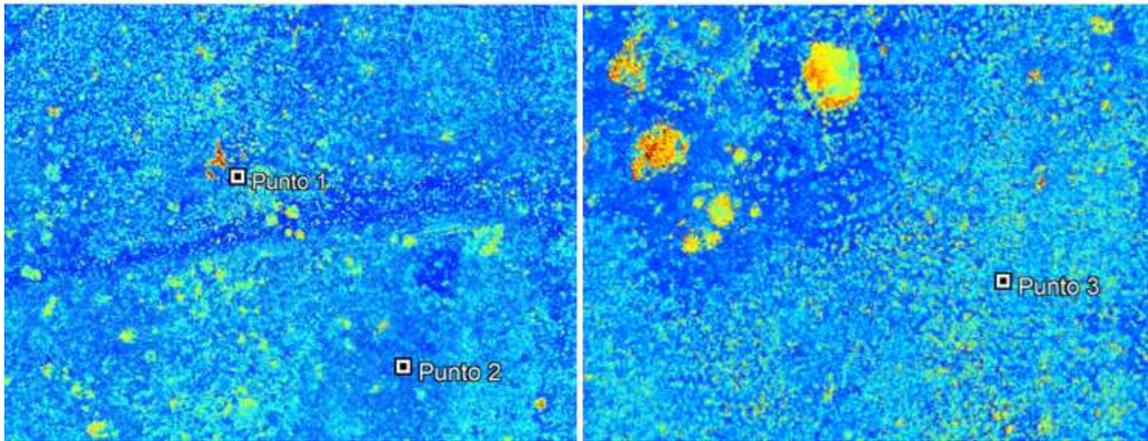


Figura 5-3: Ubicación de los puntos de verificación del estrato herbáceo

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

Tabla 17-3: Coordenadas de los puntos de verificación en el estrato herbáceo

ESTRATO HERBÁCEO	
PUNTOS	UBICACIÓN
Punto 1	Lat: 1°38'57.28"S Long: 78°40'58.09"O
Punto 2	Lat: 1°38'57.94"S Long: 78°40'58.21"O
Punto 3	Lat: 1°38'56.99"S Long: 78°40'57.34"O

Realizado por: Reinoso, Héctor, 2020

En la Figura 6-3 se puede observar las imágenes correspondientes a cada uno de los puntos de verificación mencionados anteriormente, en todas las imágenes de los puntos de verificación se puede notar que la cubierta vegetal predominante son pajonales resecos combinados con escasa vegetación saludable, en algunos sitios como en la Figura 6-3(a) y la Figura 6-3(c) la vegetación es dispersa y de una altura pequeña no mayores a 25 centímetros, pero en otros lugares como los que se observa en la Figura 6-3(b) y Figura 6-3(d) la vegetación es más densa y su distribución es continua abarcando un área importante del lugar en la cual los pajonales pueden llegar hasta una altura de 80 centímetros, los valores de NDVI que se pueden hallar alrededor de cada punto de verificación son: Punto 1 de -0.103 a 0.620 , Punto 2 de -0.09 a 0.181 y el Punto 3 de -0.068 a 0.286, los rangos de valores de los puntos 2 y 3 coinciden con el estado de la vegetación que se observa en la Figura 6-3(b) y Figura 6-3(c) respectivamente, el rango de valores del Punto 1 correspondiente a la Figura 6-3(a) indica que existe desde vegetación reseca hasta vegetación muy saludable, esto último se debe a una planta de durazno que se observa en la Figura 6-3(a) la cual se encuentra muy cercana al Punto 1.



Figura 6-3: Imágenes de los puntos de verificación en el estrato herbáceo

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

En líneas generales la zona correspondiente al estrato herbáceo presenta grandes áreas cubiertas uniformemente de material vegetal muerto y reseco principalmente pajonales como los de la Figura 6-3(d), en los cuales se podría llegar a producir un incendio forestal importante, en consecuencia, la categoría asignada de riesgo de incendio alto es la adecuada para este sitio.

3.3. Desarrollo del plan de acción para mitigar el riesgo de incendio

Se considera las zonas en las que podría iniciarse un incendio al estrato arbustivo y herbáceo particularmente en la época de sequía en la región sierra, siendo los meses de junio, julio, agosto y septiembre los más críticos.(Pazmiño, 2019, p.16)

En caso de producirse un incendio, la flora y fauna de los estratos antes mencionados se verían afectados por las llamas además de los barrios aledaños y el subcentro de salud serían afectados gases de la combustión, por lo tanto la solución es adoptar un conjunto de medidas destinadas a intervenir en el riesgo de incendio, de ser posible previas a la ocurrencia del incendio forestal a fin de evitarlo (Prevención) y de no ser posible, reducir al máximo los efectos potenciales (Mitigación) sobre las personas, los bienes y el medio ambiente.(Ortega y Meza, 2006, p.6)

3.3.1. Metodología

Para poder definir las medidas preventivas y de mitigación ante los incendios forestales se adoptó una metodología de 4 etapas que son:(Ortega y Meza, 2006, p.7)

- Preparar la cartografía del lugar
- Identificar los sectores críticos
- Complementar la información
- Definir las medidas a implementar

3.3.1.1. Preparación de la cartografía

Esta etapa consiste en elaborar un mapa el cual contenga todo elemento que pudieran ser afectados por el fuego, también debe incluir las fuentes que podrían originar un incendio forestal además de otros datos de referencia como: (Ortega y Meza, 2006, p.7)

- Tipo de cobertura vegetal
- Senderos, caminos principales y secundarios
- Cursos y cuerpos de agua
- Construcciones cercanas (casas, bodegas, hospitales, etc.)
- Líneas de ferrocarril
- Carreteras
- Líneas de electricidad
- Zonas para acampar o balnearios
- Infraestructura cercana (oleoductos, represas, acueductos, etc.)

En la Figura 7-3 se observa un mapa de la zona de estudio en la que se incluyen los distintos tipos de cubiertas o estratos, las vías, senderos, viviendas cercanas, edificios cercanos, etc.

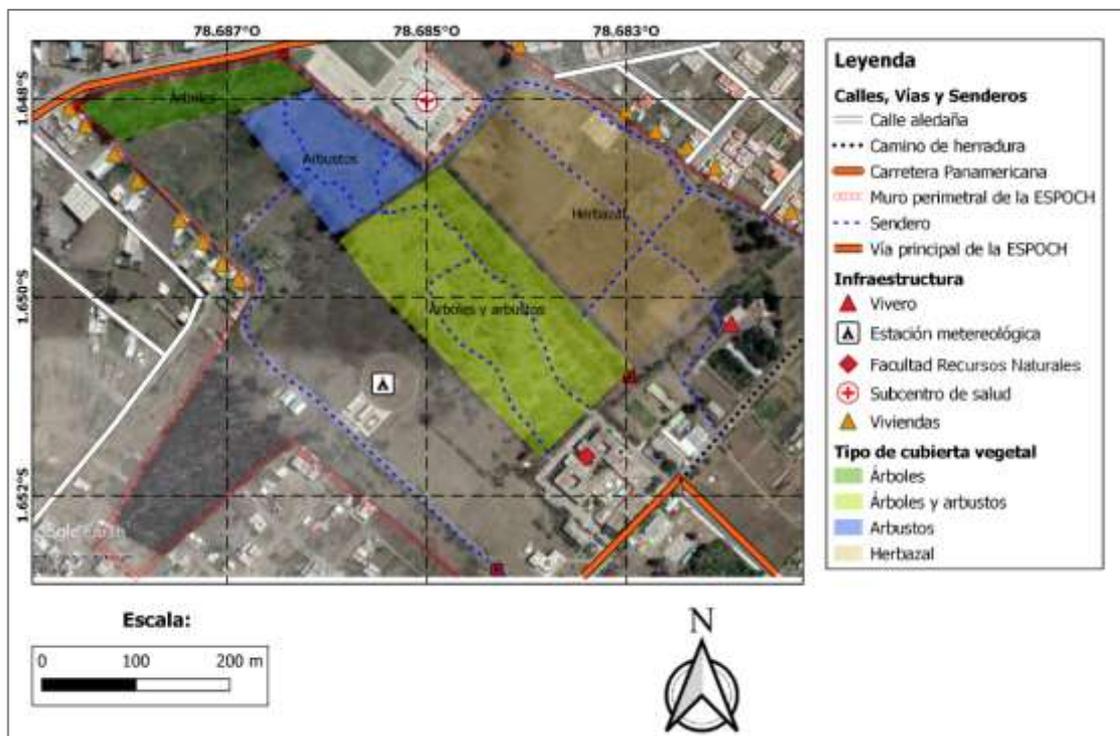


Figura 7-3: Cartografía de la zona de estudio

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

3.3.1.2. Identificar los sectores críticos

Mediante el mapa de la Figura 7-3 se identificó 4 sectores críticos marcados en color rojo en la Figura 8-3, esto sectores son lugares como los herbazales que tiene un riesgo de incendio alto y senderos que atraviesan por medio de los arbustos secos y pajonales, también se consideró el sector 1 debido a la cercanía del bosque a las casas cercanas. (Ortega y Meza, 2006, p.8)



Figura 8-3: Ubicación de los sectores críticos en la zona de estudio

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

En la Tabla 18-3 se observa la información acerca de los sectores críticos como sus coordenadas, descripción del lugar y el posible origen de un incendio.

Tabla 18-3: Información acerca de los sectores críticos

Sector	Coordenadas	Descripción	Causa probable de un incendio forestal
S1	Lat: 1°38'53.55"S Long: 78°41'16.96"O	Sector cercano a las viviendas al otro lado del muro periférico	Fuego provocado por los habitantes de las viviendas aledañas
S2	Lat: 1°38'57.35"S Long: 78°41'0.83"O	Pajonales altos y secos cubriendo una amplia superficie	Fuego provocado por colillas de cigarro mal apagadas o quema deliberada
S3	Lat: 1°38'59.26"S Long: 78°41'4.95"O Lat: 1°38'57.92"S Long: 78°40'57.72"O	Varios senderos que atraviesan el estrato herbáceo y arbustivo.	Fuego provocado por colillas de cigarro mal apagadas o quema deliberada

Realizado por: Reinoso, Héctor, 2020

3.3.1.3. Complementar la información

El paso siguiente es complementar la información con el aporte de datos por parte de personas del lugar (pobladores, trabajadores, etc.), se deberá consultar acerca de las causas o situaciones que hayan provocado anteriormente incendios en el lugar, con el aporte de las personas se puede detectar nuevos sectores o nuevas probables causas de incendio. (Ortega y Meza, 2006, p.9)



Figura 9-3: Información complementaria de los sectores críticos en la zona de estudio

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

En la zona de estudio, gracias al aporte del personal de seguridad de la Institución se obtuvo información adicional y se elaboró la Figura 9-3 y la Tabla 19-3.

Tabla 19-3: Información complementaria acerca de los sectores críticos

Sector	Coordenadas	Descripción	Causa probable de un incendio forestal
S1	Lat: 1°38'53.55"S Long: 78°41'16.96"O	Sector cercano a las viviendas al otro lado del muro periférico	Fuego provocado por los habitantes de las viviendas aledañas, acumulación de basura arrojada desde las casas contiguas.
S2	Lat: 1°38'57.35"S Long: 78°41'0.83"O	Pajonales altos y secos cubriendo una amplia superficie	Fuego provocado por colillas de cigarro mal apagadas o quema deliberada
S3	Lat: 1°38'59.26"S Long: 78°41'4.95"O Lat: 1°38'57.92"S Long: 78°40'57.72"O	Senderos que atraviesan el estrato herbáceo y arbustivo.	Fuego provocado por colillas de cigarro mal apagadas o quema deliberada
S4	Lat: 1°38'52.20"S Long: 78°41'14.11"O	Sector del bosque con el muro perimetral derrumbado por donde ingresan personas ilegalmente por las noches	Fogatas mal apagadas, colillas de cigarro encendidas, quema deliberada
S5	Lat: 1°38'50.14"S Long: 78°41'4.46"O	Sector del muro perimetral con una cerca metálica por donde personas ingresan ilegalmente por las noches	Fogatas mal apagadas, colillas de cigarro encendidas, quema deliberada

Realizado por: Reinoso, Héctor, 2020

3.3.1.4. Definir las medidas a implementar

Es necesario determinar medidas para la prevención y mitigación del riesgo de incendio para cada una de las causas probables dependiendo de cada situación, tal como se detalla en la Tabla 20-3. (Ortega y Meza, 2006, p.10)

Tabla 20-3: Información complementaria acerca de los sectores críticos

Sector	Descripción	Medidas	
		Prevención	Mitigación
S1	Sector cercano a las viviendas al otro lado del muro periférico	Letrero con mensaje de “no arrojar basura” y tareas de limpieza del sector	-
S2	Pajonales altos y secos cubriendo una amplia superficie	Letrero con mensaje de “peligro de incendio forestal”	Construcción de línea cortafuegos
S3	Varios senderos que atraviesan el estrato herbáceo y arbustivo.	Letrero con mensaje de “peligro de incendio forestal”	Construcción de línea cortafuegos
S4	Sector del bosque con el muro perimetral derrumbado por donde ingresan personas ilegalmente por las noches	Reparar el muro Incrementar la vigilancia	-
S5	Sector del muro perimetral con cerca metálica por donde personas ingresan ilegalmente por las noches	Cerrar la separación entre barrotes de la cerca. Incrementar la vigilancia	-

Realizado por: Reinoso, Héctor, 2020

3.3.2. Medidas de prevención y mitigación del riesgo de incendio forestal

3.3.2.1. Instalación de letreros con mensajes de precaución o indicaciones básicas

Los letreros deben contener mensajes como: “Prohibido realizar fogatas”, “no arrojar basura” “Peligro incendio forestal” u otro tipo de mensaje más elaborado. En la zona de estudio, los letreros que se colocaran serán de dos tipos, el primero servirá para evitar la acumulación de basura que podría contribuir a iniciar un incendio forestal similar al que se observa en la Figura 10-3(a) y el otro letrero buscara concientizar a las personas el nivel de peligro de incendio forestal del lugar mediante un semáforo de peligro de incendios forestales como el de la Figura 10-3(b). (Ortega y Meza, 2006, p.11)



Figura 10-3: Letreros con señalética preventiva

Fuente: (OEDIMDECOR, 2020; Argentina Forestal, 2020)

En total se planifica colocar un total de 10 letreros con el semáforo de peligro de incendios forestales, colocados al inicio y en las intersecciones de los senderos como se observa en la Figura 11-3 en donde este tipo de letreros están representados por una estrella amarilla, en la misma imagen los letreros de “No arrojar basura” están representados por un pequeño triángulo negro con borde blanco y son en total 4 , de los cuales 3 estarán ubicados al inicio de cada sendero y uno se colocara en la parte del muro perimetral de la ESPOCH que colinda cerca con las casas aledañas donde las personas arrojan basura.



Figura 11-3: Ubicación de la señalética preventiva dentro de la zona de estudio

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

3.3.2.2. Construcción de líneas cortafuegos

Los cortafuegos o también llamadas líneas cortafuegos son porciones de terreno sin vegetación que detienen o reducen el avance del fuego, las líneas cortafuego pueden ser de dos tipos, barrera y mineral. Los cortafuegos de tipo barrera pueden ser naturales como los ríos o formaciones rocosas y artificiales como los caminos de herradura, carreteras o líneas férreas; los cortafuegos

de tipo mineral son una franja de terreno de la cual se ha retirado toda la vegetación con maquinaria o a mano y se ha reemplazado por material pétreo como la grava. El ancho de una línea cortafuegos va a depender de la vegetación o recurso a proteger, pero de manera general el ancho deberá ser al menos 2 veces la altura de lo que se quiere proteger. (Ortega y Meza, 2006, p.12)

En la zona de estudio se planea construir una línea cortafuegos de tipo barrera que atraviese la superficie del estrato herbáceo ya que es la que tiene mayor riesgo de incendio, la ubicación de la línea cortafuegos se puede observar en la Figura 12-3 pintada de color turquesa, la más larga tendrá una longitud de 418 y la más corta medirá 134 metros, ambos cortafuegos deberán tener un ancho de al menos 4 metros ya que servirán como camino de acceso para el camión de bomberos en caso de que sea necesario llamarlos, el extremo inferior de la línea se conectará con el camino de herradura punteado de color negro en la Figura 12-3.

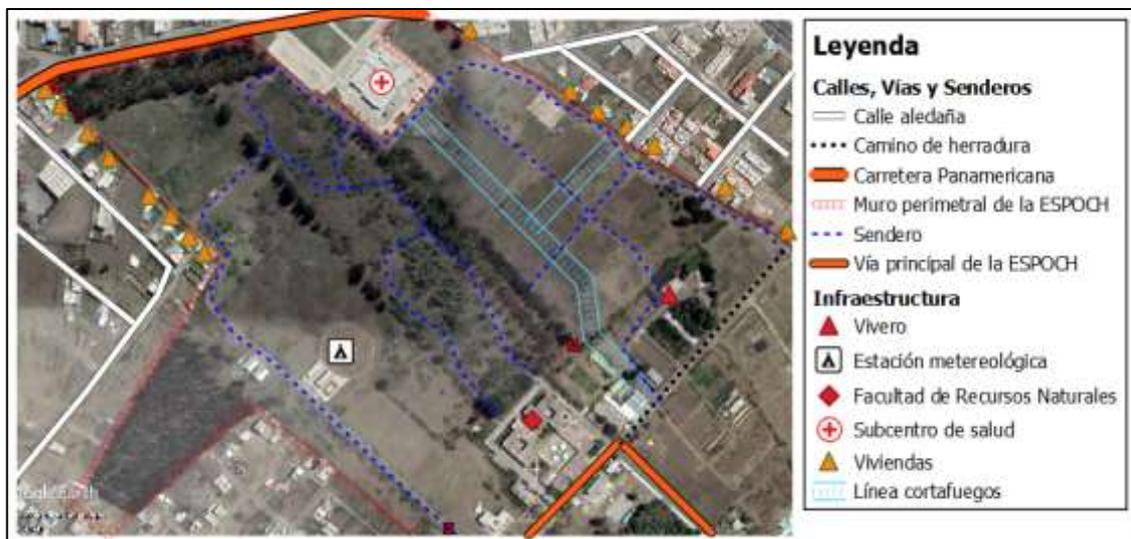


Figura 12-3: Ubicación de la línea Cortafuegos en la zona de estudio

Realizado por: Reinoso Héctor, 2020

3.3.2.3. Otras medidas de prevención y mitigación de incendios forestales

Dependiendo del entorno en el que podría suscitarse un incendio forestal se podrían implementar otras medidas de prevención y mitigación como: (Váscones, 2012; CBDMQ, 2018)

- Socializar y difundir mensajes de prevención y concienciación a los diferentes públicos objetivos, mediante los diferentes canales y herramientas de comunicación como redes sociales, medios de comunicación convencionales, charlas y talleres de prevención, etc.
- Detección y monitorización mediante personal motorizado o ubicado en torres de observación en puntos estratégicos dentro del área.
- Tareas de limpieza para reducir la acumulación de combustible vegetal en puntos críticos.
- Coordinación y capacitación con el Cuerpo de Bomberos de la localidad.
- Construcción de red de hidrantes y vías de emergencia para acceso de motobombas y equipos de control de incendios.

Como dato adicional, según la Secretaria de Gestión de Riesgos (2016), recomienda tomar las

siguientes medidas en caso de encontrarse dentro o cerca de un incendio forestal:

- Alejarse del fuego, dirigirse hacia los lados del incendio y no ingresar a la zona quemada
- Buscar un refugio donde protegerse de las llamas y el humo
- Evitar inhalar humo, cubrirse la boca con un pañuelo seco y salir del área afectada inmediatamente
- No permanecer mucho tiempo expuesto al humo ya que podría asfixiarse
- No tratar de apagar el fuego si no se tiene conocimiento adecuado
- Comunicarse a la línea de emergencia ECU-911

CONCLUSIONES

- El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada o NDVI es un buen indicador de la actividad fotosintética de la cubierta vegetal y es utilizado para aplicaciones de prevención de incendios ya que permite identificar la calidad y la cantidad de vegetación que podría verse afectada por un incendio.
- Los parámetros establecidos para hallar el riesgo de incendio forestal guardan relación tanto con las características intrínsecas del combustible vegetal como con el estado de salud la vegetación, ambos parámetros han sido calificados y categorizados para poder de esta manera cuantificar y categorizar el nivel de riesgo de incendio forestal.
- El sistema de adquisición de imágenes permitió obtener imágenes multiespectrales con una resolución espacial de hasta 4 centímetros por pixel a una altura cercana a los 60 metros, con esta resolución se puede obtener resultados más exactos acerca de la cobertura de la superficie de la zona de estudio ya que al ser la superficie capturada de hasta 18 centímetros cuadrados por pixel, es más difícil que dentro de una misma superficie capturada se encuentren diferentes tipos de cobertura vegetal y suelos desnudos, como sucede con las imágenes satelitales.
- El algoritmo empleado para estimar la cantidad de vegetación que se encuentra en riesgo de ignición, está basado en el algoritmo de isodata, el cual permite segmentar una imagen NDVI en 2 regiones, una correspondiente a los suelos desnudos y la otra a zonas con vegetación, en ocasiones el algoritmo interpretará a la vegetación muerta como suelos desnudos por lo que se requerirá realizar un análisis de las distancias entre los centroides de cada región , teniendo en cuenta que si distancia es alrededor de 0.2 o mayor la diferenciación entre suelos y vegetación está bien marcada, mientras que si la distancia es alrededor de 0.1 o menor existe poca diferenciación entre los valores de NDVI indicando que la cobertura contiene vegetación muerta y vegetación reseca entremezclada.
- En base a la validación de resultados, se concluye que: el estrato herbáceo sería el más afectado de llegarse a producir un incendio ya que la superficie está cubierta en un 42.34% de vegetación reseca, en el estrato arbustivo presenta un 30.5% de vegetación reseca, pero debido a que las zonas con suelo descubierto entre la vegetación son recurrentes, el fuego no podría propagarse con facilidad y finalmente el estrato arbóreo presenta un 17.31% de vegetación reseca, muy poco combustible vegetal como para que se produzca un incendio forestal.
- En el desarrollo del plan de prevención y mitigación de incendios para el escenario propuesto, se toma en cuenta los resultados del nivel de riesgo de incendio forestal en cada estrato, para estratos de riesgo bajo y moderado se tomaron medidas preventivas como la colocación de señalética preventiva, en los estratos de alto riesgo de incendio se tomó medidas preventivas y de mitigación como lo son la colocación de señalética preventiva y la construcción de líneas cortafuegos.

RECOMENDACIONES

- Para evaluar la calidad de la vegetación se recomienda experimentar con otros índices menos conocidos como: índice de Vegetación Perpendicular (PVI), el Índice de suelo Ajustado (SAVI), Índice Diferencial Normalizado de Agua (NDWI), etc; la información acerca de las fórmulas matemáticas, así como las bandas espectrales que utiliza cada índice se encuentra fácilmente en internet.
- Se recomienda emplear parámetros adicionales con la finalidad de obtener unos resultados más precisos acerca del nivel de riesgo de incendio forestal, sobre todo en áreas más extensas como las reservas naturales o parques ecológicos, se podría utilizar factores climáticos; mapas topográficos, registros de incendios anteriores, etc.
- Para poder cubrir un área más extensa del escenario propuesto por cada imagen capturada se recomienda elevar el dron a por lo menos unos 600 metros de altura, sin embargo, se debe tener en cuenta que a una mayor altura se reducirá la resolución espacial en cada captura por lo que resultados obtenidos del procesamiento serán menos precisos.
- Para desarrollar el algoritmo y el posterior procesamiento de imágenes utilizando el mismo, Matlab necesita recursos computacionales como: disponibilidad de memoria RAM de al menos 4 GB y un procesador con una velocidad mínima de 3 GHz debido a que al procesar imágenes, Matlab las transforma en matrices de filas y columnas cada una de las 4 imágenes, para posteriormente hallar el NDVI, la imagen RGB, calcular porcentajes, etc.
- Para realizar la alineación de las imágenes mediante la función *imregister*(), las técnicas de alineación utilizadas para las imágenes de la cámara micasense RedEdge MX no sirven para alinear imágenes de otro tipo de sensores, por lo que se recomienda utilizar de la *Toolbox* de Matlab la herramienta *Registration Estimator* para probar diversos métodos de alineación y encontrar el más adecuado para la marca y modelo del sensor multiespectral.
- Para obtener mayor información acerca de la vegetación o el suelo del lugar de estudio como la temperatura, humedad o el contenido de agua en la vegetación se recomienda reemplazar la Cámara Multiespectral Micasense por otro sensor con la capacidad de detectar la energía de las bandas espectrales SWIR y LWIR.

TRABAJOS FUTUROS

El desarrollo del presente trabajo de titulación forma parte como un resultado parcial del proyecto de investigación denominado: “Procesamiento digital de imágenes usando inteligencia artificial para diseño de dispositivos electrónicos autónomos “. Por lo tanto, a partir del presente trabajo de titulación y aprovechando que la cámara tiene la capacidad de transmitir las capturas de imágenes hacia un computador, además de las herramientas que ofrece Matlab para la adquisición de imágenes, se podría adaptar el algoritmo desarrollado en este proyecto para realizar el procesamiento de las imágenes en tiempo real y determinar directamente sobre el escenario propuesto, los lugares con vegetación en riesgo de incendio.

GLOSARIO

Antropogénico: De origen humano o derivado de la actividad del hombre.

Cartografía: La cartografía es el diseño y producción de mapas, ya sea por un individuo (un cartógrafo) o una institución.

Clorofila: Pigmento de color verde que se halla presente en las hojas y tallos de muchos vegetales y que es responsable del proceso de fotosíntesis.

Emisividad: La emisividad o emitancia, es la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debido a su temperatura.

Gimbal: plataforma motorizada que se controla mediante una placa con varios sensores. Generalmente son acelerómetros y compás magnético que se encargan de mantener un objeto estabilizado en todo momento.

Heliofanía: representa la duración del brillo solar u horas de sol, y está ligada al hecho de que el instrumento utilizado para su medición, heliofanógrafo.

Lidar: son las siglas de *Laser Imaging Detection and Ranging*, es un dispositivo que utiliza rayos láser pulsados y reflejados sobre un objeto para medir distancia, posición o velocidad.

Oceanografía: Ciencia que estudia las aguas y los fondos de los mares y los océanos, desde el punto de vista físico, químico y biológico, así como su fauna y su flora.

Radar: Sistema de detección de objetos empleado en aeronáutica, navegación, astronomía, etc., que sirve para indicar la presencia de un objeto y determinar la distancia a la que se halla, mediante la emisión de ondas especiales de altísima frecuencia reflejadas en él.

Reflectancia: valor porcentual de la energía radiante que es reflejada por un objeto, del total de energía radiante que incide su superficie.

Reflexión: La reflexión es el cambio en la dirección de un rayo de luz cuando este no logra traspasar la interfaz entre dos medios.

Turbidez: La turbidez es una medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión.

BIBLIOGRAFÍA

AGISOFT. *Features Professional Edition*. [blog]. 2020. [Consulta: 12 agosto 2020]. Disponible en: <https://www.agisoft.com/features/professional-edition/>.

ARGENTINA FORESTAL. *Misiones y Corrientes con alerta extrema por peligro de incendios forestales y rurales*. [blog]. 2020. [Consulta: 5 noviembre 2020]. Disponible en: <https://www.argentinaforestal.com/2020/03/15/misiones-y-corrientes-con-alerta-extrema-por-peligro-de-incendios-forestales-y-rurales/>.

AROZARENA, A. *Sistemas de captura de la información : fotogrametría y teledetección* [en línea]. 3. Madrid: s.n., 2016. [Consulta: 16 julio 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/8032385/TELEDETECCI%C3%93N_Y_SISTEMAS_DE_TRATAMIENTO_DIGITAL_DE_IM%C3%81GENES

AVALOS, K., Percepción Remota y sus Aplicaciones a La Evaluación De La Calidad Del Agua (Trabajo de titulación) (Ingeniería) [en línea]. Universidad Nacional Autónoma De México, México DF, México. 2012. p. 18. [Consulta: 27 mayo 2020]. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2409/Tesis.pdf?sequence=1>.

BASTERRA, I. "Teledeteccion imágenes satelitales, procesamiento digital de imágenes". Catedra de fotointerpretacion departamento de geociencias facultad de ingenieria-UNNE [en línea], 2011, pp. 33. [Consulta: 16 julio 2020]. Disponible en: <http://ing.unne.edu.ar/dep/goeciencias/fotointer/pub/teoria2011/parte02/tdi.pdf>

BAUTISTA, R. Diseño e implementación de un sistema de visión artificial para análisis de datos NDVI en imágenes espectrales de cultivos de brócoli obtenidos mediante una aeronave pilotada remotamente (Trabajo de titulación) (Maestría) [en línea]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Instituto de Posgrado y Educación Continua - ESPOCH. Riobamba, Ecuador. 2018. pp. 33-44. [Consulta: 7 agosto 2020]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/8034/1/20T00959.PDF>.

BRAVO, D., et al. *Biofísica del Homo Sapiens* [blog]. 2019. [Consulta: 21 mayo 2020]. Disponible en: <https://biofiscadelhomosapiens.blogspot.com/>.

BRAVO, F. *Teledetección espacial* [en línea]. Huánuco-Perú: Geomática Ambiental S.R.L. 2017. [Consulta: 4 mayo 2019]. Disponible en: https://acolita.com/wp-content/uploads/2018/01/Teledeteccion_espacial_ArcGeek.pdf.

CASTAÑO, S., et al. *Teledeteccion y Sistemas de Informacion Geografica* [en línea]. Castilla-La Mancha: s.n., 1996. [Consulta: 4 mayo 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2282743>.

CBDMQ. "*Plan de prevención y respuesta a incendios forestales del distrito metropolitano de Quito. Cuerpo de Bomberos del Distrito Metropolitano de Quito*". Cuerpo de Bomberos del Distrito Metropolitano de Quito [blog], 2018, (Ecuador) 489 (20), pp. 313-335. [Consulta: 18 diciembre 2020] ISSN 2357-3759. Disponible en: http://www7.quito.gob.ec/mdmq_ordenanzas/Comisiones del Concejo/Ambiente/2018/2018-10-16/Presentación Cuerpo de Bomberos/181015 PPTT Plan de Prevención y Respuesta a Incendios Forestales 2018.pdf.

CEDE, R., et al. "Introducción a la percepción remota y sus aplicaciones Geologicas". SIGMUR. SIG y Teledetección en la Universidad de Murcia [en línea], 2011, (España) 84 (4), pp. 3-4. [Consulta: 13 mayo 2020]. ISSN 0716-078X. Disponible en: http://www.um.es/geograf/sigmur/%0Ahttp://www.ideam.gov.co/documents/13257/13817/Protocolo_para_la_cuantificación_Deforestación_Nivel_Nacional.pdf.

CHIVATÁ, V. Análisis espacial comparativo de los focos de calor con las coberturas de la tierra corine land cover y el raster de susceptibilidad a incendios de la cobertura vegetal (Trabajo de titulación)(Ingeniería) [en línea]. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. 2017. p. 13. [Consulta: 31 agosto 2020]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/143454245.pdf>.

CHUVIECO, E. *Fundamentos de Teledeteccion* [en línea]. Madrid: s.n. 1995. [Consulta: 8 mayo 2020]. Disponible en: <http://cursosihlla.bdh.org.ar/Sist. Cart. y Teledet./Bibliografia/FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO.pdf>.

CUERNO, C. 2015. "Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil". Journal of Chemical Information and Modeling [en línea], 2015, (España) 53(9), pp. 1689-1699. [Consulta: 6 mayo 2020]. ISSN 1098-6596. Disponible en: <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM015384.pdf>.

DELGADO, R. *Introducción a los Modelos de Agrupamiento*. [en línea]. 2019. [Consulta: 16 julio 2020] Disponible en: <https://medium.com/datos-y-ciencia/introducción-a-los-modelos-de-agrupamiento-en-r-72739633e8f3>.

DENHAM, M., 2007. Predicción de Incendios Forestales Basada en Algoritmos Evolutivos Guiados por los Datos Memoria (Trabajo de titulación) (Doctorado). [en línea] Universidad Autónoma de Barcelona Escuela, Departamento de Arquitectura de Computadores y Sistemas Operativos, Barcelona. 2015. p.3. [Consulta: 25 junio 2020]. Disponible en:

<https://core.ac.uk/download/pdf/13283059.pdf>.

DÍAZ, J. Estudio de Índices de Vegetación a partir de Imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y Aplicaciones de estos a la Agricultura de Precisión (Trabajo de titulación) (Maestría) [en línea]. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Geografía e historia, España. 2015. p. 29. [Consulta: 8 mayo 2020]. Disponible en: http://eprints.ucm.es/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf.

DJI. *Consumer drones comparison* [blog]. 2020. [Consulta: 11 junio 2020]. Disponible en: <https://www.dji.com/products/compare-consumer-drones>.

EOS. *LANDSAT 8* [blog]. 2020. [Consulta: 28 mayo 2020]. Disponible en: <https://eos.com/landsat-8/es/>.

ESPOCH. Senderos de “Flora Nativa” y “de Los Búhos” se implementaron en la ESPOCH [blog]. Riobamba: 2016. [Consulta: 27 agosto 2020]. Disponible en: <https://epoch.edu.ec/index.php/component/k2/item/508-senderos-de-“flora-nativa”-y-“de-los-búhos”-se-implementaron-en-la-epoch.html>.

ESTORNELL, J. Estimación de la vegetación arbustiva con sensores aerotransportados. [blog]. 2012. [Consulta: 28 mayo 2020]. Disponible en: <http://www.comunidadism.es/actualidad/estimacion-de-la-vegetacion-arbustiva-con-sensores-aerotransportados>.

FLORES, V. *Notas del curso de fotointerpretación* [en línea]. Guanajuato: División de Ingeniería, 2015. [Consulta: 8 julio 2020] Disponible en: <https://es.scribd.com/document/323383060/Notas-del-curso-de-Fotointerpretacion>.

GEOCOM. *Dron matrice 600 pro DJI*. [blog]. 2020. [Consulta: 11 junio 2020]. Disponible en: <https://www.geocom.cl/products/matrice-600-pro-dji>.

GIUSIANO, M. Drones agrícolas en el manejo sitio específico de malezas análisis de beneficios económicos (Trabajo de titulación)(Licenciatura) [en línea]. Universidad Siglo 21. 2017. p.19 . [Consulta: 4 junio 2020]. Disponible en: [https://repositorio.uesiglo21.edu.ar/bitstream/handle/ues21/14078/GIUSIANO MONICA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uesiglo21.edu.ar/bitstream/handle/ues21/14078/GIUSIANO%20MONICA.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

IDEAM. *Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal - Escala 1:100.000* [en línea]. Bogota: s.n, 2011, ISBN 9789588067414. [Consulta: 8 julio 2020]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/13257/14369/PROTOCOLO+INCENDIOS+4Oct.pdf>.

<http://www.ideam.gov.co/documents/13257/14369/ANEXOS+protocolo+incendios.pdf/44f98b4b-584f-4488-b2d5-c0c555be6c11>.

KHARUF-GUTIERREZ, S., et al. "Análisis de imágenes multiespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados". *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones* [en línea], 2018, (Cuba) 39(2), pp. 79-91. [Consulta: 30 abril 2020]. ISSN 1815-5928. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/326160432_Analisis_de_imagenes_multiespectrales_adquiridas_con_vehiculos_aereos_no_tripulados.

LARA, B. Fragmentación de pastizales en el centro de la provincia de Buenos Aires mediante imágenes LANDSAT (Trabajo de titulación) (Maestría) [en línea]. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Argentina. 2015. pp. 32-33. [Consulta: 12 mayo 2020]. Disponible en:

https://comisiones.ipgh.org/CARTOGRAFIA/Premio/Tesis_2015/Tesis_Bruno_Lara.pdf.

LEO, D. "Drones: nueva dimensión de la teledetección agroambiental y nuevo paradigma para la agricultura de precisión". *Agromensajes* [en línea], 2015. (Argentina) vol. 41, pp. 7-17. [Consulta: 4 junio 2020]. Disponible en: <https://rephip.unr.edu.ar/handle/2133/13373>.

LIRA, J. *Tratamiento Digital de Imágenes* [en línea]. Segunda Ed. México, D.F: s.n, 2010. [Consulta: 8 julio 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/283080110_Tratamiento_Digital_de_Imagenes_Multi_espectrales.

LOZANO, P., et al. "Diversidad y composición florística del Bosque Los Búhos ubicado en la provincia de Chimborazo, Ecuador". *Enfoque UTE* [en línea], 2018, (Ecuador) 9(3), pp. 12-28. [Consulta: 17 agosto 2020]. ISSN: 1390-6542. Disponible en: <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/enfoqueute/v9n3/1390-6542-enfoqueute-9-03-00012.pdf>.

MARTINEZ, J. & MARTÍN, I. *Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente* [en línea]. Madrid: s.n, 2010. [Consulta: 5 mayo 2020]. Disponible en: <http://www.aet.org.es/?q=guia-didactica>.

MATHWORKS. *Image Processing Toolbox* [blog]. 2020. [Consulta: 30 julio 2020]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/products/image.html>.

MICASENSE. *Getting Started With RedEdge*. [blog]. 2019. [Consulta: 8 de mayo 2020]. Disponible en: <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/235402807-Getting-Started-With-RedEdge>.

MICASENSE KNOWLEDGE BASE, *RedEdge Camera Radiometric Calibration Model* [blog]. 2020. [Consulta: 14 septiembre 2020]. Disponible en: <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/115000351194-RedEdge-Camera-Radiometric-Calibration-Model>.

MORENO, G. "Información Geográfica Y Teledetección, Estudio De Caso En Teledetección". Estudio De Caso En Sierra De Gata [en línea], 2016, (España), 4(7), pp. 246-268. [Consulta: 2 julio 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5776243>.

MUÑOZ, P. "Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación". Centro de información de recursos Naturales [en línea], 2013, (Chile), pp. 1-15. [Consulta: 21 mayo 2020]. Disponible en: [http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema Índices de vegetación%2C Pedro Muñoz A.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema%20Indices%20de%20vegetación%20Pedro%20Muñoz%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

NOVOA, E. Determinación del estado fisiológico en una plantación de pinus radiata D. Don, mediante técnicas de teledetección en la comunidad de Totoras, parroquia Achupallas, cantón Alausí, provincia de Chimborazo (Trabajo de titulación) (Ingeniería) [en línea]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Recursos Naturales. Ecuador. 2016. p. 1 [Consulta: 30 de abril 2020]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4995>.

OEDIMDECOR. *Señal prohibido arrojar basura* [blog]. 2020. [Consulta: 5 noviembre 2020]. Disponible en: <https://oedimdecor.com/producto/senal-prohibido-arrojar-basura/>.

ORTEGA, M. & MEZA, A. "Manual Medidas Prediales de Protección de Incendios Forestales". CONAF [en línea], 2006, (Chile), 451, pp. 6-12. [Consulta: 5 noviembre 2020] Disponible en: https://www.conaf.cl/wp-content/files_mf/1361911114Prediales.pdf.

ORTIZ, M. Análisis de los efectos de la erupción del volcán Tungurahua a través del procesamiento e interpretación de imágenes satelitales, para tomar medidas de protección civil (Trabajo de titulación)(Ingeniería). [en línea]. Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2019. pp. 6-43. [Consulta: 8 mayo 2020]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/13434>.

PALACIOS, H. & BUENO, M. "La teledetección en arqueología: el instrumento SAR". Saldvie [en línea], 2004, (España) 4(1), pp. 331-361. [Consulta: 28 mayo 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2141884.pdf>.

PALOMINO, N. & ROMAN, U. "Técnicas de Segmentación en Procesamiento Digital de Imágenes". Gaceta Sanitaria / S.E.S.P.A.S [en línea], 2012, (Perú) 26 (1), pp. 57-62. [Consulta: 23 julio 2020]. ISSN 0213-9111. Disponible en: <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/sistem/article/view/3299>.

PAZMIÑO, D. "Peligro de incendios forestales asociado a factores climáticos en Ecuador". FIGEMPA: Investigación y Desarrollo [en línea], 2019, (Ecuador) 1(1), pp. 10-18. [Consulta: 13 noviembre 2020]. ISSN 1390-7042. Disponible en: <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/2899/1/109458.pdf>.

PINO, E., "Los drones una herramienta para una agricultura eficiente: un futuro de alta tecnología". Idesia [en línea], 2019, (Perú) 37(1), pp. 75-84. [Consulta: 11 junio 2020]. ISSN 07183429. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292019000100075.

REUTER, F. & PEDENOVI, A. *Los drones y sus Aplicaciones* [en línea]. Santiago del Estero: s.n., 2019. [Consulta: 4 junio 2020]. Disponible en: https://fcf.unse.edu.ar/wp-content/uploads/2014/07/SD-43-Drones-y-su-aplicacion-a-la-ingenieria-REUTER_r.pdf.

RÍOS, R. & CASTILLO, E. *TeleSAT, aplicaciones para la enseñanza de los cambios y análisis de los recursos naturales*. [en línea]. Santiago de Chile: s.n., 2004. [Consulta: 14 mayo 2020]. Disponible en: http://www3.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/jornada/programa/t-7_trab_39.pdf.

ROSENTRETER, J. & FENSKE, K. *Landsat 8*. [blog]. 2020. [Consulta: 28 mayo 2020]. Disponible en: <https://blogs.fu-berlin.de/reseda/landsat-8/>.

SALVATIERRA, C. *Fundamentos de procesamiento digital de imágenes de satélite* [en línea]. Mendoza: s.n., 2004. [Consulta: 30 julio 2020]. Disponible en: http://ffyl1.uncu.edu.ar/IMG/pdf/Notas_clase_Procesamiento_digital.pdf.

SECRETARIA DE GESTION DE RIESGOS DE ECUADOR. *Informe de Situación - Incendios Forestales a nivel nacional 2018* [en línea], no. 111. Ecuador: s.n., 2012. [Consulta: 30 abril 2020]. Disponible en: <http://www.ambiente.gob.ec/aprende-sobre-incendios-forestales-unete-a-cuidemoslosbosques/>.

SGR. *SGR impulsa campaña de prevención ante incendios forestales "Algo Nuestro se Quema"* [blog]. Ecuador: s.n., 2016. [Consulta: 22 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/sgr-impulsa-campana-de-prevencion-ante-incendios-forestales-algo-nuestro-se-quema/>.

SITEP. *¿Qué tipo de dron escojo? Ala fija, multicóptero o helicóptero* [blog]. 2020. [Consulta: 4 junio 2020]. Disponible en: <http://sitep.com/que-tipo-de-dron-escojo-ala-fija-multicoptero-o-helicoptero/>.

SNGRE. *Incendios Forestales* [blog]. 2019. [Consulta: 11 junio 2020]. Disponible en:

<https://www.gestionderiesgos.gob.ec/incendios-forestales/>.

SUQUILANDA, C. Estimación del grado de severidad causada por un incendio sobre una cobertura forestal en el sector de Iruis (Azua), utilizando técnicas de teledetección (Trabajo de titulación) (Ingeniería) [en línea]. Universidad de Cuenca, Facultad de Ciencias Agropecuarias Carrera de Ingeniería Agronómica, Cuenca, Ecuador. 2020. pp. 27-28. [Consulta: 4 agosto 2020]. Disponible en: http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/34445/1/Trabajo_de_titulacion.pdf.

TORRES, A. "Procesamiento digital de imágenes". Perfiles Educativos [en línea], 1996, no. 72, pp. 2. [Consulta: 16 julio 2020]. ISSN 0185-2698. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/132/13207206.pdf>.

TYCGIS. *Cámaras multispectrales* [blog]. 2019. [Consulta: 30 abril 2020]. Disponible en: <https://tycgis.com/rededge-mx/>.

VALDANO, T. & GUAMAN, A. Monitoreo de maíz duro mediante índices de vegetación obtenidos por imágenes satelitales en Loja y Manabí (Trabajo de titulación) (Ingeniería) [en línea]. Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador. 2018. p.1. [Consulta: 30 abril 2020]. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/15194>.

VARGAS, N. "Nota técnica sobre el procesamiento fotogramétrico de imágenes multispectrales captadas con drones usando la cámara Parrot Sequoia y el programa Agisoft PhotoScan Pro" [en línea], 2019, no.2, pp. 3. [Consulta: 30 abril 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/331559402_Nota_tecnica_sobre_el_procesamiento_fotogrametrico_de_imagenes_multispectrales_captadas_con_drones_usando_la_camara_Parrot_Sequoia_y_el_programa_Agisoft_PhotoScan_Pro.

VÁSCONES, M. *Ecuador 44: Incendios Forestales: la vulnerabilidad del Parque Metropolitano Guangüiltagua* [blog]. 2012. [Consulta: 11 diciembre 2020]. Disponible en: <http://mariovasconez.blogspot.com/2012/09/ecuador-44-incendios-forestales-la.html>.

VERGARA, J. *Ondas Electromagnéticas Guiadas* [blog]. 2016. [Consulta: 21 mayo 2020]. Disponible en: <http://oemguiadas.blogspot.com/p/conceptos-basicos.html>.

ZÁRATE, L. *Estudio de las características físicas y geométricas de la llama en los incendios forestales* [en línea]. 1. Catalunya: s.n., 2004. [Consulta: 25 junio 2020]. Disponible en: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6436/04CAPITULO2.PDF>.

ANEXOS

ANEXO A. Equivalencias de características del combustible vegetal a las categorías del nivel 3 del sistema Corine Land Cover

ANEXO 3. EQUIVALENCIAS DE VULNERABILIDAD ECONÓMICA Y ECOSISTÉMICA A LAS CATEGORÍAS DEL NIVEL 3 DEL SISTEMA CORINE LAND COVER PARA COLOMBIA (IDEAM, IGAC, IAVH, SINCHI, IAP, INVEMAR 2010)

COBERTURA (CLASIFICACIÓN CORINE LAND COVER -NIVEL 3-)	CÓDIGO CORINE LAND COVER	VULNERABILIDAD ECONÓMICA	CALIFICACIÓN VULNERABILIDAD ECONÓMICA	VULNERABILIDAD ECOSISTÉMICA	CALIFICACIÓN VULNERABILIDAD ECOSISTÉMICA
1.1.1. Tejido urbano continuo	111	MUY BAJA	1	MUY BAJA	1
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	112	MUY BAJA	1	BAJA	2
1.2.1. Zonas industriales o comerciales	121	MUY ALTA	5	MUY BAJA	1
1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	122	ALTA	4	MUY BAJA	1
1.2.3. Zonas portuarias	123	MUY ALTA	5	MUY BAJA	1
1.2.4. Aeropuertos	124	MUY ALTA	5	MUY BAJA	1
1.2.5. Obras hidráulicas	125	ALTA	4	MUY BAJA	1
1.3.1. Zonas de extracción minera	131	MUY ALTA	5	MUY BAJA	1
1.3.2. Zonas de disposición de residuos	132	ALTA	4	MUY BAJA	1
1.4.1. Zonas verdes urbanas	141	ALTA	4	MODERADA	2
1.4.2. Instalaciones recreativas	142	ALTA	4	MODERADA	2
2.1.1. Otros cultivos transitorios	211	MUY ALTA	5	MUY BAJA	3
2.1.2. Cereales	212	MUY ALTA	5	MUY BAJA	2
2.1.3. Oleaginosas y leguminosas	213	MUY ALTA	5	MUY BAJA	2
2.1.4. Hortalizas	214	MUY ALTA	5	MUY BAJA	3
2.1.5. Tubérculos	215	MUY ALTA	5	MUY BAJA	3
2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	221	MUY ALTA	5	MUY BAJA	3
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	222	MUY ALTA	5	MUY BAJA	3
2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos	223	MUY ALTA	5	MUY BAJA	3
2.2.4. Cultivos agroforestales	224	MUY ALTA	5	MUY BAJA	3

Carrera 10 No. 25 - 30 Bogotá D.C. PBX (571) 3027460
 Fax Sever: 3027119-3027190 Ext. 2110 - 1011 - 1012 - 1013
 Línea Nacional 018000110012 - Píndalo y Aéreo (571) 3421298
 Sede Punto Avanza: Calle 12 No 42B - Al Sur de Bogotá D.C. PBX: 2881070
www.ideam.gov.co




COBERTURA (CLASIFICACIÓN CORINE LAND COVER -NIVEL 3-)	CÓDIGO CORINE LAND COVER	VULNERABILIDAD ECONÓMICA	CALIFICACIÓN VULNERABILIDAD ECONÓMICA	VULNERABILIDAD ECOSISTÉMICA	CALIFICACIÓN VULNERABILIDAD ECOSISTÉMICA
2.2.5. Cultivos confinados	225	MUY ALTA	5	MUY BAJA	2
2.3.1. Pastos limpios	231	ALTA	4	BAJA	3
2.3.2. Pastos arbolados	232	ALTA	4	BAJA	5
2.3.3. Pastos enmalezados	233	ALTA	4	BAJA	5
2.4.1. Mosaico de cultivos	241	MUY ALTA	5	BAJA	3
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	242	MODERADA	3	BAJA	3
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	243	ALTA	4	MODERADA	4
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	244	ALTA	4	MODERADA	4
2.4.5. Mosaico de cultivos y espacios naturales	245	ALTA	4	MODERADA	4
3.1.1. Bosque denso	311	BAJA	2	MUY ALTA	5
3.1.2. Bosque abierto	312	BAJA	2	MUY ALTA	5
3.1.3. Bosque fragmentado	313	MODERADA	3	MUY ALTA	5
3.1.4. Bosque de galería y ripari	314	BAJA	2	MUY ALTA	5
3.1.5. Plantación forestal	315	MUY ALTA	5	MODERADA	3
3.2.1. Herbazal	321	BAJA	2	MUY ALTA	5
3.2.2. Arbustal	322	BAJA	2	MUY ALTA	5
3.2.3. Vegetación secundaria o en transición	323	MODERADA	3	MUY ALTA	4
3.3.1. Zonas arenosas naturales	331	MUY BAJA	1	MUY BAJA	1
3.3.2. Afloramientos rocosos	332	MUY BAJA	1	MUY BAJA	1
3.3.3. Tierras destruidas y degradadas	333	MUY BAJA	1	MUY BAJA	2
3.3.4. Zonas quemadas	334	MUY BAJA	1	MUY BAJA	2

Carrera 10 No. 25 - 30 Bogotá D.C. PBX (571) 3027460
 Fax Sever: 3027119-3027190 Ext. 2110 - 1011 - 1012 - 1013
 Línea Nacional 018000110012 - Píndalo y Aéreo (571) 3421298
 Sede Punto Avanza: Calle 12 No 42B - Al Sur de Bogotá D.C. PBX: 2881070
www.ideam.gov.co




ANEXO B. Algoritmo de procesamiento de imágenes multiespectrales desarrollados en Matlab.

• Función “principal.m”

```
close all;
clear;
clc
% funciones para carga las
imágenes
filter={'*.tif'};
file_image=uigetfile(filter);
r=imread(file_image);
g=imread(file_image);
b=imread(file_image);
nir=imread(file_image);

% funciones para alinear y
recortar imágenes
[str_salida] =
alineacion_de_imagenes(r,nir);
R=str_salida.RegisteredImage;
R=imcrop(R,[1 27 1225 911]);

[str_salida] =
alineacion_de_imagenes(g,nir);
G=str_salida.RegisteredImage;
G=imcrop(G,[1 27 1225 911]);

[str_salida] =
alineacion_de_imagenes(b,nir);
B=str_salida.RegisteredImage;
B=imcrop(B,[1 27 1225 911]);

NIR=imcrop(nir,[1 27 1225 911]);

%funcion para obtener una imagen
visible(RGB)
imagen_a_color=cat(3,R,G,B);
figure(1)
imshow(imagen_a_color);

%funcion para calcular el indice
de vegetacion normalizado (NDVI)
NDVI = ((double(NIR) -
double(R)) ./ (double(NIR) +
double(R)));
Figure(2)
imshow(NDVI, []);% muestra NDVI
en escala de grises
colormap(jet);
colorbar;
txt='Valores de NDVI';
title(txt);

%umbralizacion de la imagen para
diagrama de reflectancias
[m_binaria,m_vegetacion] =
segmentImage(ndvi_esc_gris,umbra
l);
figure(3)

plot(R,NIR,'.k');%grafica todo
el escenario
hold on
plot(R(m_binaria(:)),NIR(m_binar
ia(:)),'.b');
xlabel('ROJO (R)')
ylabel('INFRARROJO CERCANO
(NIR)')
title('Diagrama de
Reflectancias')
x=(0:max(max(R)));
y=x;
hold on
plot(x,y,'.r');

%segmentacion de la imagen NDVI
por clustering k-means
ndvi_esc_gris=mat2gray(NDVI,[-1
1]);
[m,n]=size(ndvi_esc_gris);
valores=reshape(ndvi_esc_gris,m*
n,1);%convierte matriz a vector
columna
valores=double(valores);
[clasificacion,centroides,sumd,D
]=kmeans(valores,2,'Distance','c
ityblock');% clasificacion no
supervisada
valores=reshape(clasificacion,m,
n);%reconvierte a una matriz mxn
numcolor=2;
figure(4)
imshow(valores, []);
colorRGB=copper(numcolor);%hot()
jet() parula()...
colormap(colorRGB)
caxis([1 numcolor]);
cbarHandle =
colorbar('YTick', (1+0.5*(numcolo
r-1)/numcolor:(numcolor-
1)/numcolor:numcolor),'YTickLabe
l',int2str((1:numcolor)'),
'YLim', [1 numcolor]);
title('Imagen Segmentada');

% obtencion de máscaras binarias
mascara1=(valores==1);
mascara2=(valores==2);
% %obtencion de rangos de
valores de NDVI para cada
cluster
cluster1=mascara1.*ndvi_esc_gris
;
cluster2=mascara2.*ndvi_esc_gris
;

% valores de NDVI maximos y
minimos de cada cluster
```

```

[row1,col1,v1] = find(cluster1);
max1=max(v1);
min1=min(v1);
ndvi1=[min1 max1];
[row2,col2,v2] = find(cluster2);
max2=max(v2);
min2=min(v2);
ndvi2=[min2 max2];

%hallar el umbral de
segmentacion
umbral=0;
matriz=[ndvi1 ndvi2];
vct_extr=
round(matriz,3,'significant');
if(vct_extr(1)==vct_extr(2))
    umbral=matriz(1);
end
if(vct_extr(1)==vct_extr(3))
    umbral=matriz(1);
end
if(vct_extr(1)==vct_extr(4))
    umbral=matriz(1);
end
if(vct_extr(2)==vct_extr(3))
    umbral=matriz(2);
end
if(vct_extr(2)==vct_extr(4))
    umbral=matriz(2);
end
if(vct_extr(3)==vct_extr(4))
    umbral=matriz(3);
end

% porcentajes de vegetacion
contador_roi=0;
contador1=0;
contador2=0;
contador3=0;
contador4=0;
num_pixels=size(ndvi_esc_gris);
total=num_pixels(1)*num_pixels(2);
for c = 1:total
    if(ndvi_esc_gris(c)~=0)

contador_roi=contador_roi+1;

if(ndvi_esc_gris(c)<=umbral)%sue
los desnudos u objetos

contador1=contador1+1;
    end
    if(ndvi_esc_gris(c)<0.65
&& ndvi_esc_gris(c)>umbral )%v.
reseca

contador2=contador2+1;
    end

```

```

    if(ndvi_esc_gris(c)<=0.8
&& ndvi_esc_gris(c)>=0.65 )% v.
saludable
        contador3=contador3+1;
    end
    if(ndvi_esc_gris(c)>0.8
)%v. muy saludable

contador4=contador4+1;
    end
end
porcentaje1=(contador1/contador_
roi)*100;
porcentaje1=num2str(porcentaje1)
;
porcentaje2=(contador2/contador_
roi)*100;
porcentaje2=num2str(porcentaje2)
;
porcentaje3=(contador3/contador_
roi)*100;
porcentaje3=num2str(porcentaje3)
;
porcentaje4=(contador4/contador_
roi)*100;
porcentaje4=num2str(porcentaje4)
;

% analisis mediante zonas de
interes ROI's

plot(R,NIR,'.y');
[byn,corte] =
ROIs(ndvi_esc_gris,imagen_a_colo
r);
plot(R(byn(:)),NIR(byn(:)),'.b')
;
x=(0:max(max(R)));
y=x;
hold on
plot(x,y,'.k');
xlabel('ROJO (R)')
ylabel('INFRARROJO CERCANO
(NIR)')

%mostrar el recorte a color
IAC1=imagen_a_color;
IAC1=double(IAC1);
MASK1= double(byn);
IAC1(:,:,1)=IAC1(:,:,1).* MASK1;
IAC1(:,:,2)=IAC1(:,:,2).* MASK1;
IAC1(:,:,3)=IAC1(:,:,3).* MASK1;
IAC1=uint16(IAC1);
imshow(IAC1);

%cálculo de porcentajes de
vegetacion del recorte
contador_roi=0;
contador1=0;

```

```

contador2=0;
contador3=0;
contador4=0;
num_pixels=size(ndvi_esc_gris);
total=num_pixels(1)*num_pixels(2);
for c = 1:total
    if(corte(c)~=0)

contador_roi=contador_roi+1;

if(corte(c)<=umbral)%suelos
desnudos u objetos

contador1=contador1+1;
    end
    if(corte(c)<=0.65 &&
corte(c)>umbral )%v. reseca

contador2=contador2+1;
    end
    if(corte(c)<=0.8 &&
corte(c)>0.65 )% v. saludable
    contador3=contador3+1;
    end
    if(corte(c)>0.8 )%v. muy
saludable

contador4=contador4+1;
    end
    end
end
porcentaje1=(contador1/contador_
roi)*100;
porcentaje1=num2str(porcentaje1)
;
porcentaje2=(contador2/contador_
roi)*100;
porcentaje2=num2str(porcentaje2)
;
porcentaje3=(contador3/contador_
roi)*100;
porcentaje3=num2str(porcentaje3)
;
porcentaje4=(contador4/contador_
roi)*100;
porcentaje4=num2str(porcentaje4)
;
set(handles.text3,'string',[porc
entaje1,' %']);
set(handles.text5,'string',[porc
entaje2,' %']);
set(handles.text7,'string',[porc
entaje3,' %']);
set(handles.text9,'string',[porc
entaje4,' %']);

%seccion para hallar el maximo y
mimo de un roi
[fil,col,v1] = find(corte);
max1=max(v1);

```

```

min1=min(v1);

%seccion para graficar el
diagrama de reflectancias R-NIR
[m_binaria,m_vegetacion] =
segmentImage(ndvi_esc_gris,umbra
l);
plot(R,NIR,'.k');%grafica todo
el escenario
hold on
plot(R(m_binaria(:)),NIR(m_binar
ia(:)),'.b');
xlabel('ROJO (R)')
ylabel('INFRARROJO CERCANO
(NIR)')
title('Diagrama de
Reflectancias')
x=(0:max(max(R)));
y=x;
hold on
plot(x,y,'.r');

```

- Función “alineacion_de_imagenes.m”

```

function [MOVINGREG] =
alineacion_de_imagenes(MOVING,FI
XED)
% Feature-based techniques
require license to Computer
Vision Toolbox
checkLicense()

% Default spatial referencing
objects
fixedRefObj =
imref2d(size(FIXED));
movingRefObj =
imref2d(size(MOVING));

% Detect MSER features
fixedPoints =
detectMSERFeatures(FIXED,'Thresh
oldDelta',2.400000,'RegionAreaR
ange',[20
21000],'MaxAreaVariation',0.5500
00);
movingPoints =
detectMSERFeatures(MOVING,'Thres
holdDelta',2.400000,'RegionAreaR
ange',[20
21000],'MaxAreaVariation',0.5500
00);

% Extract features
[fixedFeatures,fixedValidPoints]
=
extractFeatures(FIXED,fixedPoint
s,'Upright',false);
[movingFeatures,movingValidPoint
s] =
extractFeatures(MOVING,movingPoi
nts,'Upright',false);

```

```

% Match features
indexPairs =
matchFeatures(fixedFeatures, movingFeatures, 'MatchThreshold', 50.00000, 'MaxRatio', 0.500000);
fixedMatchedPoints =
fixedValidPoints(indexPairs(:,1));
movingMatchedPoints =
movingValidPoints(indexPairs(:,2));
MOVINGREG.FixedMatchedFeatures =
fixedMatchedPoints;
MOVINGREG.MovingMatchedFeatures =
movingMatchedPoints;

```

```

% Apply transformation - Results may not be identical between runs because of the randomized nature of the algorithm
tform =
estimateGeometricTransform(movingMatchedPoints, fixedMatchedPoints, 'projective');
MOVINGREG.Transformation =
tform;
MOVINGREG.RegisteredImage =
imwarp(MOVING, movingRefObj, tform, 'OutputView', fixedRefObj, 'SmoothEdges', true);

```

```

% Store spatial referencing object
MOVINGREG.SpatialRefObj =
fixedRefObj;

```

End

```

function checkLicense()

% Check for license to Computer Vision Toolbox
CVSTStatus =
license('test', 'Video_and_Image_Blockset');
if ~CVSTStatus

```

```

error(message('images:imageRegistration:CVSTRequired'));
end

```

end

Función “ROIs.m”

```

function [BW1,maskedImage1] =
ROIs(ndvi_esc_gris,imagen_a_color)
figure(2)
imshow(imagen_a_color);
h = drawpolygon('FaceAlpha',0);
coordenadas=h.Position;
Posx=coordenadas(:,1);
Posy=coordenadas(:,2);
Posx=transpose(Posx);
Posy=transpose(Posy);
[BW1,maskedImage1] =
recorte_ROIs(ndvi_esc_gris,Posx,Posy);

```

- Función “recorte_ROIs.m”

```

function [BW,maskedImage] =
recorte_ROIs(X,xPos,yPos)
% Create empty mask.
BW = false(size(X,1),size(X,2));
% Draw ROIs
m = size(BW, 1);
n = size(BW, 2);
addedRegion = poly2mask(xPos,yPos, m, n);
BW = BW | addedRegion;
% Create masked image.
maskedImage = X;
maskedImage(~BW) = 0;
end

```

- Función “segmentImage.m”

```

function [BW,maskedImage] =
segmentImage(X,umbral)
BW = X > umbral;
% Create masked image.
maskedImage = X;
maskedImage(~BW) = 0;
end

```

*los archivos .m y .fig se pueden encontrar en el enlace:
<https://drive.google.com/drive/folders/1S40GTfYIsh9ECGjLEqSKxIraV5oshQvo?usp=sharing>

ANEXO C. Fórmulas para calcular la superficie capturada en cada imagen

$$A = 4h^2 \tan \theta \tan \varphi$$

$$\theta = \frac{\text{HFOV}}{2}$$

$$\varphi = \frac{\text{VFOV}}{2}$$

$$h = h_{\text{vuelo}} - h_{\text{suelo}}$$

Donde:

HFOV: Campo de visión horizontal en grados sexagesimales, dato provisto por el fabricante del sensor

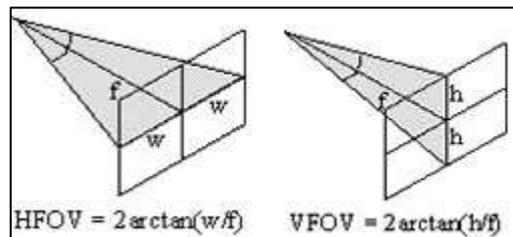
VFOV: Campo vertical de visión en grados sexagesimales, dato provisto por le fabricante del sensor

h_{vuelo} : altitud del vuelo en m.s.n.m, disponible en las propiedades de cada imagen.

h_{suelo} : altitud del suelo en m.s.n.m, disponible en las propiedades de las imagenes de los paneles de calibracion

h : altura a la que se realizo la captura en metros (m)

A : superficie de cada captura en m²



ESTRATO ARBOREO						
Muestra	h_{vuelo} (m.s.n.m)	h_{suelo} (m.s.n.m)	h (m)	θ	φ	A (m ²)
1	2933.197	2871.653	61.544	23.6°	18.5°	2214.740
2	2914.192	2871.653	42.539	23.6°	18.5°	1058.098

ESTRATO ARBUSTIVO						
Muestra	h_{vuelo} (m.s.n.m)	h_{suelo} (m.s.n.m)	h (m)	θ	φ	A (m ²)
1	2901.463	2871.653	29.810	23.6°	18.5°	519.607
2	2904.437	2871.653	32.784	23.6°	18.5°	628.456
3	2891.534	2851.687	39.847	23.6°	18.5°	928.416
4	2892.785	2851.687	41.098	23.6°	18.5°	987.626

ESTRATO HERBACEO						
Muestra	h_{vuelo} (m.s.n.m)	h_{suelo} (m.s.n.m)	h (m)	θ	φ	A (m ²)
1	2894.02	2871.653	22.367	23.6°	18.5°	292.527
2	2894.192	2871.653	22.539	23.6°	18.5°	297.044



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL
APRENDIZAJE



UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 27/05/2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR
Nombres – Apellidos: HÉCTOR ALFREDO REINOSO CHILQUINGA
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
Carrera: INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN TELECOMUNICACIONES Y REDES
Título a optar: INGENIERO EN ELECTRÓNICA, TELECOMUNICACIONES Y REDES
f. Analista de Biblioteca responsable:

