



**“Determinación de la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales mediante tecnologías geoespaciales en el Refugio de Vida Silvestre Pasochoa, Cantón Mejía”**

Pozo Criollo, Luis Felipe

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

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

Ing. Padilla Almeida, Oswaldo Vinicio, PhD

17 de agosto del 2022

## Similitud del Contenido



[POZO\\_LUIS\\_TESIS.docx](#)

Scanned on: 20:40 August 16, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	545
Words with Minor Changes	119
Paraphrased Words	717
Omitted Words	0



OSWALDO VINICIO  
PADILLA ALMEIDA



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

**Certificación**

Certifico que el trabajo de titulación: **“Determinación de la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales mediante tecnologías geoespaciales en el Refugio de Vida Silvestre Pasochoa, Cantón Mejía”** fue realizado por el señor **Pozo Criollo, Luis Felipe**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

**Sangolquí, 17 de agosto del 2022**

Firma:



Firmado electrónicamente por:  
**OSWALDO VINICIO  
PADILLA ALMEIDA**

**Ing. Padilla Almeida, Oswaldo Vinicio, PhD**

**C. I. 1709776650**



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

### Responsabilidad de Autoría

Yo, **Pozo Criollo, Luis Felipe**, con cédula de ciudadanía n° 1726918541, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Determinación de la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales mediante tecnologías geoespaciales en el Refugio de Vida Silvestre Pasochoa, Cantón Mejía”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 17 de agosto del 2022

Firma

**Pozo Criollo, Luis Felipe**

C.C 1726918541



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

**Autorización de Publicación**

Yo Pozo Criollo, Luis Felipe, con cédula de ciudadanía n° 1726918541, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Determinación de la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales mediante tecnologías geoespaciales en el Refugio de Vida Silvestre Pasochoa, Cantón Mejía”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

**Sangolquí, 17 de agosto del 2022**

Firma

.....*Luis J. Pozo*.....

**Pozo Criollo, Luis Felipe**

**C.C 1726918541**

## Dedicatoria

A mis padres y hermanos.

*Luis Felipe Pozo Criollo*

## Agradecimiento

Agradezco a la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE", a la carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente y a sus docentes, quienes día a día forman profesionales de calidad.

A mi tutor de tesis Ing. Padilla Almeida, Oswaldo Vinicio, PhD, quien con su paciencia, dedicación y conocimientos me direccionó correctamente en la elaboración del presente proyecto de titulación.

A mis padres, hermanos y mi tía Claudia, quienes me acompañaron, apoyaron y sobre todo me motivaron a seguir adelante para no rendirme ante las adversidades.

A la Ing. Abigail García, con quien he forjado recuerdos inolvidables en cada aventura y cada momento a su lado, quien sin dudarlo me apoyó en aquellas decisiones difíciles, creyendo en mí y motivándome cada día, haciendo posible el desarrollo del presente proyecto.

A los Ingenieros Cristian Borja y Sebastián Arcos, quienes me acompañaron durante esta formación, brindándome sus consejos y amistad, pero sobre todo me enseñaron que rendirse no es una opción.

Finalmente agradezco a mis amigos y compañeros quienes me acompañaron a lo largo de la formación profesional.

*Luis Felipe Pozo Criollo*

## Índice de Contenido

Similitud del Contenido .....	2
Certificación .....	3
Responsabilidad de Autoría .....	4
Autorización de Publicación .....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Índice de Contenido .....	8
Índice de Tablas.....	14
Índice de Figura .....	16
Resumen .....	18
Abstract.....	19
Capítulo I .....	20
Aspectos Generales.....	20
Antecedentes .....	20
Planteamiento del Problema.....	22
Justificación e importancia.....	24
Área de influencia.....	25
Objetivos .....	27
Objetivo General.....	27
Objetivos Específicos.....	27
Metas .....	27
Hipótesis .....	28
Capítulo 2 .....	29
Marco Teórico.....	29
Gestión de Riesgos .....	29

Conceptos Básicos en la Gestión de Riesgos .....	29
Riesgo.....	29
Amenaza.....	30
Vulnerabilidad.....	31
Peligro.....	31
Estrategias Básicas en la Gestión de Riesgos .....	31
Prevención.....	31
Mitigación.....	31
Preparación.....	31
Incendios Forestales .....	32
Causas del Origen de Incendios Forestales .....	33
Comportamiento del Fuego .....	34
Factores de Comportamiento del Fuego.....	34
Combustible.....	35
Clasificación de Combustibles Forestales .....	36
Modelos de Combustible .....	37
Modelo de Combustible Prometheus .....	37
Condiciones Meteorológicas .....	39
Temperatura.....	39
Precipitación.....	40
Humedad Relativa.....	40
Topografía .....	40
Tipos de Incendios Forestales.....	40
Incendio de Copa.....	41
Incendio Superficial.....	41
Incendio Subterráneo.....	42

	10
Sistemas de Información Geográfica .....	42
Modelamiento Espacial .....	43
Análisis Espacial .....	44
Distancia Inversa Ponderada (IDW).....	44
Distancia Euclídiana .....	46
Lógica Difusa .....	46
Casos de Lógica Difusa.....	47
Generación de Modelos de Lógica Difusa.....	48
Prueba de Ajuste del Modelo.....	50
Evaluación Multicriterio .....	50
Proceso Analítico Jerárquico (AHP). .....	51
Cálculo de consistencia. ....	52
Relación de consistencia. ....	53
Sensores Remotos.....	53
Radiación Electromagnética.....	54
Espectro Electromagnético.....	55
Firmas Espectrales.....	56
Tipos de Resolución en Sensores Remotos .....	57
Resolución Espacial.....	57
Resolución Espectral .....	58
Resolución Radiométrica .....	59
Resolución Temporal .....	59
Programa Copernicus.....	59
Sentinel-2 .....	60
Correcciones de Imágenes Satelitales.....	62
Corrección Atmosférica.....	62

	11
Corrección Topográfica.....	64
Corrección Radiométrica.....	65
Corrección Geométrica .....	66
Clasificación de Imágenes Satelitales.....	67
Clasificación Supervisada .....	68
Algoritmos de Clasificación Supervisada .....	68
Algoritmo de Máxima Verosimilitud.....	68
Algoritmo de Distancia Mínima.....	69
Distancia Euclidiana.....	69
Distancia Euclidiana Normalizada.....	69
Distancia de Mahalanobis.....	69
Algoritmo Paralelepípedo .....	69
Algoritmo de Máquina de Vectores de Soporte (SVM).....	70
Matriz de Confusión .....	70
Índice de Concordancia Kappa .....	71
Clasificación no Supervisada .....	72
Algoritmos de Clasificación no Supervisada.....	72
Algoritmo ISODATA.....	72
Algoritmo K-means.....	72
Índices Espectrales .....	72
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) .....	73
Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI).....	74
Índice de Supervisión Ambiental Global (GEMI) .....	75
Índice Normalizado de Área Quemada (NBR).....	75
Índice de Área Quemada (IAQ).....	76
Base Legal .....	77

	12
Capítulo 3 .....	79
Metodología .....	79
Fase 1: Recopilación de Información Geoespacial .....	79
Recopilación de Imágenes Satelitales.....	79
Obtención del Modelo Digital del Terreno .....	81
Recopilación de Datos Meteorológicos .....	82
Fase 2: Procesamiento de Imágenes Satelitales .....	87
Corrección Atmosférica.....	87
Corrección Topográfica.....	88
Fase 3: Generación de Índices Espectrales .....	90
Fase 4: Trabajo de Campo .....	92
Recolección de Datos .....	92
Fase 5: Generación de Modelos de Combustible Prometheus .....	93
Matriz de Confusión.....	95
Asignación de Pesos mediante el Proceso Analítico Jerárquico .....	96
Fase 6: Modelamiento de Variables .....	98
Interpolación de Datos Meteorológicos .....	98
Elaboración de Ráster de Pendientes .....	99
Elaboración de Ráster de Distancias .....	100
Fase 7: Análisis de Variables Según el Caso de Lógica Difusa .....	101
Fase 8: Modelamiento de Probabilidad mediante el Método de Lógica Difusa .....	102
Fase 9: Cálculo de Ajuste del Modelo .....	106
Capítulo 4 .....	107
Resultados.....	107
Geodatabase de Información Preexistente.....	107
Índices de Vegetación .....	109

Catálogo de Índices de Vegetación.....	109
Modelo de Combustible Prometheus.....	110
Cobertura Vegetal que Componen los Modelos de Combustible .....	111
Modelamiento de Variables Independientes .....	113
Cálculo de Probabilidad Mediante el Método de Lógica Difusa .....	114
Informe de Validación .....	114
Capítulo 5 .....	117
Conclusiones y Recomendaciones .....	117
Conclusiones.....	117
Recomendaciones.....	118
Bibliografía.....	120
Apéndices .....	142

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Tipos de Amenazas .....	30
<b>Tabla 2.</b> Clasificación de las Causas de Incendios Forestales .....	33
<b>Tabla 3</b> Clasificación de los Combustibles Forestales .....	36
<b>Tabla 4.</b> Características de los Modelos de Combustible Según Prometheus .....	38
<b>Tabla 5.</b> Clasificación de los Modelos Espaciales según su Grado de Formalización y Tratamiento de Indeterminismo.....	43
<b>Tabla 6.</b> Rango de Probabilidad .....	49
<b>Tabla 7.</b> Escala Fundamental de Números Absolutos.....	51
<b>Tabla 8.</b> Índice Fundamental .....	53
<b>Tabla 9.</b> Misiones del Programa Copérnico .....	60
<b>Tabla 10.</b> Características de las bandas de Sentinel-2 .....	61
<b>Tabla 11.</b> Escala de Comparación del Índice Kappa.....	71
<b>Tabla 12.</b> Red de Monitoreo del FONAG .....	83
<b>Tabla 13.</b> Datos de Precipitación de los Meses de Junio, Julio y Agosto .....	84
<b>Tabla 14.</b> Datos de Temperatura de los Meses de Junio, Julio y Agosto .....	85
<b>Tabla 15.</b> Datos de Humedad Relativa de los Meses de Junio, Julio y Agosto .....	86
<b>Tabla 16.</b> Índices de Vegetación.....	90
<b>Tabla 17.</b> Valor de Importancia Asignado a los Modelos de Combustible .....	96
<b>Tabla 18.</b> Valor de Importancia Asignado a los Modelos de Combustible .....	96
<b>Tabla 19.</b> Matriz de Comparación por Pares de los Modelos de Combustible .....	97
<b>Tabla 20.</b> Pesos de las Variables del Modelamiento de Combustible .....	97
<b>Tabla 21.</b> Análisis de Variables.....	101
<b>Tabla 22.</b> Desviaciones Estándar de los Modelos de Probabilidad .....	106
<b>Tabla 23.</b> Coberturas de la Geodatabase .....	108
<b>Tabla 24.</b> Resumen de Valores de Índices de Vegetación .....	109

<b>Tabla 25.</b> Valores de Concordancia.....	110
<b>Tabla 26.</b> Cobertura Vegetal.....	111
<b>Tabla 27.</b> Descripción de la Vegetación de los Modelos de Combustible según Prometheus .	112
<b>Tabla 28.</b> Modelos de Probabilidad de Incendios Forestales .....	115

## Índice de Figura

<b>Figura 1.</b> Área de estudio del Refugio de Vida Silvestre Pasochoa .....	26
<b>Figura 2.</b> Triángulo de Fuego .....	34
<b>Figura 3.</b> Triángulo de Comportamiento del fuego.....	35
<b>Figura 4.</b> Clasificación de los Modelos de Combustible Según Prometheus.....	38
<b>Figura 5.</b> Tipos de Incendios forestales.....	41
<b>Figura 6.</b> Primer Caso de Lógica Difusa .....	47
<b>Figura 7.</b> Segundo Caso de Lógica Difusa .....	48
<b>Figura 8.</b> Tercer Caso de Lógica Difusa .....	48
<b>Figura 9.</b> Ondas Electromagnéticas .....	55
<b>Figura 10.</b> Espectro Electromagnético.....	56
<b>Figura 11.</b> Firmas Espectrales.....	56
<b>Figura 12.</b> Comparación de Resoluciones Espaciales.....	57
<b>Figura 13.</b> Medición de Datos Espectrales .....	58
<b>Figura 14.</b> Búsqueda de Imágenes Satelitales .....	80
<b>Figura 15.</b> Selección de Imagen Satelital Sentinel.....	80
<b>Figura 16.</b> Obtención del Modelo Digital del Terreno.....	81
<b>Figura 17.</b> Obtención del Modelo Digital del Terreno.....	82
<b>Figura 18.</b> Corrección Atmosférica .....	88
<b>Figura 19.</b> Corrección Topográfica .....	88
<b>Figura 20.</b> Modelo Cartográfico de las Correcciones Sentinel 2 .....	89
<b>Figura 21.</b> Índices de Vegetación .....	91
<b>Figura 22.</b> Modelo Cartográfico de Índices Espectrales.....	92
<b>Figura 23.</b> Puntos GPS de Modelos Combustibles.....	93
<b>Figura 24.</b> Modelos Cartográfico de Clasificación Supervisada .....	94
<b>Figura 25.</b> Modelos de Combustibles Según Prometheus .....	94

<b>Figura 26.</b> Modelos Cartográfico para Cálculo de Matriz de Confusión .....	95
<b>Figura 27.</b> Modelamiento IDW de Precipitación.....	98
<b>Figura 28.</b> Modelamiento IDW de Temperatura.....	99
<b>Figura 29.</b> Modelamiento IDW de Humedad Relativa .....	99
<b>Figura 30.</b> Ráster de Pendientes.....	100
<b>Figura 31.</b> Ráster de Distancias .....	100
<b>Figura 32.</b> Modelo Cartográfico de Normalización de Variables .....	103
<b>Figura 33.</b> Modelo Cartográfico del Cálculo de Probabilidad de las Variables .....	104
<b>Figura 34.</b> Modelo Cartográfico del Cálculo de Probabilidad de Ocurrencia Incendios Forestales .....	105
<b>Figura 35.</b> Geodatabase de Información Preexistente.....	107
<b>Figura 36.</b> Catálogo de Índices de Vegetación .....	110
<b>Figura 37.</b> Geodatabase de las Variables Independientes .....	114

## Resumen

El Refugio de Vida Silvestre Pasochoa ubicado en el Cantón Mejía se caracteriza por poseer uno de los últimos remanentes de bosque andino del Ecuador. Esta categoría de refugio, la define como un área indispensable para el cuidado de la vida silvestre con fines investigativos o recreativos. Por tal motivo, se propuso generar modelos de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales mediante el uso de tecnologías geoespaciales, mismas que permitieron relacionar variables meteorológicas, pendientes, distancias e índices de vegetación.

Adicionalmente, mediante la clasificación supervisada de imágenes satelitales, se determinaron los modelos de combustible según la clasificación de Prometheus, mismos que a partir del proceso analítico jerárquico, formaron parte de las variables que intervienen en el proceso del cálculo de probabilidad a partir del método de Lógica Difusa. Como resultado, se generaron 3 modelos de probabilidad de ocurrencia en donde los valores de probabilidad para el modelo 1 se encuentran en un rango de 0.354 a 0.757, para el modelo 2 el rango de probabilidad es de 0.395 a 0.761, y para el rango 3 la probabilidad va de 0.435 a 0.764. En donde, se ajustaron los valores en función a la desviación estándar y cuyo resultado permitió seleccionar al modelo 1 como el modelo que mejor se adapta a la realidad.

*Palabras Clave:* tecnologías geoespaciales, modelos de combustible, proceso analítico jerárquico, lógica difusa.

### **Abstract**

The Pasochoa Wildlife Refuge located in the Mejía Canton is characterized by having one of the last remnants of Andean forest in Ecuador. This refuge category defines it as an essential area for the care of wildlife for research or recreational purposes. For this reason, it was proposed to generate probability models for the occurrence of forest fires through the use of geospatial technologies, which allowed relating meteorological variables, slopes, distances and vegetation indices. Additionally, through the supervised classification of satellite images, the fuel models were determined according to the Prometheus classification, which, based on the analytical hierarchical process, were part of the variables that intervene in the probability calculation process based on the method of Fuzzy Logic. As a result, 3 probability of occurrence models were generated where the probability values for model 1 are in a range from 0.354 to 0.757, for model 2 the probability range is from 0.395 to 0.761, and for range 3 the probability goes from 0.435 to 0.764. Where, the values were adjusted based on the standard deviation and whose result allowed model 1 to be selected as the model that best adapts to reality.

*Key Words:* geospatial technologies, fuel models, analytic hierarchy process, fuzzy logic.

## Capítulo I

El presente capítulo tiene como finalidad delinear los antecedentes históricos, periodos de frecuencia y estudios en relación a incendios forestales. De igual manera se abordan las bases del problema, en donde se describen las condiciones y factores que afectan el área de estudio, posteriormente se justifica la importancia del desarrollo de la investigación aplicada a un área de estudio específica. En este sentido, se ha planteado el objetivo general, objetivos específicos, metas e hipótesis, mismos que permitieron orientar y definir la investigación.

### Aspectos Generales

#### Antecedentes

Desde hace miles de años el fuego ha sido utilizado por la humanidad como una herramienta para despejar campos y acelerar procesos de vegetación proveniente de la agricultura, en donde la quema agrícola ha permitido controlar plagas y eliminar residuos de los campos (Mataix y Cerdà, 2009). Esta actividad es aplicada por países en vías de desarrollo en zonas dedicadas a la agricultura, permitiendo así eliminar restos de cultivos recolectados mediante fuego controlado (Food and Agriculture Organization [FAO], 2016). La quema agrícola conlleva un alto riesgo debido al control limitado sobre el fuego, ya que factores como: sequías, lluvias irregulares y aumento de temperatura originados por el cambio climático, han convertido a esta actividad en una amenaza para los ecosistemas que se encuentran a su alrededor (Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre c, 2020).

La probabilidad de incendios de gran magnitud ha aumentado drásticamente en los últimos años (Borunda, 2020). Para el año 2017 se registraron un total de 36 incendios en áreas protegidas en 19 países que quemaron más de 196 000 hectáreas a nivel mundial (Allee, 2017). Cabe mencionar que, en el año 2020, los incendios en todo el mundo aumentaron en un 13% en relación al 2019, siendo Sudamérica su principal causante (World Wild Life [WWF], 2020). Durante el periodo 2012-2019 en Ecuador se registraron alrededor de 70 mil hectáreas

de bosque y páramos que fueron destruidas por incendios forestales, especialmente en zonas de amortiguamiento de áreas protegidas (Prefectura de Imbabura, 2021).

Entre las áreas que conforman el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP) se encuentra el Refugio de Vida Silvestre Pasochoa que, debido a su proximidad a zonas agrícolas y pajonal de páramo, se encuentra susceptible a incendios forestales (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2020). Según los registros históricos del diario El Comercio, en las fechas: 13 de septiembre del 2012, 2 de junio del 2015, 12 de septiembre del 2015, 23 de agosto del 2016, existen artículos que mencionan incendios forestales cerca al refugio y su respectiva zona de amortiguamiento.

Mediante el Plan Técnico Interinstitucional para la Gestión de Incendios Forestales en el Refugio de Vida Silvestre Pasochoa (PIIF) se evidencia dos eventos significativos que afectaron directamente al área: el primero se originó en el año 2004 donde se destruyeron 12 hectáreas de bosque primario y plantas andinas dentro del refugio, mismo que fue controlado después de 2 días gracias al grupo de bomberos de Machachi, guardaparques, guías y pobladores cercanos al refugio; según los indicios, guardabosques determinaron que el incendio fue originado por quema agrícola descontrolada (El Universo, 2004). El segundo registro importante corresponde al año 2017 donde se destruyeron 400 hectáreas de páramo dentro de la zona de amortiguamiento Santa Rita, este incendio fue controlado después de 8 días y fue originado por la quema de agrícola (Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica, 2020).

Ante la necesidad de proteger la naturaleza se han desarrollado diferentes investigaciones en torno a incendios forestales, como el realizado por Salgado (2021) en su tema titulado: "Cartografía para modelos combustibles utilizando tecnologías geoespaciales para la predicción de incendios forestales en la Reserva Geobotánica Pululahua", en la cual, se determinó que los modelos de combustibles generados a partir de clasificación supervisada, poseen un alto grado de eficiencia. Y la investigación desarrollada por Columba y Quisilema

(2013) en su tema titulado: “Determinación de áreas vulnerables a incendios forestales y cálculo de probabilidad de ocurrencia mediante Lógica Fuzzy aplicando herramientas geoinformáticas, en el Distrito Metropolitano de Quito”, en donde demostraron que la metodología de lógica difusa es una alternativa eficiente en el modelamiento de incendios forestales, mostrando resultados confiables. Cabe mencionar que se utilizaron modelos de combustible forestal generados por la Secretaría de Ambiente en el año 2011 cuya información para el año 2022 no se encuentra actualizada ni disponible.

En este contexto el presente proyecto pretende generar un modelo de combustible forestal eficiente, para ello, se plantea utilizar el modelo de combustible Prometheus, que según Lasaponara et al. (2006) permitirá obtener un sistema de estandarización útil para la clasificación por teledetección, mismo que será implementado como insumo en los modelos de predicción de lógica difusa como apoyo al Plan Técnico Interinstitucional para la Gestión de Incendios Forestales (PIIF) en el Refugio de Vida Silvestre Pasochoa.

### **Planteamiento del Problema**

Como consecuencia del cambio climático según Kottasová (2021), cada año aumentan las sequías, temperaturas y vientos, siendo factores que inciden en la magnitud de los incendios forestales, provocados por la mala gestión del uso de suelo y negligencia en procedimientos de quema agrícola cercanos a zonas de protección ambiental. Debido a esto el cambio climático amenaza con aumentar la frecuencia, la extensión y la gravedad de los incendios a través del aumento de las temperaturas y la sequía (Environmental Protection Agency [EPA], 2021). Como consecuencia, los incendios forestales liberan crecientes concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, mismos que aceleran el calentamiento global y cuyo efecto se ve reflejado en el aumento de eventos de ignición natural que en conjunto con el cambio en el uso del suelo y los enfoques de manejo del fuego

contribuyen en el aumento de incendios forestales en todo el mundo (Prairie Climate Centre, 2022).

El cambio climático ha afectado negativamente a ecosistemas de sabanas y selvas tropicales en América Latina, provocado periodos prolongados de sequía, que han dado origen a grandes incendios forestales en regiones andinas y amazónicas, entre las cuales se encuentran las áreas protegidas de vegetación nativa del Ecuador (Dowdy et al., 2022). Desde el año 2012 al 2019, según el diario El Universo (2019) los incendios forestales han afectado alrededor de 62 mil hectáreas de áreas protegidas del Ecuador, de las cuales el Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica (2020) informa que 400 hectáreas fueron consumidas por el fuego en el la zona de amortiguamiento del Refugio de Vida Silvestre Pasochoa. Gran parte del refugio se encuentra compuesto Chusquea sp (Suro) y pajonal de páramo, estos tipos de vegetación debido a su facilidad de transformación en material combustible pueden ser fuentes de ignición de rápida propagación. Por consecuencia, el refugio se encuentra expuesto cada año entre los meses de junio – septiembre, correspondientes a la época seca. El origen de los incendios forestales en el refugio, zona de amortiguamiento y colindantes, surge entre estos meses del año debido a negligencias en la quema de material agrícola, eventos de origen natural o incendios provocados. Como consecuencia de estos eventos, se ha perdido gran cantidad de biodiversidad.

En este contexto, la aplicación de las herramientas pertenecientes a las tecnologías geoespaciales como sistemas de información geográfica (SIG) y sensores remotos, son de vital importancia en la gestión de información espacial generada a partir de incendios forestales, debido a que están directamente relacionadas con los beneficios esperados de la explotación de dichas tecnologías diseñadas para apoyar la toma de decisiones. Así mismo, si estas tecnologías se usan de manera inadecuada no se facilitará sustancialmente el establecimiento de procedimientos de preparación en entidades a cargo de la protección de las reservas naturales, ya que si no se aplican de una forma apropiada no se conseguirá la estimación de

propagación del fuego y no será posible gestionar los recursos disponibles durante la generación de crisis en áreas afectadas.

### **Justificación e importancia**

Actualmente el 3.5% de la superficie de la Sierra Ecuatoriana corresponde a bosques nativos andinos (Ecuador Turístico, 2012). Este tipo de ecosistema proporciona servicios ambientales diversos, como la captura de carbono, reserva hídrica y regulación climática, mismos que para su conservación es necesario cumplir con actividades de protección y uso sostenible para evitar la degradación de la diversidad biológica en bosques y áreas protegidas como se menciona en el objetivo 15 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Naciones Unidas, 2018).

Sin embargo, actividades como deforestación, minería y quemas agrícolas descontroladas, como consecuencia de la mala gestión ambiental en los bosques andinos, han deteriorado el medio ambiente (Valarezo, 2019). Por ello, cabe mencionar que, el Refugio de Vida Silvestre Pasochoa, posee uno de los últimos remanentes de bosque nativo alto andino del Ecuador que se encuentran propensos a estos eventos, por ello, es de suma importancia su conservación y protección.

En este contexto es importante mencionar que el desarrollo tecnológico entorno a las herramientas geoespaciales, ha permitido contribuir en la prevención y mitigación de incendios que afectan directa o indirectamente a los ecosistemas naturales. Por esta razón, es pertinente utilizar estas herramientas para la elaboración cartográfica de los posibles focos de incendios, que permitan identificar zonas con altos niveles de combustión en el refugio y zonas de amortiguamiento. Estos insumos podrán ser utilizados como apoyo al Plan Técnico Interinstitucional para la Gestión de Incendios Forestales en el Refugio de Vida Silvestre Pasochoa (PIIF), a fin de prevenir y mitigar daños originados por la eventual ocurrencia de incendios forestales.

## Área de influencia

El Ministerio de Agricultura y Ganadería en el año de 1982, designó 320 ha de la Hacienda Pilopata de Monjas como bosques protegidos, formando el Bosque Protector Pasochoa, ese mismo año el Ministerio de Salud Pública cedió el cargo del bosque a la Fundación Natura para su administración, misma que se enfocó en promover una educación ambiental para colaborar con la preservación de la fauna y flora de la zona (Arizaga, 2017). El 11 de diciembre de 1996 mediante la Resolución N° 065, se crea El Refugio de Vida Silvestre Pasochoa y es publicado en el Registro Oficial N° 92 del 19 de diciembre del mismo año, mismo que administraba la Fundación Natura hasta abril del 2011, en donde, la administración del refugio pasó al Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (Lasso, 2017).

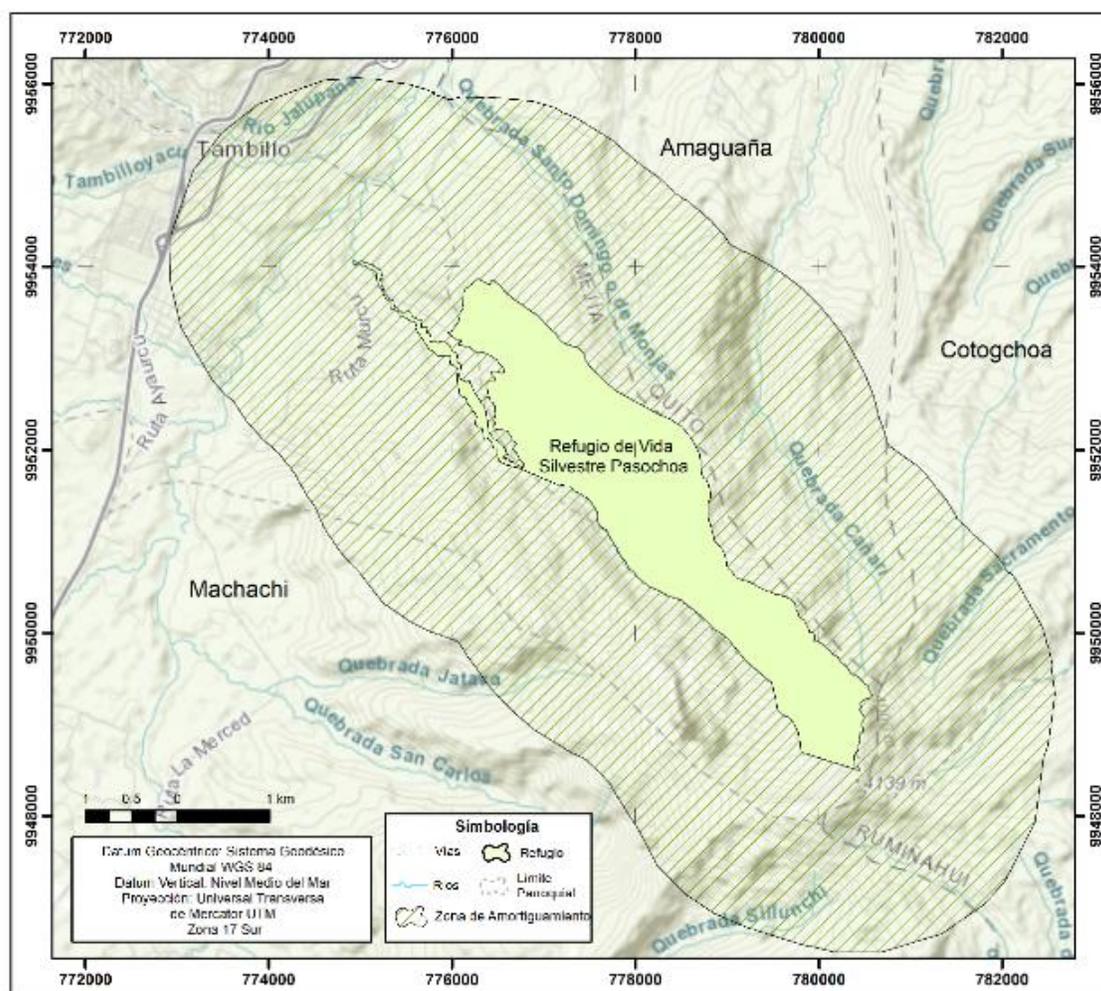
El Refugio se encuentra localizado en los flancos del volcán Pasochoa que está constituido por una superposición de capas de ceniza volcánica y flujos de lava solidificados (Oñate, 2018). El cráter tiene forma cónica truncada, con una altura de 4210 msnm en su parte más alta, en donde su caldera alcanza 2 Km de diámetro y su base mide 15 Km y se encuentra rodeado de vegetación que conforma uno de los últimos remanentes de bosque andino de la Sierra ecuatoriana (Sánchez, 2017). Gracias a sus micro climas, es posible el crecimiento de diversas especies de flora como el pumamaqui, polylepis, laurel, palma de ramos, bromelias, palma de cera, flores amarillas de achicoria, chilca, shanshi, cheflera, chamana, árboles nativos, plantas medicinales, 23 tipos de orquídeas (Montúfar, 2010). En cuanto a las especies faunísticas el refugio es un hábitat idóneo para el desarrollo de especies como el conejo de páramo, ratón marsupial, comadreja, zorros, zorrillo, lobo, cervicabra, puma, tórtola, mirlo, gallinazo negro, cóndor andino y una gran variedad de colibríes y tangaras (Montúfar, 2010).

Con respecto a la temperatura, se aprecian distintas variaciones dependiendo de la altitud. Entre los 2800 y 2900 metros sobre el nivel del mar la temperatura se encuentra en un rango de 12 a 18°C, desde los 2900 a los 3600 metros varía entre 10 a 15°C y desde los 3600 metros en adelante, la temperatura va de 3 a 8°C (Jijón y Pazmiño, 1990). Además, presenta

una precipitación media anual de 142.1 mm en los meses de octubre a mayo, en donde las lluvias son intermitentes, y en el mes de abril éstas son abundantes llegando al promedio de 351.5 mm. Mientras que en la época seca correspondiente a los meses de junio, julio y agosto el promedio de precipitación es de 49.1 mm; cabe mencionar que la humedad relativa es del 81% en promedio anual (Sánchez, 2017). Como se presenta en la Figura 1, se encuentra localizado en la Parroquia de Uyumbicho, Cantón Mejía, Provincia de Pichincha, limitando al Norte y Este con la Parroquia de Amaguaña y al Sur con la Parroquia de Tambillo.

### Figura 1.

*Área de estudio del Refugio de Vida Silvestre Pasochoa*



## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

Determinar la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales mediante tecnologías geoespaciales y el modelo de predicción lógica difusa para la toma de decisiones como apoyo al Plan Técnico Interinstitucional para la Gestión de Incendios Forestales (PIIF) en el Refugio de Vida Silvestre Pasochoa – Cantón Mejía Provincia de Pichincha.

### ***Objetivos Específicos***

- Recopilar y seleccionar información preexistente por medio de fuentes bibliográficas confiables y fuentes de acceso libre para la generación de una geodatabase con la información obtenida.
- Modelar los índices espectrales (NDVI, SAVI, NBR, IAQ y GEMI) para calcular diferentes variables que describan los fenómenos sobre la cobertura vegetal.
- Definir los modelos de combustible Prometheus mediante clasificación supervisada e identificar las especies vegetales.
- Modelar las variables independientes mediante el método IDW y distancias euclidianas para el cálculo de probabilidad de Lógica Difusa.
- Generar el modelo de probabilidad de incendios forestales mediante el método Lógica Difusa y validar su resultado.

### **Metas**

- Una geodatabase con información preexistente.
- Un catálogo con los índices espectrales: NDVI, SAVI, NBR, IAQ y GEMI, con resolución de 10 metros.
- Un mapa del modelo de combustible Prometheus a escala 1:50000 y un mapa de cobertura de vegetación a escala 1:50000.

- Una geodatabase con las variables independientes del estudio a una resolución de 10 metros.
- Un mapa del modelo de probabilidad de lógica difusa a escala 1:50000 y su respectivo informe de validación.

### **Hipótesis**

Las técnicas de análisis espacial de Lógica Difusa y el uso de sensores remotos permitirán calcular un modelo de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en el Refugio de Vida Silvestre Pasochoa.

## Capítulo 2

### Marco Teórico

El presente capítulo se encuentra enfocado en establecer un sustento teórico como guía para la evaluación de la investigación, en donde se recopilan aspectos esenciales en relación riesgos, incendios forestales y modelamiento de combustibles. Posteriormente se aborda el tema de imágenes satelitales centrado en correcciones y generación de índices espectrales y finalmente se presenta el método de lógica difusa con sus respectivos casos y variables. En este contexto, el fin de la conceptualización presentada asegura el cumplimiento del objetivo principal, presentando una base para el desarrollo metodológico de la investigación. El primer aspecto que se toma en cuenta corresponde a la Gestión de Riesgos, en donde se revisará su definición y los conceptos que lo engloban.

#### **Gestión de Riesgos**

En el año 2019 se implementa el Plan Específico de Gestión de Riesgos para el Ecuador, el cual encamina a la sociedad ecuatoriana a generar comunidades con un bajo índice de vulnerabilidad mediante proyectos de emergencias, campañas de captación de fondos o planes de prevención, mitigación y reducción de riesgo que permitan una respuesta adecuada ante eventos peligrosos como: Inundaciones, sismos, incendios forestales, entre otros. (Cruz Roja Ecuatoriana, 2021). Para ello es fundamental tener en claro el concepto Gestión de Riesgos que según Olivera (2018), es un proceso que se encarga de planificar, organizar, dirigir y controlar los recursos humanos y materiales de una organización, con la finalidad de minimizar o aprovechar los riesgos e incertidumbres del Estado.

#### ***Conceptos Básicos en la Gestión de Riesgos***

La Gestión de Riesgos engloba términos necesarios que permitirán su comprensión, entre ellos se destacan los siguientes:

**Riesgo.** Según el Ministerio del Interior de la República de Colombia (2012), el riesgo “corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos

físicos peligrosos de origen natural, social, tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos”.

**Amenaza.** Es la posibilidad que ocurra un fenómeno o un evento adverso, en un momento y lugar determinado, con un grado de magnitud que podría ocasionar daños a las personas o a la infraestructura, generando pérdidas humanas, trastornos sociales, económicos y ambientales (Renda et al., 2017). Según la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (2005), como se observa en la Tabla 1, la amenaza puede dividirse en tres clases : amenazas, naturales, antropogénicas y socio naturales.

**Tabla 1.**

*Tipos de Amenazas*

<b>Amenaza</b>	<b>Descripción</b>	<b>Origen</b>
Amenaza Natural	Se originan por la dinámica de la naturaleza.	Deslizamientos, Sismos, Erupciones, Incendios forestales, Inundaciones, entre otros.
Amenaza Antropogénica	Se deriva de la acción humana.	Incendios y contaminación (suelo, aire y agua)
Amenaza Socio-Natural	Se origina en la interrelación de prácticas humanas y naturales, generadas por las inadecuadas prácticas de agricultura o expansión urbana	Agotamiento del recurso hídrico, desertificación, sequias, entre otros.

*Nota:* Adaptado de (Agencia de Cooperación Internacional del Japón, 2005).

**Vulnerabilidad.** Es la condición o el grado al cual una población o infraestructura, se encuentra expuesta o susceptible a una amenaza, misma que puede ser social, económica o ambiental (Diakonie Katastrophenhilfe, 2017).

**Peligro.** Según las ISO 9001 (2015), define al peligro como la situación mediante la que un riesgo pasa a ser real y no una probabilidad. En cuanto a los peligros, deben ser analizados, prevenidos y corregidos, puesto que son los que aumentan considerablemente la aparición de los riesgos.

### ***Estrategias Básicas en la Gestión de Riesgos***

Las estrategias de prevención, mitigación y preparación que serán descritas a continuación, trabajan para reducir los costos financieros y sociales para las comunidades a lo largo del tiempo, mejorar el entorno construido y reducir el impacto y el daño al medio ambiente. De manera que, mejora la resiliencia económica, social, sanitaria y cultural de las personas y comunidades (Queensland Government, 2022).

**Prevención.** Se define como aquellas actividades realizadas con antelación para evitar que un fenómeno natural o peligro potencial tenga efectos nocivos sobre las personas o los bienes económicos. La planificación de la prevención permite a las autoridades determinar estrategias de prevención en base a dos aspectos: la identificación de peligros (identificar las amenazas reales que enfrenta una comunidad) y la evaluación de la vulnerabilidad (evaluar el riesgo y la capacidad de una comunidad para manejar las consecuencias del desastre) (Sena, 2006).

**Mitigación.** Se define como aquellas acciones tomadas para ayudar a reducir o eliminar los riesgos a largo plazo causados por peligros o desastres, como inundaciones, terremotos, incendios forestales, deslizamientos de tierra o fallas en represas, de manera que reduzca la pérdida de vidas y propiedades (Emergency Management Department of Angeles, 2022).

**Preparación.** Es un estado de preparación para responder a un desastre, crisis o cualquier otro tipo de situación de emergencia. La capacitación y la educación pública son las

actividades de preparación más comunes, que, al ser aplicadas correctamente, tienen un gran potencial para ayudar a las personas a sobrevivir a los desastres. Aunque las actividades de preparación hacen poco para evitar que ocurra un desastre, son muy eficaces para garantizar que las personas sepan qué hacer una vez que ha ocurrido el desastre (Bullock et al., 2013).

### **Incendios Forestales**

La pérdida potencial de la riqueza forestal a causa de los incendios forestales está aumentando en muchas partes del mundo, representando una amenaza mayor no solo para la riqueza forestal sino para todo el régimen de fauna y flora, afectando gravemente la biodiversidad natural, debido a que, si un incendio ocurre en una zona forestal, se propagará continuamente causando la destrucción de pequeña a gran escala de bosques y poblados urbanos o rurales adyacentes (Vignesh, 2015).

Los incendios forestales son el resultado de la propagación descontrolada del fuego en un área boscosa generado a partir de la combustión de la vegetación (árboles, matorrales, pastizales o cultivos) mismos que pueden tener su origen por causas naturales o humanas (Plana et al., 2016).

Cabe mencionar que la ocurrencia natural de incendios forestales en los ecosistemas, componen un aspecto necesario para la regeneración natural, por lo que, si ha ocurrido un incendio forestal en un área en el pasado, volverá a ocurrir en el futuro, pero las áreas que pueden no tener un historial de actividad de incendios forestales se vuelven más susceptibles al fuego cuando la nueva actividad humana y el desarrollo invaden un área boscosa (Ministère des Richesses Naturelles, 2014). En este sentido, el papel del fuego en la disposición global de los ecosistemas y sus funciones, y dado que los elementos del comportamiento del fuego (clima, topografía y vegetación) están dispuestos en un delicado balance, la actividad de incendios en todo el mundo es muy sensible al cambio ambiental global.

## Causas del Origen de Incendios Forestales

En los ecosistemas forestales, los incendios son un proceso vital y esencial para el desarrollo de sucesiones ecológicas, no obstante, este proceso se ha visto modificado por acciones humanas que alteran el proceso natural de la estructura y composición de especies forestales y faunísticas (Castillo et al., 2003). Como se observa en la Tabla 2. gran parte de las causas de los incendios son de origen antrópico, que según el Banco de Desarrollo de América Latina (2022), el 99% de los incendios forestales se deben a negligencia, quemas agrícolas no controladas, fogatas o acciones pirómanas.

**Tabla 2.**

*Clasificación de las Causas de Incendios Forestales*

Causas	Descripción
Natural	Erupciones volcánicas o relámpagos.
Negligencia	Uso equivocado del fuego en actividades como quema de basura, quema masiva de combustibles forestales, actividades ocio, dispersión y transporte de partículas incandescentes de chimeneas o quemas agropecuarias no controladas.
Intencional	Resultado de comportamientos y actitudes que reaccionan a las limitaciones de los sistemas de gestión agroforestal y los conflictos relacionados con el uso de la tierra.
Reactivaciones	Recombustión de un área quemada con anterioridad, donde no se ha consumido el material combustible en su totalidad y se origina por el calor latente, chispas o brasas.

---

Desconocido	Ausencia de suficiente evidencia objetiva para determinar la causa de la ignición.
-------------	--

---

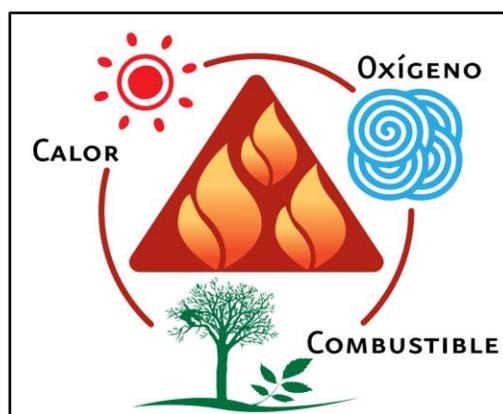
*Nota:* Adaptado de (Meira et al., 2020).

### Comportamiento del Fuego

El enfoque de los incendios forestales gira entorno al triángulo de fuego representado en la Figura 2, en donde se ilustran los elementos: calor, combustible y oxígeno, que en conjunto dan origen a la combustión. Según Robinne (2021) estos elementos en las porciones ideales, conducirán a la pirólisis la cual consiste en transformación de propiedades físico químicas de la materia orgánica en altas temperaturas. En el caso de incendios forestales, el combustible es proporcionado por algún tipo de vegetación (arbusto, árbol o madera muerta), el oxígeno naturalmente presente en la atmósfera proporciona el oxidante, y las actividades humanas o naturales proporcionan la fuente de calor.

### Figura 2.

*Triángulo de Fuego*



*Nota:* Tomado de (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2010).

### Factores de Comportamiento del Fuego

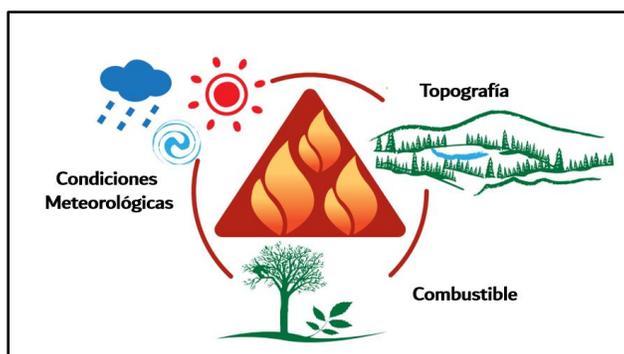
Según la Comisión Nacional Forestal (2010) las condiciones que contribuyen en la propagación del fuego se encuentran conformadas por tres factores: tipo de combustible

(especies vegetales), condiciones meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, precipitación fluvial) y topografía, mismos que se representan en la Figura 3.

Dependiendo de la combinación de estos factores, el comportamiento del fuego será más o menos severo, por ejemplo: en pendientes empinadas, altas temperaturas climáticas, y alta carga de combustible generan índices de fuego de alta intensidad (Yakubu et al., 2015).

### Figura 3.

#### *Triángulo de Comportamiento del fuego*



*Nota:* Tomado de (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2010).

#### **Combustible**

Según Ruiz (2004), los combustibles son los materiales físicos de la biomasa que se consumen durante la propagación del fuego. Las características del combustible, tanto vegetativas como estructurales, influyen fuertemente en el comportamiento del fuego, en donde, las características (material, contenido de humedad, entre otros) y orientación de las categorías individuales de combustible, como árboles y maleza, crean caminos para que el fuego se mueva tanto horizontal como verticalmente (Instituto de Seguros para la Seguridad Comercial y del Hogar [IBHS], (2020). De los tres componentes del triángulo de comportamiento de fuego los combustibles son únicos porque pueden modificarse para cambiar el comportamiento del fuego.

**Clasificación de Combustibles Forestales.** Como se observa en la Tabla 3. según Díaz (2015), los combustibles forestales se clasifican bajo diferentes criterios de acuerdo a su peso, tamaño y ubicación.

**Tabla 3**

*Clasificación de los Combustibles Forestales*

<b>Clasificación</b>	<b>Combustible</b>	<b>Elementos</b>
Según su Peso	Ligeros	Hojarasca y pastizales
	Pesados	Árboles caídos, árboles en pie y ramas muertas.
	Verdes	Árboles caídos o en pie con presencia de humedad.
Según su Tamaño	Finos	Diámetro menor de 0.6 cm, correspondiente a hojas.
	Regulares	Diámetro de 0.6 a 2.5 cm, correspondiente a ramillas.
	Medianos	Diámetro de 2.6 a 7.5 cm, correspondiente a ramas y tallos pequeños.
	Pesados	Diámetros mayores a 7.5 cm, correspondiente a troncos y ramas gruesas.
Según su Ubicación	Subterráneos	Raíces, hojas, ramillas y otros materiales que se encuentran en el suelo.
	Superficiales	Hojas, ramas, ramillas, arbustos o árboles jóvenes, troncos, que se encuentran a 1.5 m de altura o sobre el suelo.

---

Aéreos	Ramas, follaje, musgo, que se encuentran a más de 5.5 m de altura sobre el suelo.
--------	--

---

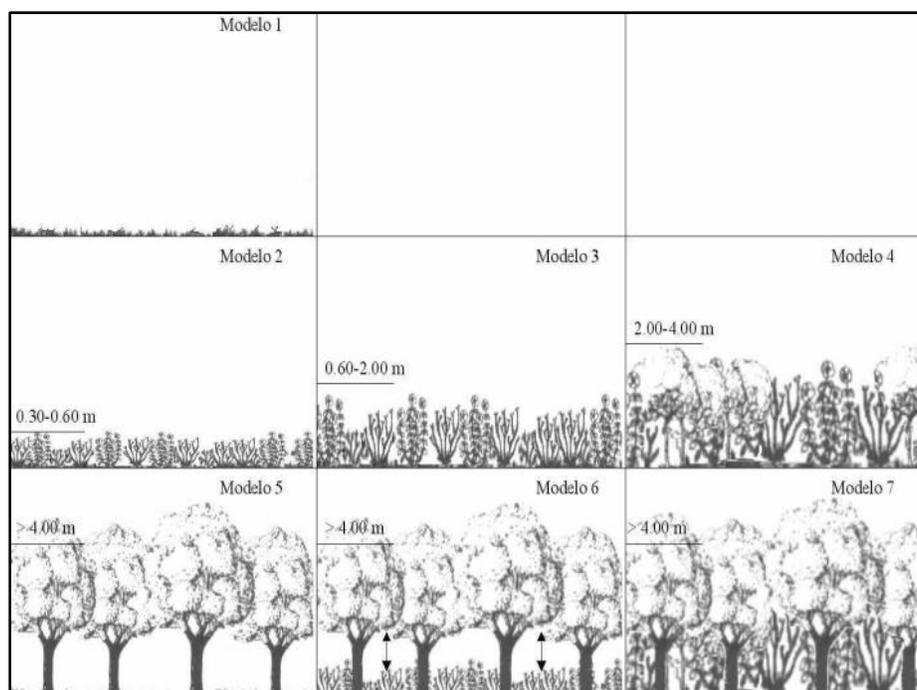
*Nota:* Adaptado de (Díaz, 2015).

**Modelos de Combustible.** Debido a las combinaciones de tipo de vegetación en un paisaje, es imposible caracterizar todas las combinaciones posibles que afectan al combustible. Por lo tanto, la generalización de combustibles en un número finito de modelos de combustibles se ha convertido en un enfoque ampliamente utilizado para caracterizar y mapear los combustibles forestales en un paisaje. Un modelo de combustible se define como una asociación identificable de componentes de combustible forestal de especies, en donde se distinguen: forma, tamaño, disposición y continuidad mismas características que exhibirá un comportamiento característico del fuego en condiciones de combustión definidas (Cai et al., 2014). En otras palabras, los modelos de combustible describen características físicas de la vegetación en su conjunto y no el tipo de especie que se encuentra presente. Los modelos de combustible se utilizan para clasificar las cubiertas vegetales, con el objetivo de determinar de manera precisa sus parámetros de combustibilidad y estudiar el comportamiento del fuego en caso de incendio (Mons, 2015).

**Modelo de Combustible Prometheus.** Esta clasificación de modelos de combustible, como se observa en la Figura 4, se definió para los incendios de superficie, en donde, se considera a la altura de los elementos propagadores (Tabla 4) como el principal impulsor del comportamiento del fuego (Domingo et al., 2020).

**Figura 4.**

*Clasificación de los Modelos de Combustible Según Prometheus*



*Nota:* Tomado de (Chavero, 2011).

**Tabla 4.**

*Características de los Modelos de Combustible Según Prometheus*

<b>Modelo</b>	<b>Característica</b>
Modelo 1	Combustibles terrestres: pasto.
Modelo 2	Combustibles de superficie: arbustos y árboles de entre 0.3 a 0.6 m de altura.
Modelo 3	Arbustos de altura media con una altura de entre 0.6 y 2.0 m, así como árboles jóvenes resultantes de regeneración natural o forestación
Modelo 4	Arbustos altos (entre 2.0 y 4.0 m) y árboles en regeneración.

---

Modelo 5	Bosque con árboles mayores a 4 m con una superficie de suelo limpio. El combustible del suelo se eliminó mediante quema prescrita o por medios mecánicos. Esta situación también puede ocurrir en copas cerradas en las que la falta de luz solar inhibe el crecimiento de la vegetación superficial.
Modelo 6	Bosque con árboles mayores a 4 m con combustibles de superficie media. La base de las copas está muy por 0.5 m encima de la capa de combustible. El combustible consiste esencialmente en pequeños arbustos, hierba, hojarasca y basura.
Modelo 7	Bosque con árboles mayores a 4 m con combustibles pesados en la superficie. No existe diferencia de altura entre los arbustos y las copas de los árboles

---

*Nota:* Adaptado de (Riaño et al., 2002).

### **Condiciones Meteorológicas**

Según Donoso et al., (1975), las condiciones climáticas influyen en el comportamiento del fuego, en donde, las variables como temperatura, humedad relativa y precipitaciones, determinan su ocurrencia y propagación, cabe mencionar que, estas variables poseen un comportamiento diferente dependiendo de la latitud, altitud, circulación atmosférica, corrientes marinas o relieve.

**Temperatura.** Influye en el fuego al secar los combustibles y regula la temperatura del combustible. Generalmente, el fuego se enciende y propaga más fácilmente a altas temperaturas. Además, si las temperaturas son altas durante el incendio, es probable que el fuego arda con mayor intensidad y severidad (Leavell et al., 2017).

**Precipitación.** Influye en el contenido de humedad de los combustibles. debido a que los materiales finos, ligeros o pesados pueden ganar o perder humedad en diferente proporción, dependiendo de las condiciones climáticas, en consecuencia, es menos probable que el fuego se encienda después de una lluvia prolongada o en la época lluviosa (Agencia para el Desarrollo Internacional de los Estados Unidos [USAID], 2006).

**Humedad Relativa.** Influye en el comportamiento del fuego al afectar la humedad del combustible, ya que dependiendo de la humedad presente en el aire, los materiales combustibles pueden secarse o absorber humedad (Community Planning Assistance for Wildfire [CPAW], 2018). Por lo general, la humedad relativa aumentará durante la noche y disminuirá durante el día.

### ***Topografía***

Las características físicas de la superficie terrestre son factores que condicionan la propagación del fuego en base a las pendientes, límites naturales y antrópicos como lagos, ríos, desiertos, vías, senderos, muros, entre otros. Estas características topográficas pueden ayudar o dificultar la propagación del fuego, por ejemplo, los drenajes pueden actuar como cortafuegos debido a que los combustibles aumentan su humedad en las cercanías del cauce (Government of Nova Scotia, 2021). También es importante considerar la pendiente, ya que puede determinar qué tan rápido se moverá un incendio. Por ejemplo, si el fuego se origina al pie de una pendiente empinada, se propagará mucho más rápidamente hacia arriba porque puede precalentar los combustibles próximos con el aire caliente ascendente (U.S. National Park Service, 2017).

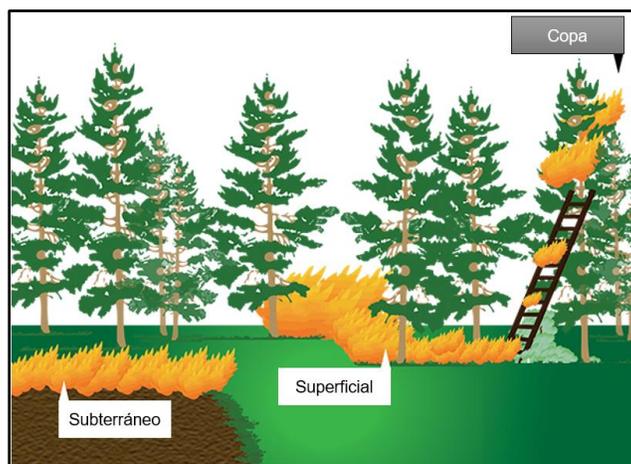
### **Tipos de Incendios Forestales**

Las variaciones en la combinación de las condiciones climáticas, tipo de combustible y topografía conducen a diferentes comportamientos del fuego. Según el Centro Nacional de Prevención de Desastres (2001), los incendios forestales se encuentran divididos de acuerdo a

sus particularidades en 3 tipos: de copa, superficial y subterráneo, como se observan en la Figura 5 y se describen a continuación:

### **Figura 5.**

#### *Tipos de Incendios forestales*



*Nota:* Tomado de (Haygot Technologies, 2020).

#### ***Incendio de Copa***

Este tipo de incendio es difícil de controlar ya que se desarrolla en toda la longitud de los árboles hasta su copa, siendo este tipo de incendios los más intensos y de rápida propagación, por esta causa se ven afectados negativamente los ecosistemas y hábitats de fauna silvestre (Centro Nacional de Prevención de Desastres [CENAPRED ], 2001). Durante incendios de copa medianos y fuertes, se forma una corriente ascendente que eleva partículas ardientes (pequeñas ramas, fragmentos de corteza, entre otros) a cientos de metros; en el caso de que la corriente ascendente se incline debido a la acción del viento, las partículas quemadas que caen fuera del contorno del fuego provocan la aparición de nuevos focos de incendios (Comité Forestal de la Región de Moscú, 2019).

#### ***Incendio Superficial***

Consume la hojarasca superficial, restos sueltos de material orgánico y vegetación pequeña a lo largo del suelo del bosque, en donde su capacidad de propagación es de baja

intensidad por lo que representa un bajo peligro para la maduración de las plantas, alcanzando una altura de la llama de hasta 1m (Sahu y Ram, 2018). Las condiciones para la generación y propagación de incendios superficiales son en la época de sequías, cuando únicamente se seca la capa superior de los materiales combustibles (Drapalyuk et al., 2019).

### ***Incendio Subterráneo***

Los incendios subterráneos son el resultado de incendios de suelo y de copa. Por lo general, estos incendios se encuentran a una profundidad de 15 a 20 cm, que al originarse destruyen la parte orgánica del suelo compuesta por acumulaciones de humus, turba, raíces y vegetación muerta con disponibilidad de oxígeno (Administración del Distrito de Yakovlevsky, 2018). Cabe mencionar que, al encontrarse bajo la superficie, no producen llama y emiten poco humo debido a que se desplazan lentamente y en efecto son difíciles de controlar o suprimir por completo (Government of Canada, 2021).

### **Sistemas de Información Geográfica**

Para enfrentar este tipo de fenómeno que se origina diversos en territorios, es necesario el uso de Tecnología de la Información Geoespacial, ya que, con los avances de la tecnología, se han desarrollado varias técnicas para mejorar la gestión de los incendios forestales. Por ejemplo, los SIG han desarrollado funciones que permiten recopilar, analizar y almacenar información sobre las condiciones forestales que contribuyen en la localización de parámetros de causa para los fenómenos de declive forestal (Ghobadi et al., 2012).

Las herramientas y tecnologías modernas junto con el conocimiento tradicional pueden ser de gran importancia en la prevención, control y manejo de incendios forestales. Los SIG, en combinación con otras formas de tecnología como los sensores remotos y el modelamiento espacial, se utilizan cada vez más en todos los aspectos de la gestión de incendios forestales (Ljubomir et al., 2019).

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas computarizadas para la toma de decisiones, que funcionan con información basada en el lugar, y permiten a los

usuarios mostrar, administrar y analizar datos geográficos (Boeser y Hamylton, 2019). Una de las raíces más importantes de los SIG es la automatización de flujos de trabajo cartográficos, con el objetivo de integrar, almacenar y representar datos espaciales en bases de datos digitales, para producir mapas que permitirán tomar decisiones y mejorar la comprensión de las interrelaciones espaciales a través del análisis espacial, mismo que consiste en estudiar las características de la distribución espacial de las unidades geográficas (Lü et al., 2019).

### **Modelamiento Espacial**

El modelado espacial es un instrumento importante para realizar análisis geoespaciales mediante los SIG, en donde, se combinan varias herramientas analíticas para obtener información significativa. Los modelos espaciales pueden representar una réplica digital del mundo, lo que permite a los usuarios comprender los mecanismos de los sistemas naturales y humanos, proyectar tendencias futuras y experimentar con escenarios hipotéticos (UCGIS, 2022). Estos modelos pueden representarse de forma gráfico-numérico, en este sentido, la parte gráfica representa los datos numéricos en forma vectorial o ráster para indicar procesos o resultados de una forma visual, y la parte numérica representa los datos obtenidos a partir de cálculos que reflejan las posibles condiciones iniciales y son estudiados mediante el análisis espacial (Durán, 2012). En otras palabras, el modelo de datos representa un conjunto de reglas o pautas que se utilizan para convertir las características del mundo real en objetos espaciales de forma digital y lógica, mismas que son representadas en diferentes categorías como se indica en la Tabla 5 (Indira Gandhi National Open University [IGNOU], 2018).

#### **Tabla 5.**

*Clasificación de los Modelos Espaciales según su Grado de Formalización y Tratamiento de Indeterminismo*

<b>Clasificación</b>	<b>Modelo</b>	<b>Descripción</b>
----------------------	---------------	--------------------

<b>Grado de Formalización</b>	Modelo Conceptual	Delinea los componentes del sistema bajo investigación y resaltar los vínculos entre ellos.
	Modelo Matemático	Operacionalizan los modelos conceptuales al representar sus componentes con construcciones matemáticas
	Modelo Físico	Presenta la implementación real en un entorno GIS
<b>Tratamiento de Indeterminismo</b>	Modelo Determinista	Generan soluciones repetibles basadas en la evaluación directa de relaciones definidas
	Modelo Probabilístico	Se basan en distribuciones de probabilidad de eventos estadísticamente independientes.

*Nota:* Adaptado de (Fotheringham y Wegener, 2000).

### **Análisis Espacial**

El análisis espacial es un proceso de interpretación, exploración y modelado de datos SIG, desde la adquisición hasta la comprensión de los resultados (Earth Observing System, 2021). El análisis espacial le permite resolver problemas complejos relacionados con la ubicación, buscar patrones, evaluar tendencias, permitiendo estudiar sus relaciones y las características de los lugares para la toma de decisiones (ArcGIS Pro, s.f). Mediante el análisis espacial, es posible combinar y obtener información nueva aplicando una serie de técnicas como se describen a continuación.

#### *Distancia Inversa Ponderada (IDW)*

El método de distancia inversa ponderada (IDW), es modelo de interpolación espacial determinista. Su idea general se basa en la suposición de que el valor del atributo de un punto

no muestreado es el promedio ponderado de los valores conocidos dentro de la vecindad, y los pesos están inversamente relacionados con las distancias entre la ubicación de predicción y las ubicaciones muestreadas (GIS Resources, 2013).

El IDW se modifica mediante una potencia constante o un parámetro de control de la distancia para ajustar la fuerza decreciente en relación con el aumento de la distancia, cuyo valor comúnmente es 2 (Lu y Wong, 2008). Este método asume que el valor en una ubicación desconocida se puede aproximar como un promedio ponderado de valores en puntos dentro de una cierta distancia límite, o desde un número dado de puntos más cercanos (típicamente de 10 a 30) (Ikechukwu et al., 2017).

Según Ossa et al. (2015), la Ecuación 1, representa del método de interpolación mediante distancia inversa ponderada (IDW) y la Ecuación 2, corresponde a los pesos involucrados el método IDW.

$$Z_p = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i \quad (1)$$

Donde:

$Z_p$  = punto donde se desconoce el valor

$Z_i$  = valor de los puntos conocidos

$n$  = cantidad de datos

$\lambda_i$  = peso

$$\lambda_i = \frac{\frac{1}{d_i^\alpha}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^\alpha}} \quad (2)$$

Donde:

$d_i$  = distancia del punto desconocido a cada uno de los puntos conocidos

$\alpha$  = parámetro de control. De acuerdo con la literatura este valor puede ser  $\alpha=2$ .

Cabe mencionar que el parámetro de control cuando es superior a 3, no contribuye a la calidad de la interpolación, ya que casi anula el efecto y la participación de los puntos más alejados (Achilleos, 2008).

### **Distancia Euclidiana**

En el procesamiento de imágenes digitales, a menudo se requiere un mapa de distancias en el que a todos los píxeles que no son característicos se les asignan valores de distancia con respecto a sus píxeles característicos más cercanos, en donde, la distancia exacta entre dos puntos con coordenadas de  $(x_1, y_1)$  y  $(x_2, y_2)$  se puede calcular a partir de la Ecuación 3, correspondiente a la distancia euclidiana (Razmjooei y Dudek, 2010).

$$D_{Eu} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (3)$$

Dicho de otra forma, consiste en generar un ráster a partir de una capa vectorial u otra ráster, el cual nos indique las distancias que existen desde esa figura al resto del campo de forma visual (Adan, 2015). Cabe mencionar que, el ráster de salida de distancia euclidiana contiene la distancia medida desde cada celda hasta la fuente más cercana, medidos en las unidades de proyección del ráster, como pies o metros (ArcGIS Pro, s.f.).

### **Lógica Difusa**

La lógica difusa fue planteada por Zaded en el año de 1965 en la Universidad de Berkeley (California). Según Ramírez (2014), “es un sistema que formaliza los razonamientos válidos que contienen enunciados con términos denominados borrosos, de uso muy común en el lenguaje natural”. En comparación con los conjuntos clásicos (donde las variables pueden tomar valores verdaderos o falsos), las variables de lógica difusa pueden tener un valor de verdad que oscila entre 0 (no ocurre) y 1 (definitivamente ocurre). Este método maneja el concepto de verdad parcial, donde el valor de verdad puede oscilar entre completamente verdadero y completamente falso. A medida que se recopilan datos adicionales, muchos

sistemas de lógica difusa pueden ajustar los valores de probabilidad asignados a diferentes parámetros (Bhowmick et al., 2014).

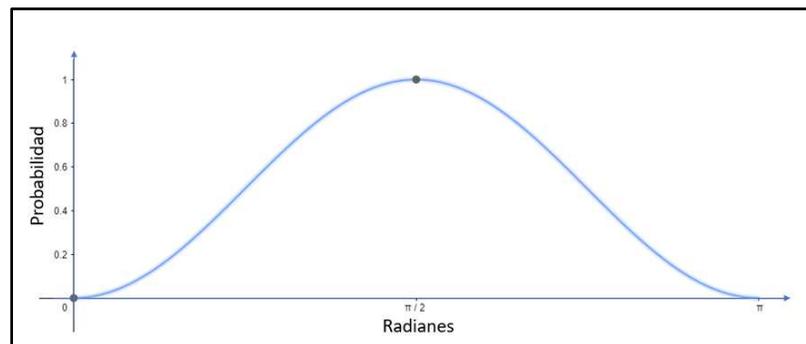
Este método proporciona un procedimiento para calcular y representar sistemáticamente información incierta, imprecisa o incompleta, a partir de la selección adecuada de parámetros que permitirán construir un modelo acertado (Al-Abadi et al., 2017). Una de las ventajas de la Lógica Difusa es que proporciona un nivel de incertidumbre de la ocurrencia del fenómeno, lo que le permite convertirse en una herramienta probabilística más eficiente que los métodos deterministas tradicionales. A través de la lógica difusa, es factible representar modelos matemáticos no lineales con el uso de variables lingüísticas y condiciones definidas según el objeto de estudio (Padilla, 2007).

**Casos de Lógica Difusa.** Según Padilla et al. (2012), el método de lógica difusa trabaja dentro del rango de 0 a 1, por lo que aplican las funciones Seno o Coseno. Con esta metodología se presentan tres casos posibles.

El primer caso, pertenece a la función seno en donde el rango a ser utilizado en el análisis es de 0 a  $\pi$  como se indica en la Figura 6.

### Figura 6.

#### *Primer Caso de Lógica Difusa*

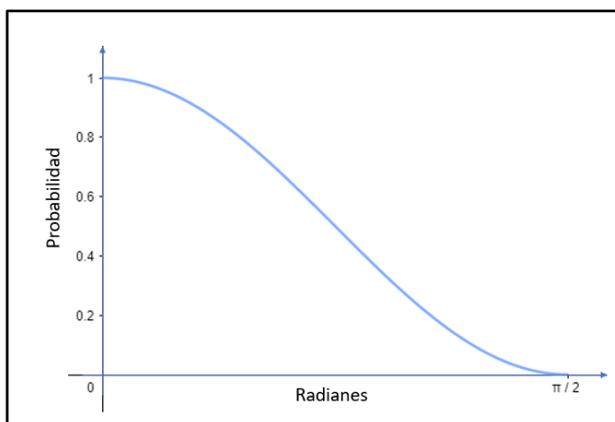


*Nota:* Adaptado de (Padilla et al., 2012).

El segundo caso, pertenece a la función coseno en el rango de 0 a  $\pi/2$ , en donde la probabilidad de ocurrencia es inversamente proporcional al evento estudiado como se indica en la Figura 7.

**Figura 7.**

*Segundo Caso de Lógica Difusa*

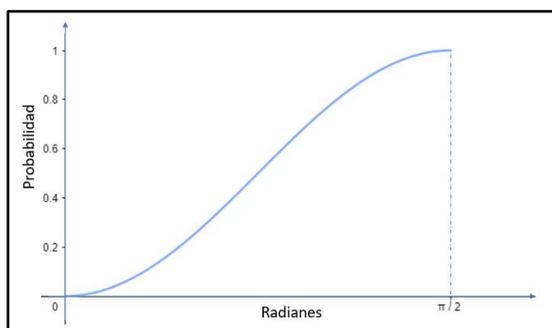


*Nota:* Tomado de (Padilla et al., 2012).

El tercer caso, pertenece a la función seno en el rango de 0  $\pi/2$ , en donde la probabilidad de ocurrencia es directamente proporcional al evento estudiado, como se indica en la Figura 8.

**Figura 8.**

*Tercer Caso de Lógica Difusa*



*Nota:* Tomado de (Padilla et al., 2012).

**Generación de Modelos de Lógica Difusa.** Uno de los requisitos para aplicar la Lógica Difusa es que las variables utilizadas se encuentren en el mismo rango de valores, es decir

estandarizadas (Salcedo et al., 2017). Las funciones en las que se asume un rango de probabilidades se encuentran de 0 a 100%, 5% a 95%, y 10% a 90% de probabilidad como se muestra en la Tabla 6 (Padilla et al., 2012).

**Tabla 6.**

*Rango de Probabilidad*

Modelo	Rango de Probabilidad	Ecuación de Normalización	Ecuación de Probabilidad
Modelo 1	0% - 100%	$N = \frac{V_o - V_{min}}{V_{max} - V_{min}}$	$P = \text{sen} \left( \frac{\pi}{2} * N \right)$ $P = \text{cos} \left( \frac{\pi}{2} * N \right)$
Modelo 2	5% - 95%	$N = 0.05 + \frac{0.9}{V_{max} - V_{min}} * (V_o - V_{min})$ $N = 0.95 - \frac{0.9}{V_{max} - V_{min}} * (V_o - V_{min})$	$P = \text{sen} \left( \frac{\pi}{2} * N \right)$ $P = \text{cos} \left( \frac{\pi}{2} * N \right)$
Modelo 3	10% - 90%	$N = 0.1 + \frac{0.8}{V_{max} - V_{min}} * (V_o - V_{min})$ $N = 0.9 - \frac{0.8}{V_{max} - V_{min}} * (V_o - V_{min})$	$P = \text{sen} \left( \frac{\pi}{2} * N \right)$ $P = \text{cos} \left( \frac{\pi}{2} * N \right)$

*Nota:* Adaptado de (Padilla et al., 2012).

La integración de la lógica difusa con los SIG en una estructura de toma de decisiones se ha utilizado para diferentes propósitos en estudios ambientales, incluida la gestión del riesgo de desastres geotécnicos, análisis del paisaje, la planificación forestal, y más concretamente, la modelización del riesgo de incendios forestales (Juvanhol et al., 2021). En cualquiera de estas situaciones, se encuentran involucradas más de dos variables, es por ello que, como se observa en la Ecuación 4, el modelo de probabilidad corresponde al promedio de todas las probabilidades de las variables individuales (Salcedo et al., 2017).

$$P_t = \frac{PV_1 + PV_2 + PV_3 + \dots + PV_n}{n} \quad (4)$$

Donde:

P<sub>t</sub> = Probabilidad total

PV<sub>1</sub>...PV<sub>n</sub> = Probabilidades individuales obtenidas mediante operadores difusos

n = Número de variables

**Prueba de Ajuste del Modelo.** El cálculo de los ajustes según Salcedo et al. (2017), se basa en la desviación estándar de los mapas resultantes, en donde se sabe que la desviación estándar es una medida de dispersión que indica en que cantidad están alejados los valores respecto a su media, de modo que, es considerado útil para buscar la probabilidad de que un evento se lleve a cabo. Los ajustes realizados en los procesos SIG, cumplen la relación presentada en la Ecuación 5.

$$D = 1 - \sigma \quad (5)$$

Donde:

D = Ajuste

σ = Desviación estándar de los mapas resultantes

### ***Evaluación Multicriterio***

Los métodos de evaluación se basan en la ponderación de variables y criterios para generar bases de datos geográficos y mapas temáticos que permitan potenciar los procesos de planificación (Aguilar et al., 2010). Según Eastman (1987), la evaluación multicriterio es un proceso metodológico para seleccionar y combinar criterios, llegando a una evaluación particular con el objetivo de tomar decisiones. Existen dos categorías: la primera que se relaciona con los métodos de decisión multiobjetivo, en donde su resultado son alternativas infinitas que se generan a partir de valores infinitos, y el segundo es el método discreto en

donde sus soluciones son finitas como por ejemplo el proceso analítico jerárquico (AHP) (Berumen y Llamazares, 2007).

**Proceso Analítico Jerárquico (AHP).** Esta técnica integra los procesos de calificación de alternativas y agregación para encontrar las alternativas más relevantes, misma que se emplea para clasificar un conjunto de alternativas o para seleccionar las mejores de un conjunto de alternativas, en donde se establecen los pesos de importancia a asociar a los criterios (Ramanathan, 2004). La escala fundamental de números absolutos (Tabla 7) diseñada por Saaty (1987), permite realizar las comparaciones en base a una escala de números que indica la importancia de un criterio con respecto al otro y de esta manera se genera la matriz de comparación por pares.

**Tabla 7.**

*Escala Fundamental de Números Absolutos*

<b>Intensidad de importancia en una escala absoluta</b>	<b>Definición</b>	<b>Explicación</b>
1	Igual Importancia	Dos actividades contribuyen igualmente al objetivo
3	Importancia moderada de uno sobre otro	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre otra
5	Importancia esencial o fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad frente a otra.
7	Importancia muy fuerte	Una actividad se ve fuertemente favorecida y su dominio se demuestra en la práctica.

9	Extrema importancia	La evidencia que favorece una actividad sobre otra es del orden de afirmación más alto posible.
2, 4, 6, 8	Valores Intermedios	Cuando es necesario
Recíprocos	Si la actividad i tiene asignado uno de los números anteriores en comparación con la actividad j, entonces j tiene el valor recíproco en comparación con i.	---

*Nota:* Tomado de (Saaty, 1987).

La matriz de pesos ( $W$ ) (Ecuación 6), es el resultado del promedio de las filas de la matriz comparación por pares normalizada.

$$W = \begin{pmatrix} w1 \\ w2 \\ \vdots \\ w \end{pmatrix} \quad (6)$$

**Cálculo de consistencia.** El cálculo de consistencia se determina a partir de la matriz de pesos y la matriz de la sumatoria de columnas de la matriz de comparación por pares ( $B$ ) (Ecuación 7) (Saaty, 2001).

$$B = \left( \sum_{n=1}^n a1 \quad \sum_{n=1}^n a2 \quad \dots \quad \sum_{n=1}^n a \right) \quad (7)$$

El máximo vector propio de la matriz pareada ( $\lambda$ ) es determinado por la Ecuación 8:

$$\lambda = B * W \quad (8)$$

Donde:

W = Matriz de pesos

B = Matriz de la suma de los elementos de cada una de las columnas de la matriz de comparación pareada.

Posteriormente se determina el índice de consistencia mediante la Ecuación 9, en donde el valor calculado es comparado con el valor de la Tabla 8.

$$C. I. = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (9)$$

**Tabla 8.**

*Índice Fundamental*

Tamaño de la Matriz (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice de consistencia aleatorio	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

*Nota: Tomado de (Saaty, 1987).*

**Relación de consistencia.** La Ecuación 10 permite determinar el valor de la relación de consistencia (C.R).

$$C. R = \frac{C. I}{C. I \text{ aleatorio}} \quad (10)$$

La relación de consistencia aceptables para matrices de tamaño: 3 menor al 5%, 4 menor al 9% y matrices de tamaños mayores de 5 la relación aceptable tiene que ser menor a 10%, caso contrario los juicios de la matriz de comparación por pares debe realizarse nuevamente (Saaty, 2001).

### **Sensores Remotos**

Con los avances de la tecnología en el estudio de Incendios forestales, se ha optado a los sensores remotos como una herramienta óptima para modelar zonas de riesgo, gracias a su

técnica rápida, no invasiva y de gran cobertura, permitiendo generar análisis espaciales y tomar decisiones eficientes (Enoh et al., 2021).

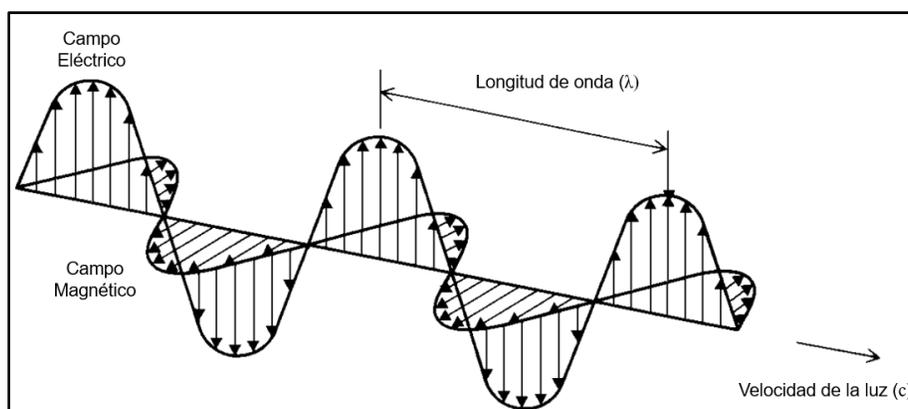
Según Chuvieco (2008), el uso de los sensores remotos corresponden a técnicas de adquisición de forma remota y tratamiento de datos de la superficie de la tierra, capturados a través de sensores instalados en plataformas satelitales. Los sensores remotos se han convertido en una herramienta eficaz para estudios sistemáticos, análisis y gestión de los recursos naturales (tierra, suelo, agua, bosques, montañas), inundaciones, sequía y cambio de los accidentes geográfico (Shandilya et al., 2013)

### **Radiación Electromagnética**

La radiación electromagnética son las ondas que se producen por aceleración u oscilación de cargas eléctricas, en donde la manera en que se propaga la energía al interactuar con la materia, alcanza una velocidad de  $3 \times 10^8$  m/s en el espacio libre (Pisharoty, 1983). Como se observa en la Ecuación 11, según Vispute (2022), los principales parámetros que definen el movimiento de una onda electromagnética son la longitud de onda ( $\lambda$ ), la frecuencia ( $\nu$ ) y la velocidad ( $c$ ).

$$c = \nu\lambda \quad (11)$$

Por otra parte, la onda electromagnética está formada por dos componentes, el campo eléctrico E y el campo magnético M, los cuales, son perpendiculares a la dirección de propagación. Por lo cual, la interacción entre las ondas y la materia depende especialmente de las propiedades magnéticas como eléctricas de la materia como se indica en la Figura 8 (Sivakumar et al., 2003). De acuerdo a su longitud de onda se dividen en rangos espectrales o también conocido como espectro electromagnético (Navalgund, 2001).

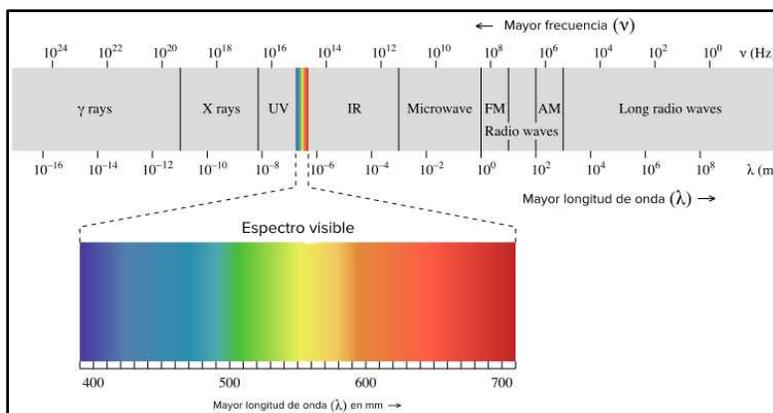
**Figura 9.****Ondas Electromagnéticas**

*Nota:* Tomado de (Sivakumar et al., 2003).

**Espectro Electromagnético**

El espectro electromagnético está conformado por diferentes longitudes de onda, abarca desde longitudes cortas como son los rayos gamma hasta longitudes más largas como son microondas y de radio, en donde, el espectro electromagnético se divide en dos regiones de longitud de onda, las cuales son, óptica y microondas (Vispute, 2022).

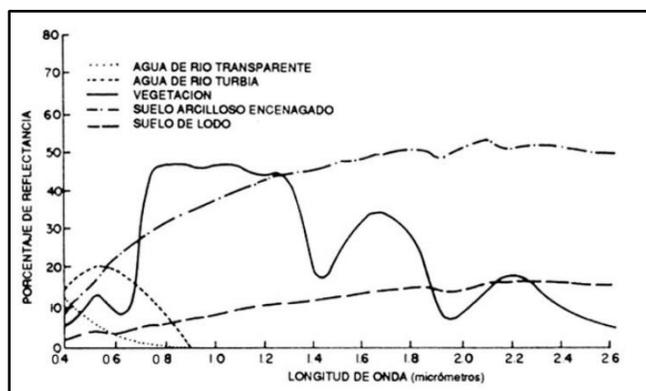
La región óptica en teledetección, conlleva a la energía emitida y reflejada por la tierra, las longitudes de onda que abarca oscilan entre 0,4 y 14  $\mu\text{m}$ , y en la región microondas en teledetección, las longitudes abarcan ondas mucho más largas, que pueden oscilar entre 1  $\text{mm}$  y 1  $\text{m}$ , en donde para la detección de esta última región se utilizan varias herramientas y tecnologías, especialmente para detectar microondas, infrarrojo térmico, medio y cercano (Turner et al., 2003). En teledetección, aproximadamente todo el rango del espectro electromagnético es útil, ya que cada una de las bandas brinda información importante sobre el objeto en estudio, estas regiones como se observa en la Figura 10, se examinan en orden decreciente de frecuencia y orden creciente de longitud de onda (Jong et al., 2004).

**Figura 10.*****Espectro Electromagnético***

*Nota:* Tomado de (Khan Academy, 2022).

**Firmas Espectrales**

Todos los organismos del planeta poseen diferentes características que los hace únicos, una de estas características es la emisión de radiación. Las firmas espectrales representan el modo con el que una determinada cubierta refleja o emite energía en distintas longitudes de onda, en donde, estas curvas tienden a presentar una respuesta uniforme en distintas longitudes de onda, mientras otras ofrecen un comportamiento mucho más selectivo como se observa en la Figura 11 (Villegas, 2008).

**Figura 11.*****Firmas Espectrales***

*Nota:* Tomado de (Tarralba, 2013).

La firma espectral de la vegetación se caracteriza por presentar contrastes claros en el espectro de la banda del infrarrojo cercano (NIR) y del rojo visible, por lo mencionado la vegetación sana posee baja reflectividad en la banda roja en un rango de 600 a 700nm y alta en el NIR en un rango de 800 a 1200nm, en cambio, si existen bajos valores de reflectancia en el NIR la vegetación estará sujeta a enfermedades o existirá un importante déficit de humedad (Alonso et al., 1999).

### **Tipos de Resolución en Sensores Remotos**

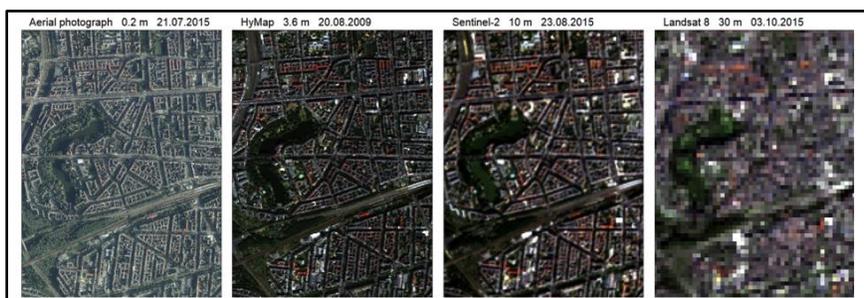
Chuvieco (2008), define a la resolución de un sensor como la habilidad para discriminar información detallada, dependiendo del efecto combinado de sus distintos componentes, en este sentido, el concepto de resolución implica diversas manifestaciones como la espacial, espectral, radiométrica y temporal, mismas que se detallan a continuación.

#### ***Resolución Espacial***

La resolución espacial de un sensor de imágenes determina el tamaño del objeto más pequeño que puede representar de forma coherente, en donde, para detectar un elemento del terreno, debe tener una dimensión mayor o igual al tamaño del píxel. Como se observa en la Figura 12, la resolución espacial depende del tipo de sensor que captura la información (Ose et al., 2016).

### **Figura 12.**

#### ***Comparación de Resoluciones Espaciales***



*Nota:* Comparación de diferentes resoluciones espaciales en el entorno construido utilizando fotografía aérea (0,2 m), HyMap (3,6 m), Sentinel-2 (10 m) y Landsat-8 (30 m) (Small et al., 2018).

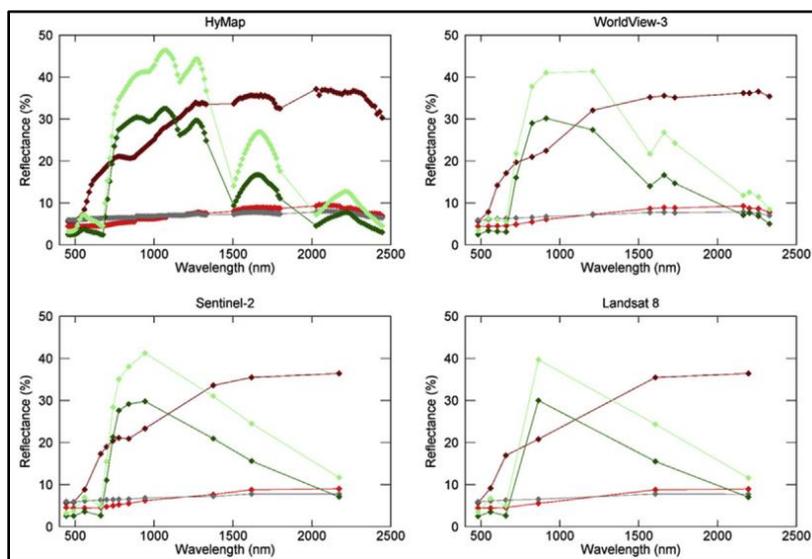
### ***Resolución Espectral***

La resolución espectral describe la capacidad de un sensor para definir intervalos finos de longitud de onda. Cuanto mayor sea la resolución espectral, más estrecho será el ancho de banda espectral (Abdullah y Kalyankar, 2013).

Según Lora (2016), si una plataforma tiene alrededor de 4 a 20 bandas, se denominan multispectrales, y si el número de bandas espectrales es de cientos, se denominan datos hiperespectrales. En la Figura 13, se representa los datos espectrales captados por diferentes sensores multispectrales (WorldView-3: 15 bandas, Sentinel 2: 12 bandas y Landsat 8: 6 bandas) e hiperespectrales (HyMap: 114 bandas).

**Figura 13.**

### ***Medición de Datos Espectrales***



*Nota:* Tomado de (Small et al., 2018).

### ***Resolución Radiométrica***

La resolución radiométrica determina la fidelidad con la que un sensor puede distinguir diferencias de reflectancia, es decir, la asociación de la sensibilidad del sensor con la reflectancia entrante (Huete, 2004).

Por ejemplo, las imágenes en blanco y negro de una cámara digital son de 8 bits, lo que significa que la información se representa con un valor de 0-255 o 256 en total. En cambio, una imagen a color se representa mediante 3 canales: rojo, verde y azul, en donde cada canal tiene 8 bits, lo que equivale a 24 bits de información (Manickam, 2021).

### ***Resolución Temporal***

La resolución temporal se define como la cantidad de tiempo necesaria para volver a visitar y adquirir datos exactamente en la misma ubicación. Cuando se aplica a la detección remota, esta cantidad de tiempo depende de las características orbitales de la plataforma del sensor, así como de las características del sensor (Théau, 2008).

Una característica importante para maximizar la resolución temporal del sensor es que siga una órbita heliosincrónica debido a que sigue la iluminación del sol y permite la adquisición de imágenes a la misma hora del día para una misma ubicación (Maglione, 2016).

### **Programa Copernicus**

Dentro de las plataformas que permiten obtener información satelital de forma accesible y gratuita se encuentra la USGS con datos satelitales del Programa Copernicus, desarrollado en 1998, con el fin de proporcionar datos e información actualizada y precisa, para analizar, mitigar y estudiar el cambio climático alrededor del mundo, de esta forma varios satélites en el espacio recopilan datos mediante sistemas de medición en el aire, el mar y la tierra. Al procesar estos datos es posible obtener información para prevención de incendios e inundaciones, estudios de polución o análisis de agricultura de precisión (Geoinnova, 2018). Como se observa en la Tabla 9, según la European Space Agency [ESA] (s.f) el Programa Copérnico está conformado por seis misiones que se ocupan de la vigilancia de mar, aire y tierra.

**Tabla 9.***Misiones del Programa Copérnico*

<b>Misión</b>	<b>Características</b>
Sentinel-1	Constelación de dos satélites en órbita polar, que operan día y noche generando imágenes de radar de apertura sintética en banda C.
Sentinel-2	Constelación de dos satélites de órbita polar colocados en la misma órbita sincrónica con el sol. Su objetivo es monitorear la variabilidad en las condiciones de la superficie terrestre.
Sentinel-3	Mide la topografía de la superficie del mar, la temperatura de la superficie del mar y la tierra, y el color de la superficie del océano y la tierra.
Sentinel-4	Monitorea los gases traza y aerosoles.
Sentinel-5	Monitorea la calidad del aire y la interacción composición-clima en donde sus principales productos de datos son O <sub>3</sub> NO <sub>2</sub> y aerosoles.
Sentinel-6	Monitorea mediante altimetría de radar para extender las mediciones de altura de la superficie del mar

*Nota:* Adaptado de (European Space Agency [ESA], s.f.)

**Sentinel-2**

Sentinel-2 consta de dos satélites idénticos, 2A y 2B, que utilizan sensores similares y vuelan en la misma órbita, con una diferencia de fase de 180 grados, disminuyendo así los períodos de repetición y revisita (Jiang et al., 2020). Cada uno de los satélites alberga un instrumento multispectral que tiene como objetivo medir la radiación reflejada por la tierra a

través de la atmósfera, misma información es captada en 13 bandas espectrales que van desde el infrarrojo cercano y visible hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR) como se describe en la Tabla 10 (Gatti y Galoppo, 2018).

Entorno a sus características, el sistema utiliza 12 detectores ópticos cuya configuración da como resultado un ancho de banda de cobertura terrestre de 290 km, una resolución radiométrica de 12 bits, lo que permite obtener una imagen adquirida con un rango de 0 a 4095 valores de intensidad de luz o píxeles y finalmente, una resolución temporal de 5 días en pleno funcionamiento de los dos satélites (Grégory y Hy, 2016).

**Tabla 10.**

*Características de las bandas de Sentinel-2*

<b>Banda</b>	<b>Descripción</b>	<b>Longitud de Onda (µm)</b>	<b>Resolución (m)</b>
Banda 1	Coastal aerosol	0.433 - 0.453	60
Banda 2	Blue	0.458 - 0.523	10
Banda 3	Green	0.543 - 0.578	10
Banda 4	Red	0.650 - 0.680	10
Banda 5	Vegetation Red Edge	0.698 - 0.713	20
Banda 6	Vegetation Red Edge	0.733 - 0.748	20
Banda 7	Vegetation Red Edge	0.773 - 0.793	20
Banda 8	NIR	0.785 - 0.900	10
Banda 8A	Narrow NIR	0.855 - 0.875	20
Banda 9	Water vapour	0.935 - 0.955	60
Banda 10	Swir-Cirrus	1.365 - 1.385	60
Banda 11	Swir-1	1.565 - 1.655	20
Banda 12	Swir-2	2.100 - 2.280	20

*Nota:* Tomado de (ArcGIS, 2020).

## **Correcciones de Imágenes Satelitales**

Los datos satelitales obtenidos de diversas plataformas necesitan diversas correcciones, debido a las condiciones de los sensores. Estos preprocesamientos también conocidos como restauración o rectificación de imágenes satelitales permite corregir las distorsiones o variaciones en condiciones atmosféricas, respuesta del sensor, ruido, variación de la iluminación de la escena o geometría de visualización, a partir de correcciones atmosféricas, topográficas, radiométricas o geométricas, dependiendo del sensor utilizado para la adquisición de datos (Government of Canada, 2015). Cabe mencionar que es indispensable eliminar o minimizar la variación de efectos negativos asociados a la información espectral para obtener datos satelitales confiables.

### ***Corrección Atmosférica***

La atmósfera es un medio que está conformado por una variedad de gases y aerosoles que se encuentra entre los sensores de los satélites y la superficie de la Tierra. Sirve de canal de transmisión de las ondas electromagnéticas desde la atmósfera a la superficie de la Tierra y desde la superficie de la Tierra a los sensores (Liang y Wang, 2020). La eliminación de la perturbación atmosférica introducida en la señal registrada por los sensores de teledetección es uno de los elementos clave para obtener productos geo/biofísicos precisos, por lo que, la corrección atmosférica es esencial en el procesamiento de datos satelitales para reducir los efectos atmosféricos y de iluminación (Jiménez et al., 2010).

Las imágenes satelitales de la Tierra registradas por instrumentos ópticos pueden contener neblina y áreas de nubes, por esta razón la información del suelo por debajo de las regiones nubosas no se puede recuperar con sensores ópticos pero la neblina hasta un cierto espesor óptico se puede eliminar en imágenes multiespectrales, permitiendo una mejor evaluación de las imágenes satelitales, especialmente para diferentes aplicaciones como detección de cambios, clasificación, estimación del rendimiento de cultivos y monitoreo ambiental (Richter, 1996).

Según Hadjimitsis et al., (2010) parte del brillo registrado en cualquier ubicación de píxel en una imagen de detección remota se debe a la reflectancia del objetivo de interés y el resto se deriva del brillo de la atmósfera misma. Según (Chávez, 1996), esta interferencia puede ser corregida a partir de la técnica de Sustracción de Objetos Oscuros (DOS), en donde se asume que dentro de la imagen algunos píxeles poseen valores de reflectancia muy bajos, por lo que cualquier reflectancia aparente debería ser producto de la dispersión atmosférica. Como se observa en la Ecuación 12, según (Sobrino et al., 2004), esta técnica de corrección atmosférica permite determinar la reflectancia de la superficie terrestre corregida.

$$\rho = \frac{\pi * (L_{\lambda} - L_p) * d^2}{T_v((ESUN_{\lambda} * \cos\theta_s * T_s) + E_{down})} \quad (12)$$

Donde:

$L_{\lambda}$  = Radiancia espectral en la apertura del sensor

$L_p$  = Radiancia atmosférica debida a la dispersión

$d$  = Distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas

$ESUN_{\lambda}$  = Irradiancias solares exo-atmosféricas medias

$\theta_s$  = Ángulo cenital solar en grados, que es igual a  $\theta_s = 90^\circ - \theta_e$ , donde  $\theta_e$  es el ángulo de elevación del Sol

$T_v$  = Transmitancia atmosférica en la dirección de visualización

$T_s$  = Transmitancia atmosférica en la dirección de la iluminación

$E_{down}$  = Irradiancia difusa descendente

Esta técnica es simplificada según (Moran et al., 1992), como indica en la Ecuación 13, mediante las siguientes suposiciones:  $T_v = 1$ ,  $T_z = 1$ ,  $E_{down} = 0$ , por lo tanto, reflectancia de la superficie terrestre corregida resultante viene dada por:

$$\rho = \frac{\pi * (L_{\lambda} - L_p) * d^2}{(ESUN_{\lambda} * \cos\theta_s)} \quad (13)$$

### **Corrección Topográfica**

En las zonas montañosas hay una fuerte influencia de la topografía en la señal registrada por los sensores ópticos, es decir, para la misma superficie cubierta, las pendientes orientadas hacia el sol aparecerán más brillantes y hacia el lado contrario aparecerán más oscuras, por lo que, este comportamiento genera problemas para una posterior clasificación de escenas y evaluación temática (Richter et al., 2009). Dado que la intensidad de la iluminación sobre la superficie depende de la orientación de la superficie con respecto al sol, los diferentes ángulos de inclinación y aspecto inducen ángulos de iluminación variables y, por lo tanto, diversos valores de reflectancia (Shepherd y Dymond, 2003).

Dependiendo de la topografía, los valores de reflectancia dentro de un tipo de cobertura terrestre pueden variar dando como resultado valores de reflectancia más bajos en la sombra y valores más altos en el sol para la misma clase de cobertura terrestre, que genera posibles clasificaciones de cobertura erróneas (Füreder, 2010). Como se indica en la Ecuación 14, la técnica para describir la iluminación de la topografía se basa en un modelo de elevación digital (DEM) mismo que permite realizar la corrección topográfica reparando las variaciones de iluminación solar (Ekstrand, 1996).

$$\cos i = \cos e * \cos z + \sin e * \sin z * \cos(a - a') \quad (14)$$

Donde:

$\cos i$  = iluminación

$i$  = ángulo de incidencia solar local

$e$  = ángulo de pendiente

$z$  = cenit solar

$a$  = ángulo solar ángulo de acimut

$a'$  = ángulo de aspecto

El método de corrección denominado factor c modela la irradiancia difusa y compensar los efectos de sobrecorrección de la corrección del coseno como se indica en la Ecuación 15 y 16 (Twele y Erasmi, 2005).

$$L_h = L_t * \frac{\cos z + c}{\cos i + c} \quad (15)$$

Donde:

$$c = \frac{b}{m}; L_t = m * \cos i + b \quad (16)$$

$L_h$  = reflectancia de una superficie horizontal

$L_T$  = Reflectancia de una superficie inclinada

$z$  = ángulo solar zenit

$i$  = ángulo local de incidencia solar

$m$  = gradiente de regresión lineal

$b$  = intercepto de regresión lineal

### **Corrección Radiométrica**

La consistencia radiométrica entre objetivos terrestres en imágenes multitemporales es difícil de mantener debido a los cambios en las características del sensor, condiciones atmosféricas, ángulo solar y el ángulo de visión del sensor. Por lo tanto, las correcciones radiométricas a menudo se realizan para reducir cualquiera o todas las influencias anteriores y aumentar la sensibilidad al cambio del paisaje (Chen et al., 2005). Las correcciones radiométricas modifican los niveles digitales originales con el objetivo de acercarlos a un valor real, permitiendo la restauración de líneas o píxeles perdidos y corrección del bandeo de la imagen (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés [INVEMAR], 2003).

Los errores radiométricos basados en píxeles se generan por un mal funcionamiento del sensor, ocasionando que desaparezcan píxeles o aparezcan líneas en la visualización de la

imagen. Para su corrección se puede considerar reemplazar los valores de los píxeles perdidos por los valores de los píxeles vecinos, o también es posible incorporar una nueva línea resultado del promedio de los valores de los píxeles continuos a la línea con deformaciones (Rodríguez y Hernández, 2019). Otro error es el ocasionado por el bandeo mismo que se genera en algunas imágenes obtenidas por equipos de barrido secuencial, en donde, se observa un bandeo de la imagen, perceptible en zonas de baja radiancia, especialmente por la mala calibración de los sensores. Para corregir el bandeo es necesario corregir los histogramas de cada sensor mediante cálculos de coeficientes y correlaciones entre los sensores, tomando como referencia una imagen que no posea este error (Chuvieco, 1995).

### ***Corrección Geométrica***

Las distorsiones geométricas se manifiestan como errores en la posición de un píxel en relación con otros píxeles en la escena y con respecto a su posición absoluta dentro de algún mapa definido (Sreenivas y Narasimha, 2011). En consecuencia, la integración de datos ráster y vector para aplicaciones cartográficas, como la forestal, requiere un procesamiento geométrico adaptado a la naturaleza y características de los datos para conservar la mejor información de cada imagen (Toutin, 2003). Las imágenes provenientes de sensores remotos pueden tener geometrías distorsionadas por diversos factores como las distorsiones panorámicas, orientación de la plataforma, rotación de la tierra, error de instrumento o inestabilidad de la plataforma (Green et al., 2000). Las correcciones geométricas se realizan para corregir la incoherencia entre las coordenadas de ubicación de los datos de imagen sin procesar y las coordenadas de ubicación reales en el terreno siendo necesarias para preprocesar los datos de detección remota y eliminar la distorsión geométrica para que los elementos individuales de la imagen (píxeles) estén en sus ubicaciones de mapa planimétricas (x, y) adecuadas (Dave et al., 2015).

Según Santhosh y Renuka (2011) hay cuatro niveles diferentes de corrección geométrica de imágenes de sensores remotos: el primero es el registro que consiste en la

alineación de una imagen con otra imagen de la misma zona. El siguiente es la rectificación que se basa en la alineación de la imagen a un mapa para que la imagen sea planimétrica al igual que el mapa. El tercer nivel es la Geo-codificación que se fundamenta en el uso de coordenadas y tamaños de píxel estándar permitiendo la superposición conveniente de imágenes de diferentes sensores y mapas en un SIG. Finalmente, la Orto-rectificación consiste en la corrección de la imagen, píxel por píxel para evitar la distorsión topográfica en donde el resultado de cada píxel parece estar viendo la tierra directamente desde arriba, es decir, la imagen está en una proyección ortográfica estricta.

### **Clasificación de Imágenes Satelitales**

Al realizar las respectivas correcciones dentro de la información satelital, es posible obtener información confiable de los procesos resultantes de clasificación de imágenes. Este proceso de clasificación es parte importante de la detección remota, el análisis de imágenes y el reconocimiento de patrones, el cual se basa en las propiedades de la reflectancia espectral de la superficie terrestre. En este sentido, la clasificación de imágenes se define como el proceso de categorización de píxeles en una imagen o datos satelitales para obtener un conjunto determinado de etiquetas o temas de cobertura terrestre (Sowmya et al., 2017).

Según Mohammed y Khamees (2021), las técnicas de clasificación se pueden definir en dos tipos significativos: clasificación supervisada y no supervisada, mismos que consisten en extraer los reflejos espectrales de las imágenes satelitales para analizar información sobre la cobertura del suelo, en donde, se reconocen a una clase tópica caracterizada como agua, árboles, edificio sin árboles, edificios con árboles, terrenos baldíos, entre otros. Este procedimiento permite extraer datos espaciales, para el estudio de varios tipos de vegetación como agricultura y silvicultura, además de estudiar el urbanismo e identificar los usos de la tierra en una determinada área (Abburu y Golla, 2015).

### **Clasificación Supervisada**

Asigna un píxel a los tipos de cobertura terrestre mediante la comparación de las propiedades de la firma espectral con las muestras de entrenamiento recopiladas en la escena, en donde, los píxeles homogéneos se asignan a estos segmentos de imagen espectralmente similares según el algoritmo de clasificación utilizado. Las imágenes satelitales se analizan utilizando sitios de muestra de entrenamiento representativos para los diversos tipos de cobertura terrestre presentes en la imagen satelital. Las áreas de entrenamiento se recopilan con visitas de campo y describen las características espectrales para cada tipo de cobertura terrestre (Mohamed, 2021).

### **Algoritmos de Clasificación Supervisada**

**Algoritmo de Máxima Verosimilitud.** Según Sathya (2017), la clasificación de máxima verosimilitud calcula la probabilidad de un píxel dado para cada clase y luego el píxel se asignará a una clase particular con la probabilidad más alta. Se utiliza para calcular la media y la matriz de covarianza de los conjuntos de entrenamiento y supone que los valores de los píxeles se distribuyen normalmente. Como se presenta en la Ecuación 17, los píxeles de entrada son asignados en función de la probabilidad de que el píxel pertenezca a esa clase en particular.

$$Lk(X) = \frac{1}{2\pi^{\frac{n}{2}} |\Sigma_k|^{\frac{1}{2}}} \exp \left[ -\frac{1}{2} (X - Mk)^T \Sigma_k^{-1} (X - Mk) \right] \quad (17)$$

Donde:

X= indica los datos de imagen de n bandas

n = número de bandas

T = función de transposición

Lk (X) representa la probabilidad de que X pertenezca a la clase k

Mk es el vector medio de la clase k

$k$  es la matriz de covarianza de la varianza de la clase  $k$

$\Sigma_k$  determinante de la matriz de covarianza de la clase  $k$

$\Sigma_k^{-1}(X - Mk)$  es la matriz de covarianza inversa

**Algoritmo de Distancia Mínima.** Específicamente, en la clasificación de distancia mínima, una muestra (es decir, un grupo de vectores) se clasifica en la clase cuya distribución conocida o estimada se asemeja más a la distribución estimada de la muestra que se va a clasificar. La medida de semejanza es una medida de distancia en el espacio de las funciones de distribución (Wacker y Landgrebe, 1972).

Según Jog y Dixit (2016), las siguientes distancias se utilizan en el proceso de clasificador de distancia mínima:

**Distancia Euclidiana.** Se representa en la Ecuación 18. Es utilizada cuando las clases de población tienen varianzas diferentes.

$$d^2 = (X - Mk)^T (X - Mk) \quad (18)$$

**Distancia Euclidiana Normalizada.** Se representa en la Ecuación 19. En caso de variación diferente, el índice de similitud es proporcional a la distancia euclidiana normalizada.

$$d^2 = (X - Mk)^T \sigma_k^{-1} (X - Mk) \quad (19)$$

Donde:

$\sigma_k^{-1}$  es la varianza de la matriz

**Distancia de Mahalanobis.** Se representa en la Ecuación 20. La distancia de Mahalanobis con matriz de varianza-covarianza se emplea cuando los ejes en el espacio de características están correlacionados.

$$d^2 = (X - Mk)^T \sum_k^{-1} (X - Mk) \quad (20)$$

**Algoritmo Paralelepípedo.** Es un método de clasificación simple basado en una regla de decisión para datos multiespectrales. Los límites de decisión para el algoritmo

paralelepípedo se forman en base a un umbral de desviación estándar que se elige de la media de cada clase seleccionada en el conjunto de entrenamiento. Un píxel se clasifica en función de si el valor de ese píxel se encuentra por encima del valor umbral inferior y por debajo del valor umbral superior del intervalo (Sathya, 2017). Como se indica en la Ecuación 21, la media y la desviación estándar forman límites de decisión o intervalos para asignar los píxeles.

$$M_t - S_t \leq D_v \leq M_t + S_t \quad (21)$$

Donde:

$M_t$  = valor medio

$D_v$  = valor digital

$S_t$  = desviación estándar clase.

**Algoritmo de Máquina de Vectores de Soporte (SVM).** Es una técnica de aprendizaje estadístico no paramétrico supervisado, por lo tanto, no hay suposiciones sobre la distribución de datos subyacente, mismo que se presenta con un conjunto de instancias de datos etiquetados cuyo objetivo es encontrar un hiperplano (límite de decisión que minimiza las clasificaciones erróneas) que separe el conjunto de datos en un número discreto predefinido de clases de manera consistente con los ejemplos de entrenamiento (Mountrakis et al., 2011).

### ***Matriz de Confusión***

Una matriz de confusión contiene información sobre clasificaciones reales y previstas realizadas por un sistema de clasificación. El píxel que se ha categorizado a partir de la imagen se compara con los datos de campo, en donde el resultado de evaluación de precisión normalmente proporciona a los usuarios una precisión general del mapa y la precisión de cada clase en el mapa (Hasmedi et al., 2009). El porcentaje de precisión general se calcula mediante la Ecuación 22 que se presenta a continuación:

$$\text{Precisión Global} = \frac{\text{Número total de muestras correctas}}{\text{Número total de muestras}} * 100 \quad (22)$$

### **Índice de Concordancia Kappa**

El análisis Kappa es una técnica multivariante discreta que se utiliza con la evaluación de la precisión global. Simboliza la concordancia entre los datos de referencia del mapa de clasificación y los datos clasificados (Radhika et al., 2018). El índice de concordancia kappa es calculado a partir de la Ecuación 23 que se presenta a continuación:

$$\text{Kappa} = \frac{\sum_{i=1}^k x_{ii} - \sum_{i=1}^k (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^k (x_{i+} * x_{+i})} * 100 \quad (23)$$

Donde:

k = número de fila en la matriz

N = número total de observaciones

X<sub>+i</sub> = totales marginales de la columna 'i'

X<sub>i+</sub> = totales marginales de la fila 'i'

X<sub>ii</sub> = número de observaciones en la fila 'i'

Cabe mencionar que el coeficiente Kappa mide la proporción de concordancia después de eliminar las concordancias aleatorias de las consideraciones. En contraste con la precisión general, la relación entre la suma de los valores diagonales y el número total de celdas en la matriz, el coeficiente Kappa también tiene en cuenta los elementos no diagonales (Banko, 1998). Según López y Pita (2001) a partir de la Tabla 11, se puede interpretar los resultados del índice Kappa.

### **Tabla 11.**

*Escala de Comparación del Índice Kappa*

---

<b>Valor de Kappa</b>	<b>Fuerza de Concordancia</b>
-----------------------	-------------------------------

---

<20%	Pobre
21% - 40%	Débil
41% - 60%	Moderada
61% - 80%	Buena
81% - 100%	Muy buena

*Nota:* Tomado de (López y Pita, 2001).

### ***Clasificación no Supervisada***

Según Olaode et al. (2014), la clasificación no supervisada es el proceso mediante el cual cada imagen en un conjunto de datos se identifica como miembro de una de las categorías inherentes presentes en la colección de imágenes sin el uso de muestras de entrenamiento etiquetadas. Esto implica que, el algoritmo se presente solo con los datos de entrada y se construya un modelo para ajustarse a las observaciones. Los datos de entrada se tratan como variables aleatorias y se identifican patrones entre ellos para formar agrupaciones (Malladi, 2017). Algunos de los algoritmos comunes de agrupación de imágenes en clasificación no supervisada son K-means e ISODATA.

### ***Algoritmos de Clasificación no Supervisada***

**Algoritmo ISODATA.** Es un algoritmo de agrupamiento que utiliza un proceso iterativo para separar los píxeles de la imagen en clústeres espectralmente similares en función de su posición y espacio espectral dimensional (Enderle y Weih, 2005).

**Algoritmo K-means.** El algoritmo organiza un conjunto de observaciones que se representan como vectores de características en grupos en función de su similitud. Su similitud, a su vez, se basa en una métrica de distancia de k centroides (siendo el centroide el centro de un grupo basado en la media de los miembros de ese grupo) (Jones, 2017).

### **Índices Espectrales**

Por medio de la corrección de imágenes satelitales, es posible realizar cálculos matemáticos mediante sus bandas espectrales, mismos que arrojaran datos confiables al

momento de calcular diversos índices espectrales en un área determinada. Los índices espectrales son una de las técnicas más comunes utilizadas para mapear y monitorear datos espaciales provenientes de sensores remotos. Según Viswambharan y Lenhardt (2019), los índices espectrales son combinaciones de los valores de píxeles de dos o más bandas espectrales en una imagen multiespectral, en donde se resaltan los píxeles que muestran la abundancia relativa o la falta de un tipo de interés de cobertura terrestre en una imagen. Cabe mencionar que, en ambientes con vegetación, los índices espectrales se enfocan en enfatizar las características de la vegetación, por lo tanto, los índices suelen ser indicadores de características generales, como la cobertura vegetal, la salud de las plantas o cantidad de suelo expuesto.

Los índices de vegetación son utilizados como indicadores cuantitativos ecosistémicos. Gracias a sus datos indirectos es posible determinar la cantidad de energía absorbida, reflejada o irradiada por la vegetación según sus características ópticas al entrar en contacto con su superficie (Rodríguez y Bullock, 2013). Los índices de vegetación ampliamente usados en el estudio de incendios forestales mediante la aplicación de sensores remotos son:

### ***Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)***

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) ha sido ampliamente utilizado en la evaluación cuantitativa y monitoreo de la vegetación que cubren la superficie de un área de estudio. Este índice a su vez ayuda a describir la distribución espacial de las plantas y su estado de salud mediante la relación entre las bandas del infrarrojo cercano y el rojo visible (Alkatib, 2021).

Según Gessesse y Melesse (2019) el rango de valores del NDVI varían de  $-1$  a  $1$ , en donde, los valores negativos pertenecen a los cuerpos de agua, los valores cercanos a cero corresponden a rocas, arenas o superficies de concreto, valores positivos pertenecen a cultivos, arbustos, pastos y bosques, y valores positivos altos significan implicaciones más fuertes para el verdor vigoroso de la vegetación. Los valores de NDVI se calculan mediante la

diferencia entre la reflectancia de la banda del infrarrojo cercano (NIR) y la banda roja (RED) dividida por su suma como se indica en la Ecuación 24, misma que representa la relación entre los espectros solares y su reflexión.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (24)$$

Donde:

$P_{NIR}$  = Banda del infrarrojo cercano

$P_{RED}$  = Banda roja

### ***Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)***

El SAVI es un método mediante el cual los índices espectrales se pueden calibrar para que las variaciones del sustrato del suelo se normalicen efectivamente y no influyan en la medida de la vegetación. Este índice se desarrolló para minimizar las influencias del suelo en los espectros del dosel mediante la incorporación de un factor de ajuste del suelo L en el denominador de la ecuación del índice de vegetación de diferencia normalizada como se muestra en la Ecuación 25 (Qi et al., 1994). El factor de ajuste óptimo varía con la densidad de vegetación; sin embargo, un factor de ajuste de 0.5 reduce considerablemente el ruido suave en todo el rango de densidades de vegetación (A Huete, 1988).

$$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} (1 + L) \quad (25)$$

Donde:

$P_{NIR}$  = Banda del infrarrojo cercano

$P_{RED}$  = Banda roja

L = Factor de corrección

El factor de corrección oscila entre 0 para una cubierta vegetal muy alto y 1 para una cubierta vegetal muy baja. Gracias a este factor de ajuste es posible monitorear la densidad y

el vigor del crecimiento de la vegetación verde utilizando la reflectividad espectral de la radiación solar (Stefanov, 2004).

### ***Índice de Supervisión Ambiental Global (GEMI)***

Según Pinty y Verstraete (1992), el índice de supervisión ambiental global (GEMI) permite reducir los efectos relativos de perturbaciones atmosféricas indeseables, manteniendo la información sobre la cobertura vegetal. Este Índice refleja la capacidad de fotosíntesis de la vegetación verde, permitiendo monitorear su actividad y detectar cicatrices de quemaduras en áreas con poca vegetación (Cao et al., 2009). Según Koncsag y Dimen (2000) este índice retiene la información sobre la cobertura vegetal con menos anomalías o sin ellas, ayudando a minimizar los efectos atmosféricos a través de una combinación de reflexión no lineal de la banda roja como se muestra en la Ecuación 26.

$$GEMI = n(1 - 0.25n) - \frac{\rho_{RED} - 0.125}{1 - \rho_{RED}} \quad (26)$$

Dónde el coeficiente n tiene en cuenta las bandas reflejadas de rojo e infrarrojo cercano, como se muestra en la Ecuación 27.

$$n = \frac{2(\rho_{NIR}^2 - \rho_{RED}^2) + 1.5\rho_{NIR} + 0.5\rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + 0.5} \quad (27)$$

Donde

$\rho_{NIR}$  = Banda del infrarrojo cercano

$\rho_{RED}$  = Banda roja

### ***Índice Normalizado de Área Quemada (NBR)***

El índice de quemado normalizado (NBR) se formuló como un índice para detectar áreas quemadas presentado como un medio confiable para mapear la severidad del fuego. Se ha demostrado que esta técnica produce mediciones precisas de la gravedad de un incendio al observar los cambios de reflectancia en la vegetación (Barbosa et al., 2015). El NBR es particularmente sensible a los cambios en la vegetación viva, el contenido de humedad y

ciertas condiciones del suelo, ya que se puede determinar un aumento de la reflectancia de la banda SWIR, debido a la disminución de la absorción de agua por parte del dosel, seguido de una disminución en el NIR en las áreas quemadas (Nasery y Kaan, 2020).

Según Roldán et al. (2006), este índice integra las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y del infrarrojo de onda corta (SWIR) como se observa en la Ecuación 28, ya que presentan mejor contraste entre la vegetación sana fotosintética y la vegetación quemada.

$$NBR = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}} \quad (28)$$

Donde:

$P_{NIR}$  = Banda del infrarrojo cercano

$P_{SWIR}$  = Banda infrarroja de onda corta

### **Índice de Área Quemada (IAQ)**

El Índice de Área Quemada (IAQ) permite discriminar las áreas afectadas y la severidad de los incendios en una zona determinada. Según Michalijos y Uboldi (2013), mide la similitud espectral entre cada píxel de la imagen y un punto de convergencia donde se presente una mayor cantidad de carbón vegetal.

En el diseño del IAQ el punto de convergencia define las características de reflectancia del carbón vegetal de áreas recientemente quemadas, en las bandas roja e infrarroja cercana (Martín et al., 2006). Como se muestra en la Ecuación 29, el índice se calcula como la distancia euclidiana inversa de los valores espectrales desde ese punto de convergencia

$$IAQ = \frac{1}{(\rho_{CRED} - \rho_{RED})^2 + (\rho_{CNIR} - \rho_{NIR})^2} \quad (29)$$

Donde  $PC_{RED}$  y  $PC_{NIR}$  corresponden a los valores de reflectancia de referencia que en base a la literatura según Martín y Chuvieco (1998) sus valores son 0.1 y 0.06 respectivamente, y  $P_{RED}$  y  $P_{NIR}$  son los valores de reflectancia de las bandas roja e infrarroja cercana.

## Base Legal

La base legal que se contempla en el estudio de Incendios Forestales en el Ecuador se centra en la prevención y mitigación mediante Registros Oficiales como el Código Orgánico del Ambiente, Ley Forestal y de Conservación de Áreas naturales y Vida Silvestre y el Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente de la República del Ecuador (TULSAMA). El 12 de abril del 2017 mediante el Registro Oficial Suplemento 983 entró en vigor el Código Orgánico del Ambiente, cuyo objetivo principal se presenta en el artículo 1 el mismo que consiste en proteger los derechos de la naturaleza, para vivir en un ambiente sano y equilibrado. Según se menciona en los artículos 26 y 27 las competencias de prevención, mitigación y control de incendios forestales que afecten a medios naturales como bosques, vegetación y plantaciones forestales mediante planes proyectos se encuentran a cargo de los Gobierno Autónomos Descentralizados Provinciales, Metropolitanos y Municipales, del Ministerio de Agricultura y Ganadería y del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, mismos que según lo dispuesto en artículo 98 sección 7 tienen la obligación de elaborar planes, programas y proyectos a partir de normativas técnicas (Código Orgánico del Ambiente, 2017).

La Ley Forestal y de Conservación de Áreas naturales y Vida Silvestre entró en vigor el 10 de agosto del 2004 mediante el Registro Oficial Suplemento 418, cuyo objetivo principal consiste en la conservación y preservación de la naturaleza. El capítulo 10 de este apartado en el artículo 57 y 58 menciona que es competencia del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica prevenir y mitigar incendios forestales, además de concientizar mediante campañas informativas sobre los efectos negativos provocados por este evento. Cabe recalcar que los artículos 59 y 60 indican que es obligación de los propietarios de bosques prevenir, controlar e implementar seguros forestales en caso de incendios que se puedan originar en sus propiedades (Ley Forestal y de Conservación de Áreas naturales y Vida Silvestre, 2004).

El Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente de la República del Ecuador fue implementado el 31 de marzo del 2003 por el Registro Oficial Edición Especial 2, se encuentra conformado por políticas básicas ambientales cuyo objetivo se encuentra orientado hacia la sustentabilidad. En base a la protección de recursos forestales por efecto de incendios se mencionan en los artículos 155, 156 y 158 que es competencia del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica generará medidas de prevención, mediante: vigilancia permanente de los bosques estatales y autorización de quemas agrícolas, en donde si se llegase a declarar una emergencia, el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica o la dependencia correspondiente tomará acciones de control (Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente [TULSMA], 2003).

## Capítulo 3

### Metodología

En el presente capítulo se desarrolla la metodología empleada durante la investigación, misma que se centra en el cumplimiento de los objetivos y metas planteadas. El proceso metodológico de la presente investigación se encuentra conformada por una serie secuencial de procedimientos que permitirán determinar la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales, en donde, en primer lugar, es necesario recolectar información sobre el área de estudio para realizar el modelamiento de datos espaciales. Posteriormente se realizan las correcciones de imágenes satelitales que permitirán obtener datos confiables en el cálculo de índices espectrales y la clasificación de imágenes. Finalmente se determina la probabilidad de incendios forestales mediante el método de Lógica Difusa.

#### **Fase 1: Recopilación de Información Geoespacial**

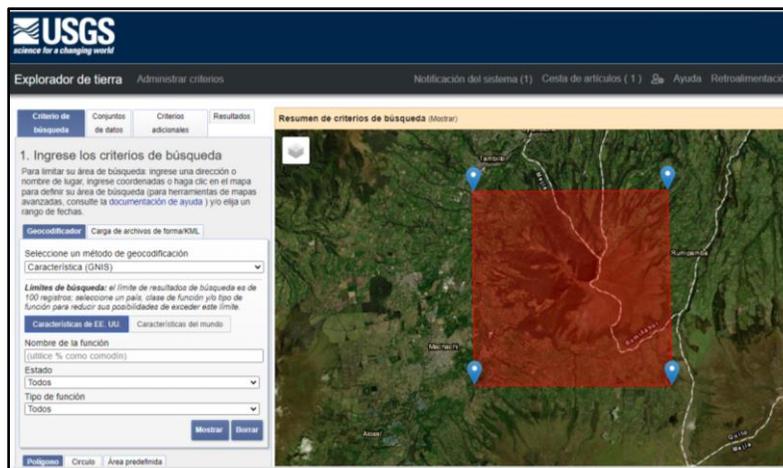
Esta fase describe la identificación y recolección de datos para el desarrollo de la investigación. Se utilizaron varios insumos cartográficos como datos vectoriales, imágenes satelitales, modelos digitales de terreno y datos meteorológicos de diversas plataformas de acceso libre. El proceso de identificación y recolección de los datos se describe a continuación:

#### ***Recopilación de Imágenes Satelitales***

Como se menciona en el Capítulo 2 de la presente investigación, uno de los portales web que contienen datos satelitales del programa Copernicus es el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), en donde es posible descargar de forma gratuita imágenes de la plataforma satelital Sentinel 2. Como se muestra en la Figura 14, la interfaz de la página web de la USGS es amigable con el usuario y permite identificar imágenes satelitales a partir de diferentes criterios, como, por ejemplo, el intervalo de fechas de captura de la imagen y el porcentaje de nubosidad.

**Figura 14.**

*Búsqueda de Imágenes Satelitales*



*Nota:* La figura representa la interfaz de la página web para selección de imágenes satelitales.

Tomado de (United States Geological Survey, 2022).

Posteriormente, dentro de la página web de la USGS, se seleccionó la plataforma Sentinel 2 y se procedió a identificar imágenes satelitales sin nubosidad en los meses de junio, julio y agosto, ya que, como se menciona en el Capítulo 1, estos meses corresponden a la época seca del Refugio de Vida Silvestre Pasochoa. Como se observa en la Figura 15, la imagen seleccionada pertenece al 5 de julio del 2021, misma que posee 12 bandas y un nivel de procesamiento 1C.

**Figura 15.**

*Selección de Imagen Satelital Sentinel*



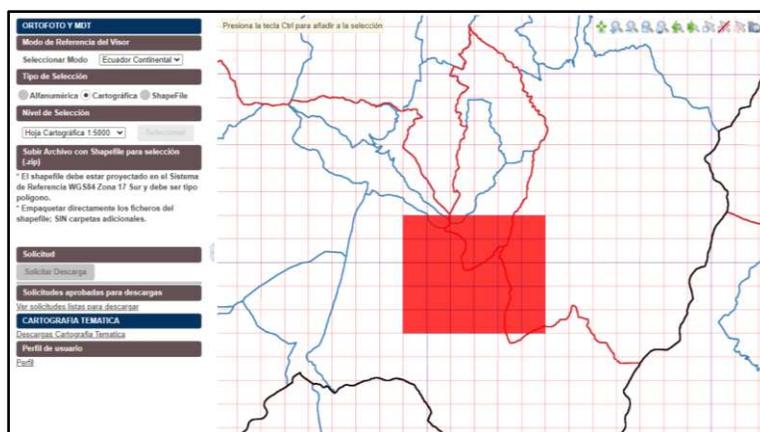
*Nota:* La figura representa la imagen satelital de posterior a la descarga. Tomado de (United States Geological Survey, 2022).

### **Obtención del Modelo Digital del Terreno**

Entre el año del 2010 y 2014, el programa del Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTIERRAS) generó ortofotografías y modelos digitales de terreno (MDT) de alrededor del 88% del territorio para contribuir con la gestión y administración territorial en el Ecuador (SIGTIERRAS, 2016). La interfaz de la página web del SIGTIERRAS permite descargar insumos cartográficos como ortofotos y modelos digitales de elevación (MDT). Como se observa en la Figura 16, se seleccionó el área correspondiente al Refugio de Vida Silvestre Pasochoa, y posteriormente se procedió a solicitar la descarga del MDT, mismo que posee una resolución de 5 metros.

### **Figura 16.**

#### *Obtención del Modelo Digital del Terreno*



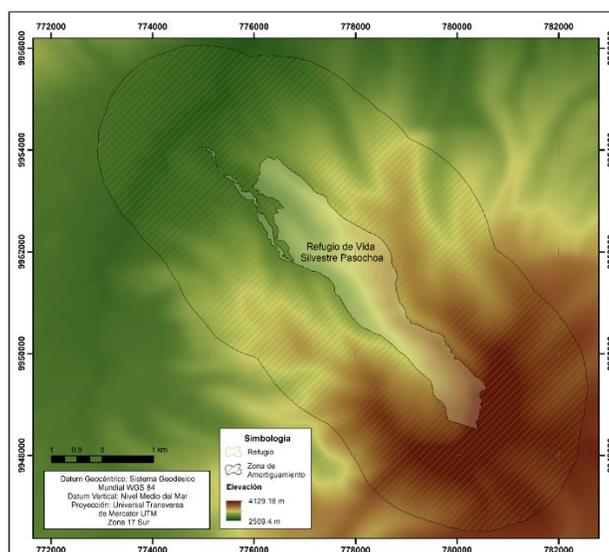
*Nota:* La figura representa la selección del modelo digital de terreno de la zona de estudio. Tomado del (SIGTIERRAS, 2022).

Los MDT generados por el programa SIGTIERRAS proporcionan una información útil ya que se presentan como un insumo cartográfico esencial para distintas aplicaciones como ordenamiento territorial, planificación ambiental, estudios demográficos, entre otros (SIGTIERRAS, 2016). Como se observa en la Figura 17, el modelo digital de elevación

obtenido de la plataforma del SIGTIERRAS posee alturas sobre el nivel del mar de entre 2509.4 a 4129.16 m.

### Figura 17.

#### *Obtención del Modelo Digital del Terreno*



*Nota:* La figura representa el modelo digital de terreno de la zona de estudio. Tomado del (SIGTIERRAS, 2022).

Los parámetros cartográficos del modelo digital de elevación seleccionado son los siguientes:

- Escala de trabajo: 1:5000
- Escala de impresión: 1:50000
- Datum Vertical: Nivel medio del mar
- Datum Geocéntrico: Sistema Geodésico Mundial WGS 84
- Proyección: Universal Transversa de Mercator UTM, Zona 17 sur
- Fuente: SIGTIERRAS, Ecuador

### **Recopilación de Datos Meteorológicos**

La red de monitoreo continuo de la FONAG fue consolidado en el 2019, para que el público utilice su información con fines investigativos, ofreciendo información sobre el

comportamiento de las variables meteorológicas de los ecosistemas alto-andinos (FONAG, 2022). Esta red de monitoreo se encuentra conformada por 56 estaciones pluviométricas, 23 meteorológicas y 10 hidrométricas de las cuales se han tomado en cuenta para esta investigación 18 estaciones pluviométricas y 14 estaciones meteorológicas como se observa en la Tabla 12, debido a su disponibilidad de datos.

**Tabla 12.**

*Red de Monitoreo del FONAG*

<b>Código</b>	<b>Nombre</b>	<b>Tipo</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
ATP01PT01	Pluviométrica Tungurahua	Pluviométrica	793764.00	9933176.00
ATP01PT02	Pluviométrica Chamilco 02	Pluviométrica	792845.00	9934810.00
ATP02PT01	Pluviométrica Chamilco 01	Pluviométrica	793207.00	9938611.00
JTU01PT11	Jatunhuaycu11	Pluviométrica	807522.00	9944182.00
JTU01PT32	Jatunhuaycu32	Pluviométrica	806765.00	9946131.00
JTU01PT53	Jatunhuaycu53	Pluviométrica	806824.00	9947710.00
JTU01PT63	Jatunhuaycu63	Pluviométrica	808170.00	9948210.00
JTU01PT73	Jatunhuaycu73	Pluviométrica	808555.00	9948148.00
JTU01PT83	Jatunhuaycu83	Pluviométrica	810183.00	9948353.00
M5021	Yuracfaccha - Oyacachi	Meteorológica	821647.00	9979154.00
M5022	Control Baños	Pluviométrica	817507.00	9964050.00
M5023	Papallacta	Pluviométrica	818242.00	9958152.00
M5024	El Tambo	Pluviométrica	812125.00	9958004.00
M5025	La Virgen Papallacta	Meteorológica	811859.00	9963068.00
M5026	Cotopaxi Control Norte	Meteorológica	784573.00	9937618.00
M5027	Lomahurco	Meteorológica	760317.00	9936280.00
M5028	Hcda Prado Miranda	Meteorológica	790439.00	9946524.00
M5029	El Carmen	Meteorológica	796826.00	9944491.00
M5030	Hcda Gordillo	Pluviométrica	794173.00	9953712.00
M5031	Chumillos	Meteorológica	810520.00	9989510.00
M5074	Puntas	Meteorológica	809389.00	9981721.00
M5075	Itulcachi	Meteorológica	804574.00	9967879.00
M5076	PNC - Potrerillos	Pluviométrica	789148.00	9931750.00
M5077	REI	Pluviométrica	757174.00	9930365.00
M5078	Pifo	Pluviométrica	798647.00	9973342.00
M5124	Campo Alegre	Meteorológica	790663.71	9931829.93
M5126	Jatunhuayco	Meteorológica	808000.00	9945675.00
M5178	Tayango Guagua Pichincha	Meteorológica	768518.00	9978969.00
M5179	Paluguillo	Meteorológica	808109.00	9966060.00
M5180	Atacazo	Meteorológica	766935.00	9964800.07

M5181	Yuracyacu Guagua Pichincha	Pluviométrica	768688.37	9980171.21
M5182	Mindo Guagua Pichincha	Pluviométrica	768495.52	9981060.84

*Nota:* Estaciones Meteorológicas y Pluviométricas correspondientes a la red de monitoreo del FONAG. Tomado del (FONAG, 2022).

Los parámetros cartográficos de las estaciones meteorológicas seleccionadas son los siguientes:

- Escala de trabajo: 1:5000
- Escala de impresión: 1:50000
- Datum Vertical: Nivel medio del mar
- Datum Geocéntrico: Sistema Geodésico Mundial WGS 84
- Proyección: Universal Transversa de Mercator UTM, Zona 17 sur
- Fuente: FONAG, Ecuador

Entre las variables meteorológicas que ofrece la red de monitoreo del FONAG se encuentra la precipitación, temperatura y humedad relativa, que, como se menciona en el Capítulo 2 de la presente investigación corresponden a variables climáticas que influyen en el comportamiento del fuego. Como se observa en la Tabla 13, Tabla 14 y Tabla 15, los datos de las variables de precipitación, temperatura y humedad relativa fueron recopiladas de la red de monitoreo del FONAG, de los meses de junio, julio y agosto, que como se menciona en el Capítulo 1, corresponde a la época seca de la Reserva de Vida Silvestre Pasochoa.

**Tabla 13.**

*Datos de Precipitación de los Meses de Junio, Julio y Agosto*

Código	Época Seca de la RVSP			
	Junio (mm)	Julio (mm)	Agosto (mm)	Media (mm)
ATP01PT01	73	55.5	31.1	53.200
ATP01PT02	84.6	82.1	48.5	71.733
ATP02PT01	66.6	69.9	39.1	58.533
JTU01PT11	90.8	62	49.7	67.500
JTU01PT32	74	31.6	37.9	47.833

JTU01PT53	96.6	38.4	44	59.667
JTU01PT63	149.8	76.5	70.8	99.033
JTU01PT73	125.1	70.8	64.6	86.833
JTU01PT83	107.3	55.6	55.4	72.767
M5021	202	278.8	124.8	201.867
M5022	335.1	528.4	244.5	369.333
M5023	155.2	66.3	86.2	102.567
M5024	173	162.6	84.8	140.133
M5025	55.7	229.5	118.1	134.433
M5026	51.3	16.1	21.7	29.700
M5027	226.7	54.2	41.7	107.533
M5028	78.3	18.4	24.7	40.467
M5029	43.8	29.2	28.3	33.767
M5030	67.9	26.3	36.1	43.433
M5031	57.4	12.5	8	25.967
M5074	48.1	43	11.1	34.067
M5075	55.6	80.1	24.1	53.267
M5076	81.7	54.9	26	54.200
M5077	149.6	26.6	33.4	69.867
M5078	56.4	6.9	22.7	28.667
M5124	75.4	59	28.8	54.400
M5126	98.4	63.3	56.5	72.733
M5178	141.6	19.7	74.1	78.467
M5179	150.5	193.9	76.1	140.167
M5180	170.5	23.9	66.7	87.033
M5181	171.2	21.5	70.3	87.667
M5182	182.4	22.1	70.8	91.767

*Nota:* Datos de precipitación correspondientes a la red de monitoreo del FONAG. Tomado del (FONAG, 2022).

**Tabla 14.**

*Datos de Temperatura de los Meses de Junio, Julio y Agosto*

Código	Época Seca de la RVSP											
	Junio			Julio			Agosto			Media Máx. (°C)	Media Mín. (°C)	Media Total (°C)
	Máx. (°C)	Mín. (°C)	Mensual (°C)	Máx. (°C)	Mín. (°C)	Mensual (°C)	Máx. (°C)	Mín. (°C)	Mensual (°C)			
ATP01PT01	-	-	-	11.86	2.06	4.3	12.75	1.68	3.91	12.305	1.870	4.105

ATP01PT02	-	-	-	14.3	1.39	3.89	14.04	1.15	3.5	14.170	1.270	3.695
ATP02PT01	-	-	-	9.95	0.75	2.7	10.61	-0.07	2.32	10.280	0.340	2.510
M5021	12.94	6.65	5.18	10.38	5.52	4.49	12.59	5.89	4.4	11.970	6.020	4.690
M5022	16.18	4.37	6.25	12.51	3.8	5.36	16.34	3.24	5.29	15.010	3.803	5.633
M5023	21.28	8.62	10.56	20.71	8.45	9.94	21.38	8.11	9.79	21.123	8.393	10.097
M5024	13.42	4.58	6.19	10.47	4.47	5.58	12.07	3.89	5.46	11.987	4.313	5.743
M5025	11.89	2.3	4.03	9.83	2.07	3.32	10.88	1	3.1	10.867	1.790	3.483
M5026	15.9	4.98	6.75	14.9	4.56	6.75	14.7	4.85	6.52	15.167	4.797	6.673
M5027	14.5	5.31	6.52	13.8	4.57	6.12	13.4	4.8	6.3	13.900	4.893	6.313
M5028	21.57	7.16	8.84	21.33	7.85	8.4	19.5	8.1	8.97	20.800	7.703	8.737
M5029	12.55	3.03	4.67	11.1	2.56	4.19	11.91	2.16	4.1	11.853	2.583	4.320
M5030	19.27	8.14	10.08	19.55	9.48	10.92	18.95	9.37	10.49	19.257	8.997	10.497
M5031	16.81	6.43	7.88	16.17	6.19	7.67	16.52	6.09	7.57	16.500	6.237	7.707
M5074	15.31	3.36	4.94	12.72	2.87	4.42	14.54	2.4	4.27	14.190	2.877	4.543
M5075	14.54	3.21	4.84	12.21	2.41	4.21	13.88	2.38	4.23	13.543	2.667	4.427
M5076	14.94	4.12	5.78	13.65	3.36	5.46	14.09	3.36	5.32	14.227	3.613	5.520
M5077	13.53	4.14	5.49	13.59	2.99	5.09	13.28	3.17	5.05	13.467	3.433	5.210
M5078	24.33	10.96	12.56	23.96	11.78	13.21	24	11.76	12.99	24.097	11.500	12.920
M5124	14.6	3.92	5.65	13.6	3.09	5.28	14.71	3.23	5.13	14.303	3.413	5.353
M5126	14.4	2.17	3.79	12.8	2.36	3.76	12.5	1.78	3.42	13.233	2.103	3.657
M5178	12.8	3.61	4.74	13.57	3.22	4.6	12.56	2.97	4.38	12.977	3.267	4.573
M5179	18.99	5.72	7.34	16.57	4.97	7.04	18.57	5.01	6.82	18.043	5.233	7.067
M5180	14.64	4.56	5.98	14.16	4.71	6.02	13.59	3.92	5.78	14.130	4.397	5.927
M5181	16.71	3.31	4.95	18.24	2.81	4.71	17	3.49	4.7	17.317	3.203	4.787
M5182	14.8	2.73	4.26	17.19	2.25	4.06	17.28	2.47	3.93	16.423	2.483	4.083

*Nota:* Datos de temperatura correspondientes a la red de monitoreo del FONAG. Tomado del (FONAG, 2022).

**Tabla 15.**

*Datos de Humedad Relativa de los Meses de Junio, Julio y Agosto*

Código	Época Seca de la RVSP									Media Máx. (%)	Media Mín. (%)	Media Mensual (%)
	Junio			Julio			Agosto					
	Máx. (%)	Mín. (%)	Mensual (%)	Máx. (%)	Mín. (%)	Mensual (%)	Máx. (%)	Mín. (%)	Mensual (%)			
ATP01PT01	-	-	-	100	62	94	100	57	92	100.00	59.500	93.000

ATP01PT02	-	-	-	100	53	95	100	50	93	100.00	51.500	94.000
ATP02PT01	-	-	-	100	59	97	100	60	96	100.00	59.500	96.500
M5021	99	43	94	100	47	96	100	55	96	99.667	48.333	95.333
M5025	100	54	93	100	32	94	100	53	93	100.00	46.333	93.333
M5026	100	43	84	100	19	79	100	38	80	100.00	33.333	81.000
M5027	100	44	89	100	31	87	100	41	84	100.00	38.667	86.667
M5028	97	37	80	97	20	69	97	33	71	97.000	30.000	73.333
M5029	100	51	90	100	31	91	100	49	90	100.00	43.667	90.333
M5031	97	45	78	95	29	75	95	46	74	95.667	40.000	75.667
M5074	100	47	90	100	24	90	100	35	90	100.00	35.333	90.000
M5075	100	52	90	100	27	90	100	50	89	100.00	43.000	89.667
M5124	100	42	88	100	18	88	100	49	88	100.00	36.333	88.000
M5126	100	44	91	100	27	89	100	48	90	100.00	39.667	90.000
M5178	100	52	91	100	36	88	100	41	89	100.00	43.000	89.333
M5179	94	45	81	92	28	80	94	41	80	93.333	38.000	80.333
M5180	100	57	95	100	48	91	100	48	90	100.00	51.000	92.000

*Nota:* Datos de humedad relativa correspondientes a la red de monitoreo del FONAG. Tomado del (FONAG, 2022).

## **Fase 2: Procesamiento de Imágenes Satelitales**

Esta fase comprende el preprocesamiento de las imágenes satelitales Sentinel 2 adquirida en la fase 1. Como se menciona en el Capítulo 2 de la presente investigación, las correcciones de las variaciones de efectos negativos asociados a la información espectral son importantes para obtener resultados confiables. Según la European Space Agency (2016), las imágenes Sentinel 2 poseen un nivel de procesamiento 1C desde el 6 de diciembre de 2016, es decir que, se encuentran corregidas geométrica y radiométricamente, por lo que es necesario realizar las correcciones atmosféricas y topográficas, mismas que se describen a continuación:

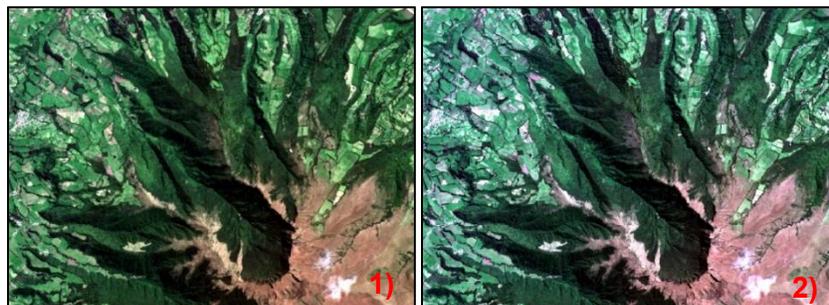
### **Corrección Atmosférica**

La interferencia atmosférica fue corregida a partir de la técnica de sustracción de objetos oscuros 1 (DOS 1) descrita en la Ecuación 13 del Capítulo 2, mediante la herramienta Semi Automatic Classification Plugin del software libre QGIS, obteniendo como resultado la corrección atmosférica de la imagen Sentinel 2 (Figura 18). Esta corrección permite la

eliminación de la perturbación atmosférica introducida en la señal registrada por el sensor y es esencial para el procesamiento de datos.

### **Figura 18.**

#### *Corrección Atmosférica*



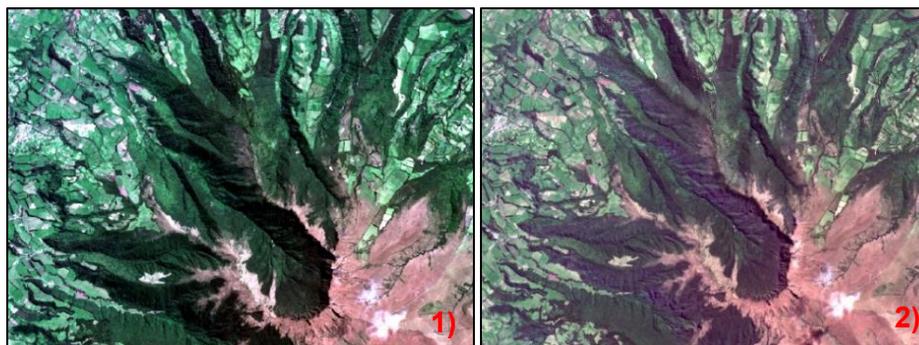
*Nota:* La figura representa la diferencia gráfica entre la imagen sin corrección atmosférica (1) y la imagen corregida atmosféricamente (2).

#### ***Corrección Topográfica***

Para la corrección topográfica se utilizó la herramienta Topographic Correction de la extensión SAGA del software QGIS mediante el método C Correction a partir los parámetros mencionados en la Ecuación 14, 15 y 16 del Capítulo 2. Cabe mencionar que los parámetros de ángulos solares se encuentran en los metadatos de la imagen Sentinel 2 descargada con anterioridad. Tras aplicar el método mencionado, se obtuvo la corrección topográfica como se observa en la Figura 19.

### **Figura 19.**

#### *Corrección Topográfica*

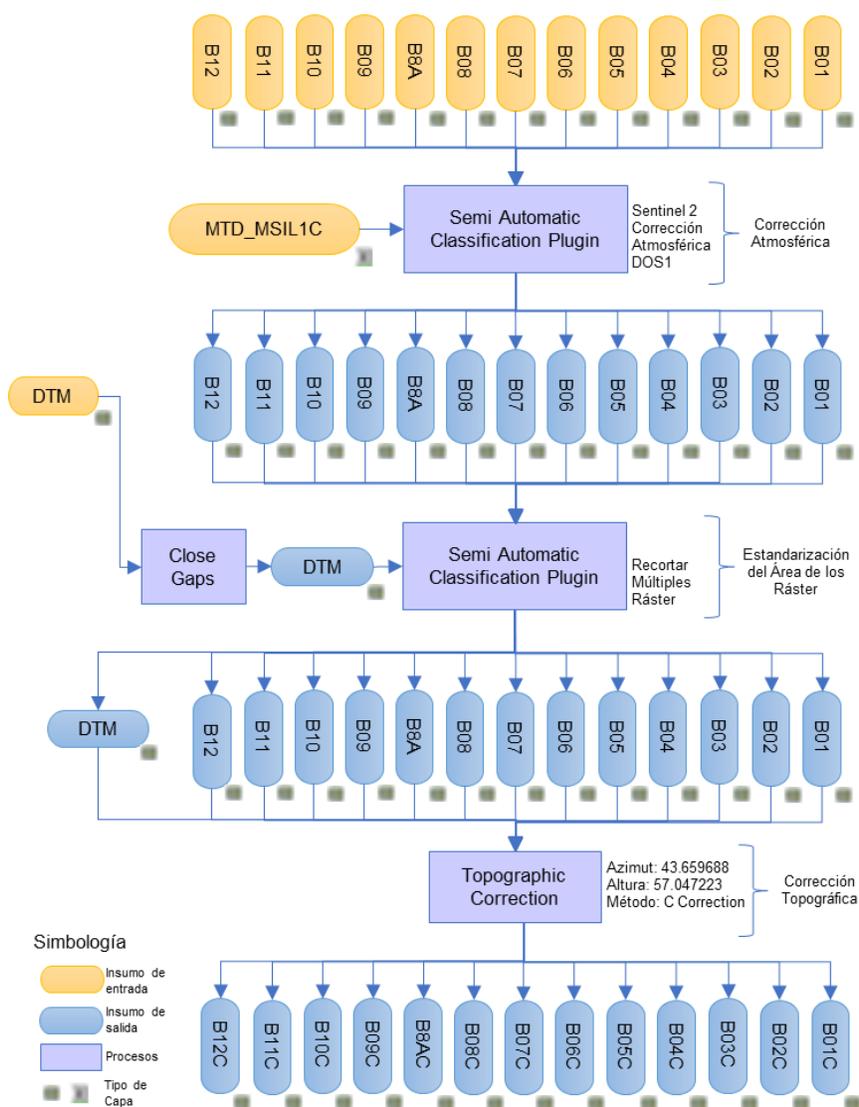


*Nota:* La figura representa la diferencia gráfica entre la imagen sin corrección topográfica (a) y la imagen corregida topográficamente (b).

Como se observa en la Figura 7, se presenta el modelo cartográfico de las correcciones atmosféricas y topográficas, mismo que permite comprender sistemáticamente los procesos de corrección aplicados.

**Figura 20.**

*Modelo Cartográfico de las Correcciones Sentinel 2*



*Nota:* La figura representa el modelo cartográfico para la corrección atmosférica y topográfica de la imagen Sentinel 2.

### Fase 3: Generación de Índices Espectrales

Para la generación de los índices espectrales se tomó en cuenta los índices de vegetación descritos en el Capítulo 2, mismos que se describen matemáticamente en la Tabla 16. Estos índices permiten caracterizar la abundancia o decadencia de vegetación en el área de estudio como se indica en la Figura 21.

**Tabla 16.**

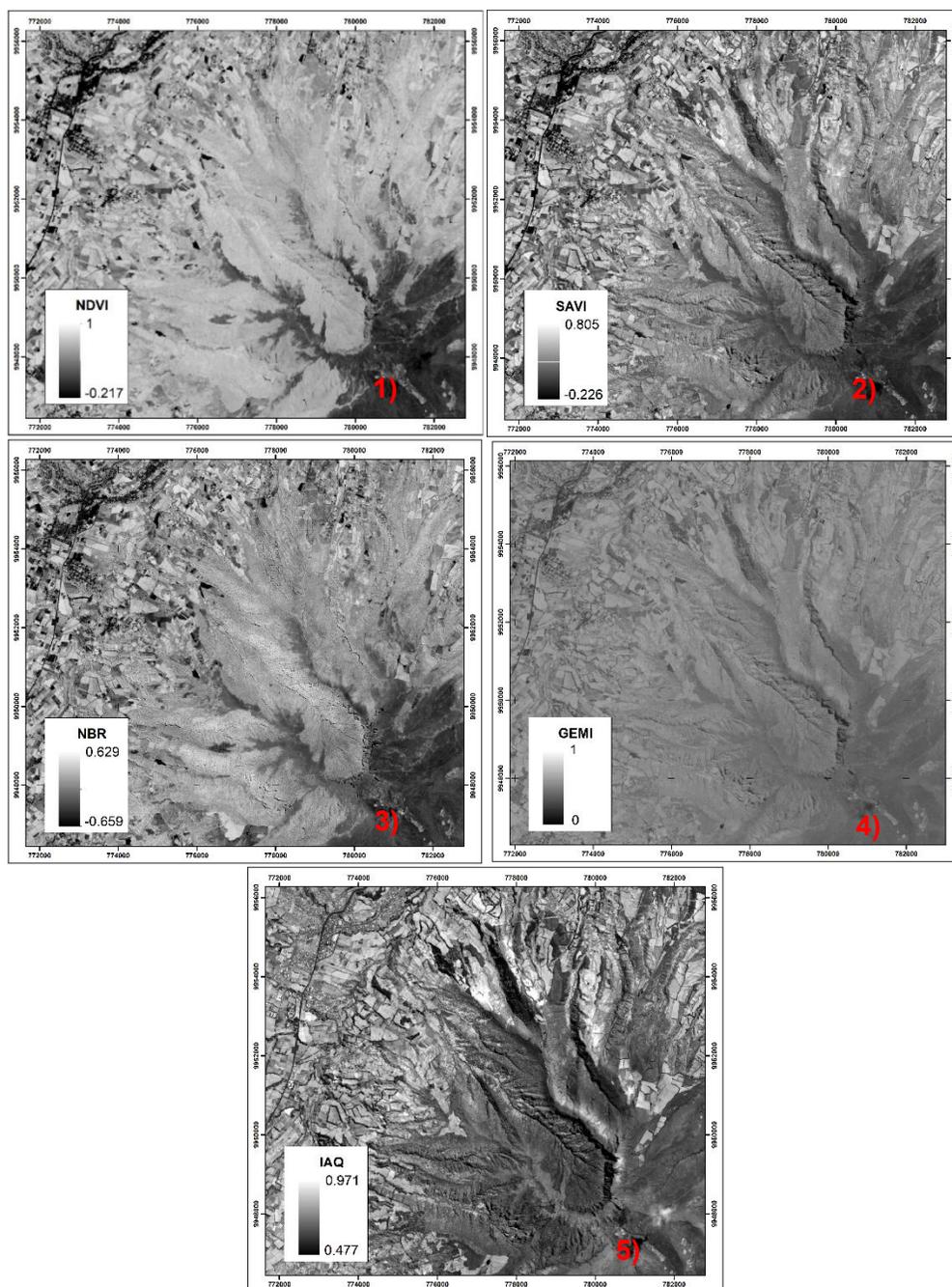
*Índices de Vegetación*

Índice de Vegetación	Ecuación
NDVI	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$
SAVI	$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} (1 + L)$
GEMI	$GEMI = n(1 - 0.25n) - \frac{\rho_{RED} - 0.125}{1 - \rho_{RED}}$ $n = \frac{2(\rho_{NIR}^2 - \rho_{RED}^2) + 1.5\rho_{NIR} + 0.5\rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + 0.5}$
NBR	$NBR = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}}$
IAQ	$IAQ = \frac{1}{(\rho_{RED} - \rho_{RED})^2 + (\rho_{NIR} - \rho_{NIR})^2}$

*Nota:* La tabla presenta las ecuaciones matemáticas de los índices de vegetación empleados.

Figura 21.

## Índices de Vegetación

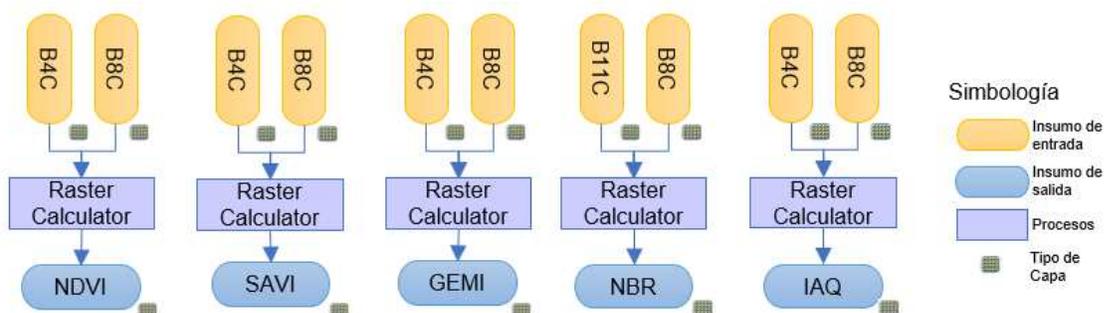


Nota: La figura representa los índices de vegetación NDVI (1), SAVI (2), GEMI (3), NBR (4), IAQ (5).

El procedimiento utilizado para determinar los índices de vegetación del área de estudio se visualiza en el modelo cartográfico (Figura 22).

**Figura 22.**

*Modelo Cartográfico de Índices Espectrales*



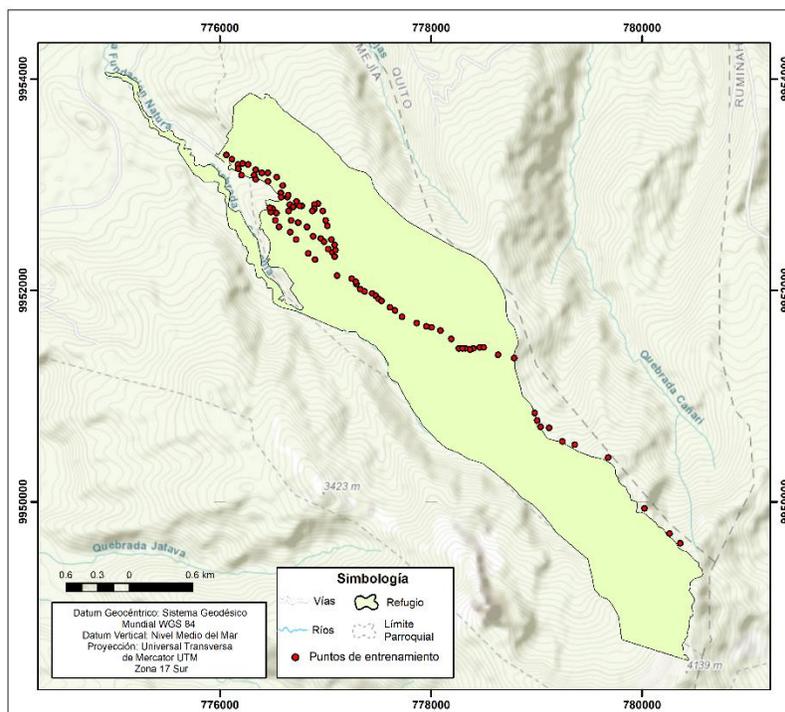
*Nota:* La figura representa el modelo cartográfico de la generación de índices espectrales.

#### **Fase 4: Trabajo de Campo**

Como se menciona en apartado de clasificación supervisada del Capítulo 2, son necesarias muestras o puntos de entrenamiento de la escena estudiada, que permitirán describir las características espectrales de la cobertura terrestre. Por ello, durante el desarrollo de la fase 4 de la presente investigación se recolectaron los puntos de entrenamiento de los modelos de combustible presentes en los senderos del Refugio de Vida Silvestre Pasochoa.

#### **Recolección de Datos**

Mediante el uso de un navegador GPS, se recolectaron los puntos de entrenamiento en función a los modelos de combustible Prometehus en los senderos: Colibrí, Amiga Naturaleza, Bosque para Todos, Mayguayacu, Palma de Cera y Pantza, pertenecientes al Refugio de Vida Silvestre Pasochoa. Estos puntos se exportaron en formato GPX y se transformaron a shapefile como se indica en la Figura 23.

**Figura 23.***Puntos GPS de Modelos Combustibles*

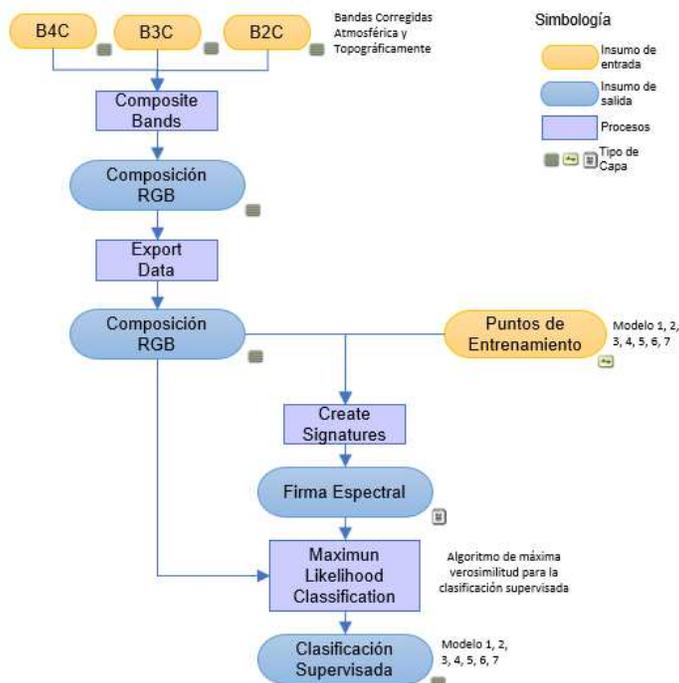
*Nota:* La figura representa los puntos GPS de los modelos combustibles tomados en campo según Prometheus.

### Fase 5: Generación de Modelos de Combustible Prometheus

Una vez generados los puntos de entrenamiento en campo, se procedió a realizar la clasificación supervisada a partir de las bandas 4, 3 y 2 de la imagen satelital corregida atmosférica y topográficamente mediante el algoritmo de máxima verosimilitud descrito en el Capítulo 2. El modelo cartográfico presentado en la Figura 24), representa el proceso por el cual se identificó los modelos de combustible del Refugio de Vida Silvestre Pasochoa, dando como resultado un modelo ráster con su clasificación (Figura 25), mismo que fue analizado mediante la matriz de confusión y el índice de concordancia kappa.

**Figura 24.**

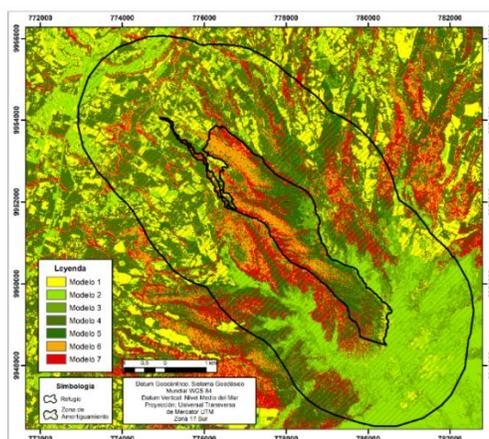
*Modelos Cartográfico de Clasificación Supervisada*



*Nota:* La figura representa el modelo cartográfico de la clasificación supervisada de los modelos de combustibles según Prometheus.

**Figura 25.**

*Modelos de Combustibles Según Prometheus*



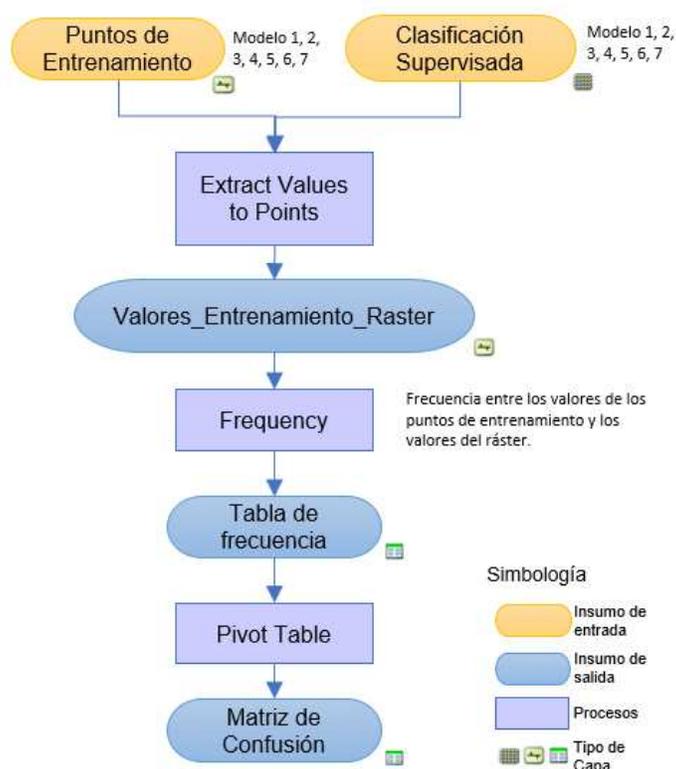
*Nota:* Modelo 1: Pasto, Modelo 2: Arbusto entre 0.3 y 0.6m, Modelo 3: Arbusto entre 0.6 y 2m, Modelo 4: Arbusto entre 2 y 4m, Modelo 5: Bosque con árboles mayores a 4 m con una

superficie de suelo limpio, Modelo 6: Bosque con árboles mayores a 4 m con combustibles de superficie media, Modelo 7: Bosque con árboles mayores a 4 m donde no se distingue la diferencia entre arbustos y copas de los árboles.

**Matriz de Confusión.** Para la validación del modelo de combustibles se utilizó la Ecuación 22 de la matriz de confusión descrita en el Capítulo 2, misma que describe el desempeño del algoritmo de máxima verosimilitud para la clasificación de los modelos de combustible. El modelo cartográfico para determinar la matriz de confusión (Figura 26), permitió determinar los valores de concordancia y fueron usados para determinar el Índice Kappa descrito en la Ecuación 23 del Capítulo 2 (Tabla 17).

**Figura 26.**

*Modelos Cartográfico para Cálculo de Matriz de Confusión*



*Nota:* La figura representa el modelo cartográfico de la clasificación supervisada de los modelos de combustibles según Prometheus.

**Tabla 17.**

*Valor de Importancia Asignado a los Modelos de Combustible*

<b>Matriz de Confusión</b>	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6	Modelo 7	Suma	Precisión
Modelo 1	<b>5</b>	0	1	0	0	0	0	6	83.33
Modelo 2	0	<b>6</b>	0	0	0	0	0	6	100.00
Modelo 3	0	0	<b>9</b>	0	0	0	0	9	100.00
Modelo 4	0	0	1	<b>13</b>	2	2	0	18	72.22
Modelo 5	0	0	0	0	<b>16</b>	0	0	16	100.00
Modelo 6	0	0	0	1	2	<b>15</b>	1	19	78.95
Modelo 7	0	0	0	0	2	0	<b>15</b>	17	88.24
Suma	5	6	11	14	22	17	16	91	
Precisión Global		86.81							
Índice Kappa		84.21							

*Nota:* La tabla representa la matriz de comparación por pares de los modelos de combustible del Refugio de Vida Silvestre Pasochoa.

### **Asignación de Pesos mediante el Proceso Analítico Jerárquico**

Para la asignación de los valores de importancia a las variables, nos guiamos en la escala fundamental de números absolutos descrita en la Tabla 7 del Capítulo 2. Esta asignación de valores permitió realizar comparaciones entre modelos, indicando su importancia en el desarrollo del origen de un incendio forestal, cuyos valores son descritos en la Tabla 18, e introducidos dentro de la matriz de comparación por pares de la Tabla 19, dando como resultado la matriz de pesos de la Tabla 20.

**Tabla 18.**

*Valor de Importancia Asignado a los Modelos de Combustible*

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
Modelo 1	1
Modelo 2	5
Modelo 3	6
Modelo 4	7
Modelo 5	4
Modelo 6	8

Modelo 7	9
----------	---

*Nota:* Los datos asignados a cada modelo de combustible responden a la pregunta: ¿Qué tan importante es la variable para que se origine un incendio forestal a partir de su combustibilidad?

**Tabla 19.**

*Matriz de Comparación por Pares de los Modelos de Combustible*

<b>Comparación de Variables</b>	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6	Modelo 7
Modelo 1	<b>1.00</b>	0.20	0.17	0.14	0.25	0.13	0.11
Modelo 2	5.00	<b>1.00</b>	0.83	0.71	1.25	0.63	0.56
Modelo 3	6.00	1.20	<b>1.00</b>	0.86	1.50	0.75	0.67
Modelo 4	7.00	1.40	1.17	<b>1.00</b>	1.75	0.88	0.78
Modelo 5	4.00	0.80	0.67	0.57	<b>1.00</b>	0.50	0.44
Modelo 6	8.00	1.60	1.33	1.14	2.00	<b>1.00</b>	0.89
Modelo 7	9.00	1.80	1.50	1.29	2.25	1.13	<b>1.00</b>

*Nota:* La tabla representa la matriz de comparación por pares de los modelos de combustible del Refugio de Vida Silvestre Pasochoa.

**Tabla 20.**

*Pesos de las Variables del Modelamiento de Combustible*

<b>Variable</b>	<b>Peso</b>
Modelo 1	0.03
Modelo 2	0.13
Modelo 3	0.15
Modelo 4	0.18
Modelo 5	0.10
Modelo 6	0.20
Modelo 7	0.23

*Nota:* La tabla representa los pesos de las variables de los modelos de combustible determinados a partir del proceso analítico jerárquico.

Finalmente se asignaron los pesos a las variables de los modelos de combustible dentro del modelo ráster y se normalizaron. El resultado de este proceso fue utilizado en el análisis de lógica difusa como la variable de combustibilidad de la vegetación.

## Fase 6: Modelamiento de Variables

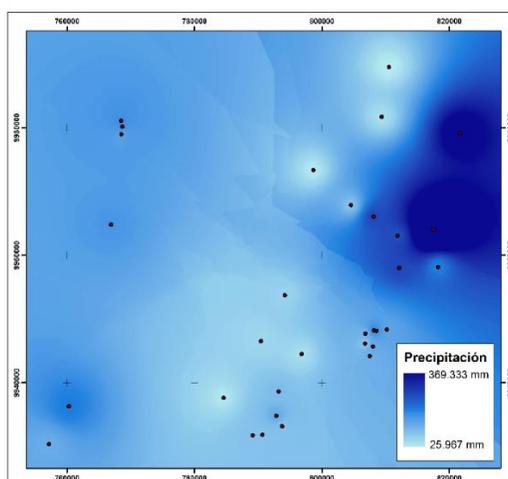
En el desarrollo de esta fase se modelarán las variables que intervienen en el origen y propagación de los incendios forestales mencionados en el Capítulo 2 de la presente investigación. Para ello se tomarán en cuenta apartados específicos como IDW para el modelamiento de los datos meteorológicos y Distancias Euclidianas para el modelamiento de ráster de distancias.

### *Interpolación de Datos Meteorológicos*

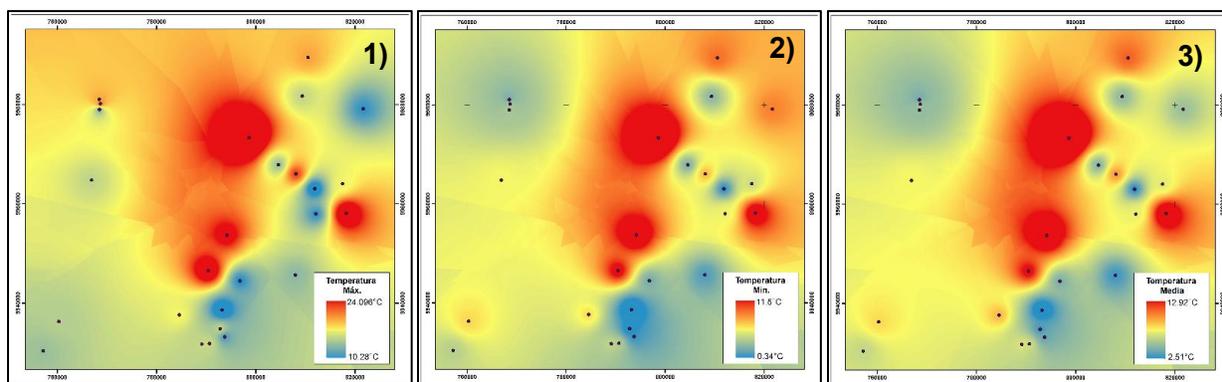
Para la interpolación de datos meteorológicos, se usó el método de Distancia Inversa Ponderada (IDW), ya que como menciona Kravchenko (2003), este método es recomendable para trabajar con bases de datos pequeñas en áreas de muestreo grandes. En el desarrollo de esta modelación se tomaron en cuenta la media de los valores de datos meteorológicos recopilados en la fase 1 de los meses junio, julio y agosto, dando como resultado la interpolación de las diferentes variables meteorológicas como se indica en la Figura 27, Figura 28 y Figura 29.

### **Figura 27.**

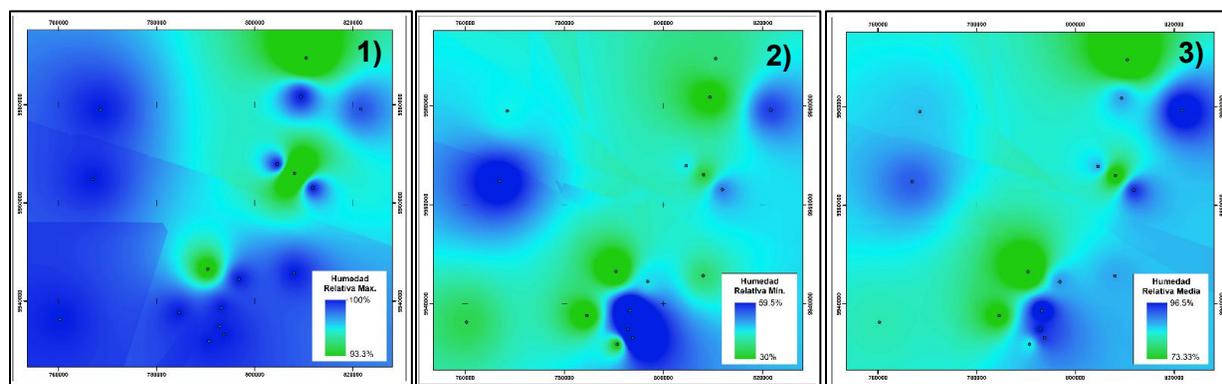
#### *Modelamiento IDW de Precipitación*



*Nota:* La figura representa la interpolación de datos mediante el método de IDW para valores de precipitación media de los meses junio, julio y agosto 2021.

**Figura 28.****Modelamiento IDW de Temperatura**

*Nota:* La figura representa la interpolación de datos mediante el método de IDW para valores de temperatura media máxima (1), media mínima (2) y media mensual (3) de los meses junio, julio y agosto 2021.

**Figura 29.****Modelamiento IDW de Humedad Relativa**

*Nota:* La figura representa la interpolación de datos mediante el método de IDW para valores de temperatura media máxima (1), media mínima (2) y media mensual (3) de los meses junio, julio y agosto 2021,

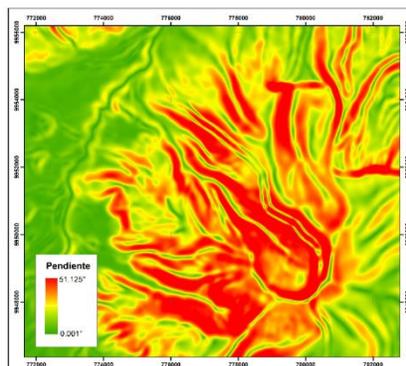
**Elaboración de Ráster de Pendientes**

Como se menciona en el Capítulo 2, las pendientes, son una de las variables que intervienen en el origen y propagación de incendios forestales, por lo que, como se observa en

la Figura 30, se procedió a modelar un ráster de pendientes, mediante el modelo digital de terreno obtenido en la Fase 1 del presente capítulo.

### Figura 30.

#### *Ráster de Pendientes*



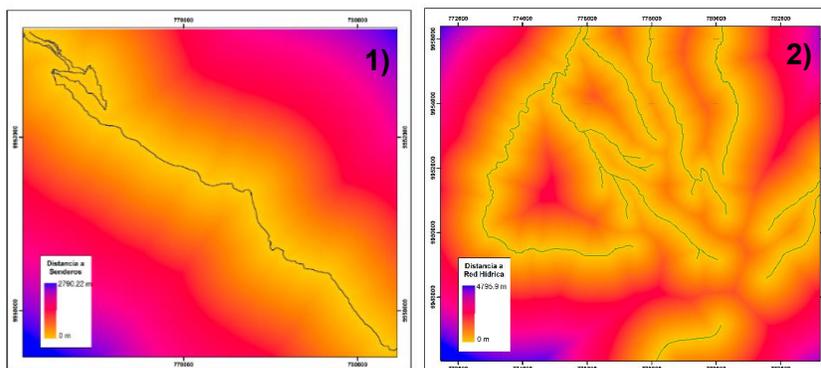
*Nota:* La figura representa el ráster de pendientes de la zona de estudio el cual se encuentra en un rango de 0.001° a 51.125°.

#### ***Elaboración de Ráster de Distancias***

Las variables de distancias que intervienen en el método de lógica difusa se diseñaron en función a la Ecuación 3 correspondiente a la Distancia Euclidiana presentada en el Capítulo 2 de la presente investigación. Obteniendo como resultado los ráster de distancias a senderos y redes hídricas como se observa en la Figura 31.

### Figura 31.

#### *Ráster de Distancias*



*Nota:* La figura representa el ráster de distancias de senderos (1) y el ráster de distancias de redes hídricas (2) del área de estudio.

### Fase 7: Análisis de Variables Según el Caso de Lógica Difusa

Para el análisis de las variables que intervienen en los incendios forestales se tomó en cuenta la literatura del Capítulo 2, en donde se describen los comportamientos de las variables en el origen del fuego. El presente análisis consiste en determinar si las variables son directa o inversamente proporcionales al origen y propagación del fuego. A continuación, en la Tabla 21, se describen las variables que intervienen en el modelamiento.

**Tabla 21.**

#### *Análisis de Variables*

Variable	Relación	Descripción	Caso	Función
Precipitación	Inversamente	Mientras exista una mayor cantidad de agua en el terreno,	Caso	Coseno
	Proporcional	menor será la ocurrencia de incendios.	2	
Temperatura	Directamente	Mientras la temperatura aumente, mayor será la probabilidad de que	Caso	Seno
	Proporcional	se origine un incendio.	3	
Humedad Relativa	Inversamente	Mientras más humedad exista, menor será la probabilidad de que	Caso	Coseno
	Proporcional	se origine un incendio.	2	
Distancia a Senderos	Inversamente	Mientras la distancia a los senderos incrementa, menor será	Caso	Coseno
	Proporcional	la probabilidad de ocurrencia de un incendio.	2	

---

		Mientras la distancia a la red		
Distancia a Red	Directamente	hídrica aumenta, mayor es la	Caso	
Hídrica	Proporcional	probabilidad de ocurrencia de un incendio.	3	Seno
		Mientras mayor sea el grado de		
Pendiente	Directamente	pendiente, mayor será la	Caso	
	Proporcional	probabilidad de que se origine un incendio.	3	Seno
		Mientras mayor prioridad tenga el		
Combustibilidad de la Vegetación	Directamente	combustible, será más probable	Caso	
	Proporcional	que exista un incendio (Proceso Analítico Jerárquico).	3	Seno
		Mientras mayor sea el valor del		
NDVI	Inversamente	NDVI, la vegetación se encontrará más saludable, por ende, la	Caso	
	Proporcional	probabilidad de que se origine un incendio forestal será menor.	2	Coseno

---

*Nota:* La tabla representa el análisis de las variables estudiadas dependiendo del caso y función a la que pertenecen.

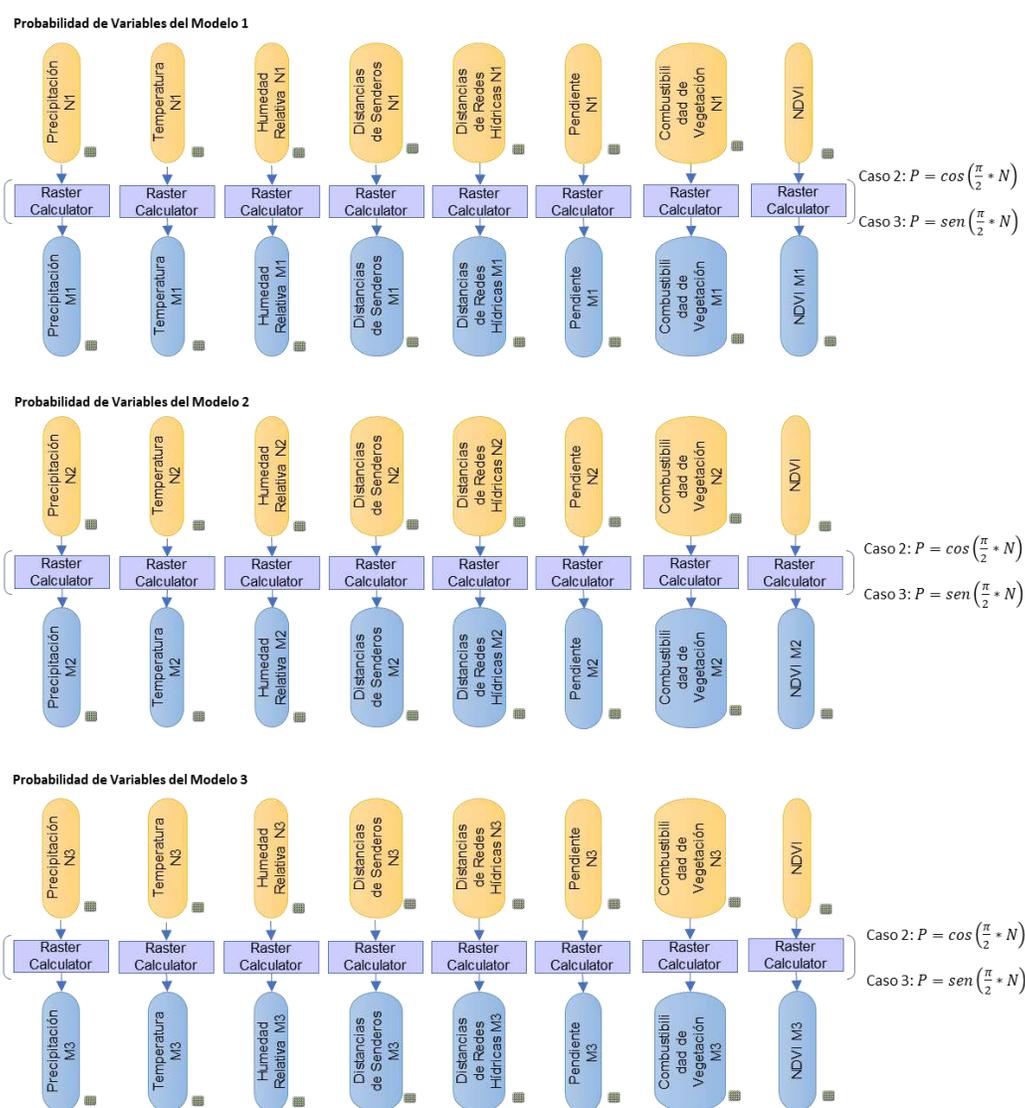
### **Fase 8: Modelamiento de Probabilidad mediante el Método de Lógica Difusa**

Para modelar la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en el Refugio de Vida Silvestre Pasochoa, se tomó en cuenta los tres modelos presentados en el apartado de generación de modelos por Lógica Difusa del Capítulo 2, mismos que se encuentran en un rango de probabilidad de 0% a 100%, de 5% a 95% y de 10% a 90%. Cabe mencionar que estos modelos se componen por las variables analizadas en la Fase 7, mismas que, para

realizar el cálculo de probabilidad por el método de lógica difusa deben encontrarse en el rango de valores de entre 0 y 1, ya que sus condiciones son de tipo sinusoidal y cosenoidal. El proceso que permitió estandarizar las variables de acuerdo a su modelo de probabilidad es representado mediante el modelo cartográfico de normalización de variables (Figura 32), mismo que se basó en las ecuaciones de normalización de la Tabla 6 del Capítulo 2.

**Figura 32.**

*Modelo Cartográfico de Normalización de Variables*

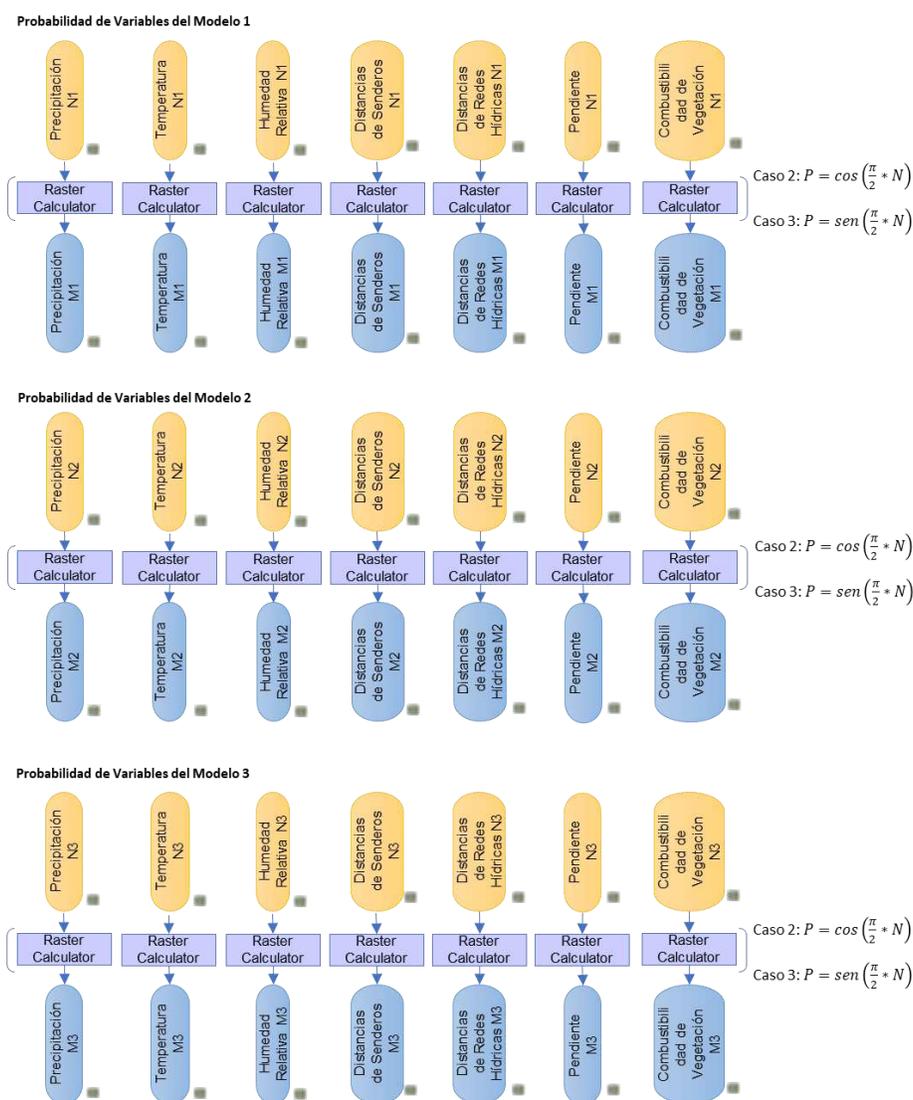


*Nota:* La figura representa el proceso para la normalización de variables para el modelo 1, modelo 2 y modelo 3.

Una vez normalizadas las variables se procedió a calcular sus probabilidades de acuerdo al caso de lógica difusa al cual pertenecen. El proceso que permitió determinar la probabilidad es representado mediante el modelo cartográfico de cálculo de probabilidades de las variables (Figura 33), misma que se basa en las ecuaciones de probabilidad de la Tabla 6 del Capítulo 2.

**Figura 33.**

*Modelo Cartográfico del Cálculo de Probabilidad de las Variables*

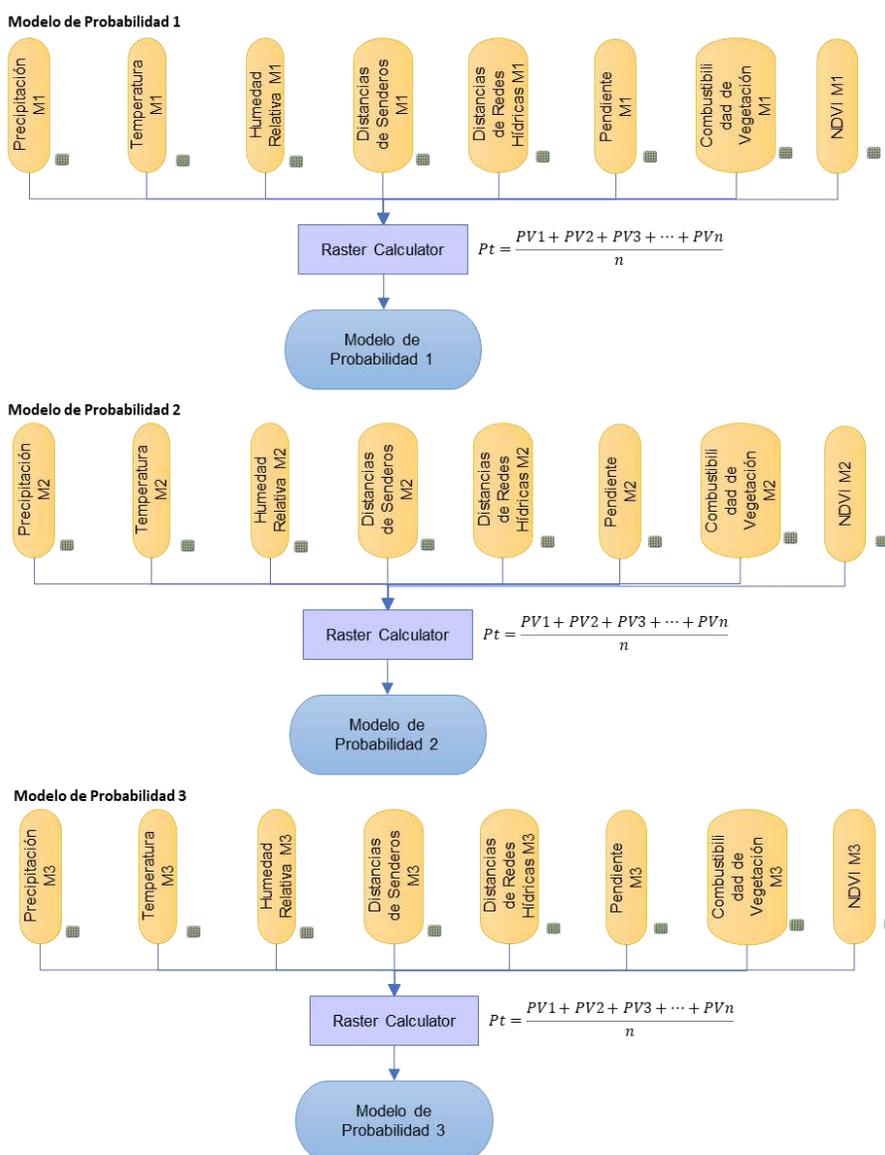


*Nota:* La figura representa el proceso para calcular la probabilidad de las variables que intervienen en el cálculo de probabilidad de Lógica Difusa para el modelo 1, 2 y 3.

Finalmente, para determinar la probabilidad total de cada uno de los modelos propuestos se tomó en cuenta la Ecuación 4 del Capítulo 2, misma corresponde al promedio de todas las probabilidades de las variables individuales. El proceso que permitió determinar la probabilidad de los modelos es representado por el modelo cartográfico de la Figura 34.

**Figura 34.**

*Modelo Cartográfico del Cálculo de Probabilidad de Ocurrencia Incendios Forestales*



*Nota:* La figura representa el proceso para calcular la probabilidad de ocurrencia incendios forestales para los modelos 1, 2 y 3.

### Fase 9: Cálculo de Ajuste del Modelo

Para el desarrollo de esta fase se consideró la Ecuación 5 del Capítulo 2, misma que se basa en la desviación estándar de los modelos de probabilidad resultantes. La desviación estándar se determinó a partir de los puntos de entrenamiento, a los cuales, se les asignaron los valores digitales de los modelos resultantes del cálculo de modelo de probabilidad, cuyos resultados permitieron realizar el ajuste de cada modelo como se observa en la Tabla 22. Cabe mencionar que el modelo con el valor más bajo del ajuste es el que mejores resultados proporciona.

**Tabla 22.**

*Desviaciones Estándar de los Modelos de Probabilidad*

<b>Modelo</b>	<b>Desviación Estándar</b>	<b>Ajuste</b>
Modelo 1	0.052	0.948
Modelo 2	0.046	0.953
Modelo 3	0.041	0.959

*Nota:* La tabla representa las desviaciones estándar y el ajuste de los modelos de probabilidad.

## Capítulo 4

### Resultados

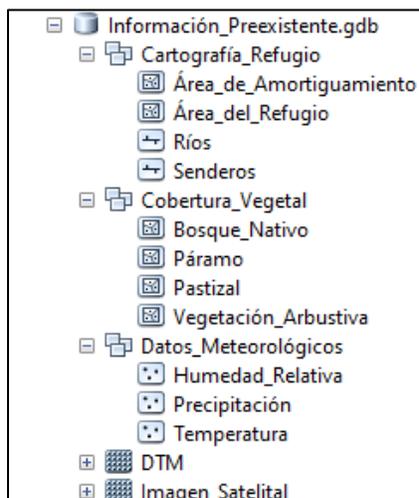
El presente capítulo describe los resultados obtenidos de acuerdo a las fases expuestas en el Capítulo 3, guardando concordancia con los objetivos y metas planteadas previamente. Resaltando así, la elaboración de las Geodatabase con información recopilada y generada, modelos de combustible según Prometheus y el cálculo de probabilidad mediante el Método de Lógica Difusa.

#### Geodatabase de Información Preexistente

Se estructuró una base de datos geográfica (Figura 35) en base a las necesidades de ubicación, datos meteorológicos, cobertura vegetal, entre otros. Esta información fue recopilada a través de diversas entidades del sector público y bases de datos de acceso libre, y fue escogida especialmente por su disponibilidad, vigencia y relación con el proyecto.

#### Figura 35.

Geodatabase de Información Preexistente



*Nota:* Descripción del Contenido de la Geodatabase de la información preexistente del Refugio de Vida Silvestre Pasochoa.

La Geodatabase resultante de la búsqueda de información preexistente se describe en la Tabla 23 y se encuentra conformada por 13 coberturas, de las cuales 6 son de tipo polígono,

2 de tipo línea, 3 de tipo punto y dos de tipo ráster, cada una con su respectiva fuente. Cabe mencionar que la adquisición de datos de imágenes satelitales, modelos digitales de terreno y datos meteorológicos son descritos en el Capítulo 3 de la presente investigación.

**Tabla 23.**

*Coberturas de la Geodatabase*

<b>Institución</b>	<b>Cobertura</b>	<b>Tipo</b>
Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica	Área del Refugio	Polígono
	Área de Amortiguamiento	Polígono
	Senderos	Línea
Instituto Geográfico Militar (IGM)	Ríos	Línea
	Bosque Nativo	Polígono
	Paramo	Polígono
	Pastizal	Polígono
	Vegetación Arbustiva	Polígono
Fondo para la protección del Agua (FONAG)	Humedad Relativa	Punto
	Precipitación	Punto
	Temperatura	Punto
Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTIERRAS)	DTM	Ráster
Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS)	Sentinel 2	Ráster

*Nota:* La tabla indica la institución, cobertura y tipo de elemento de la cobertura recopilada.

## Índices de Vegetación

Los índices espectrales fueron determinados a partir del modelo cartográfico de índices espectrales presentado en el Capítulo 3, cuyos resultados son resumidos en la Tabla 24. Los valores de NDVI permiten determinar el estado fenológico de la vegetación, por ende, es posible usar esta variable dentro del cálculo de probabilidad, ya que el estado de salud de la vegetación es indicador de la cantidad de humedad absorbida por la vegetación. Cabe mencionar que no se tomó en cuenta al índice SAVI como variable para el cálculo de probabilidad debido a que sus valores se ajustan de una mejor manera a la vegetación dispersa. De forma similar no se tomó en cuenta a los índices GEMI, IAQ y NBR, debido a que sus valores son poco relevantes al no existir una ocurrencia de incendios forestales en el Refugio de Vida Silvestre Pasochoa desde el año 2017.

**Tabla 24.**

*Resumen de Valores de Índices de Vegetación*

Índice	Valor	
	Mínimo	Máximo
NDVI	-0.217	1
SAVI	-0.226	0.805
NBR	-0.659	0.629
GEMI	0	1
IAQ	0.477	0.971

*Nota:* La tabla describe los valores obtenidos en el cálculo de los índices de vegetación de la Reserva de Vida Silvestre Pasochoa.

### **Catálogo de Índices de Vegetación**

En base a la información ráster de los diferentes índices de vegetación obtenidos se generó un catálogo compuesto por los índices GEMI, IAQ, NBR, NDVI y SAVI como se observa en la Figura 36.

**Figura 36.**

Catálogo de Índices de Vegetación



*Nota:* La figura representa el contenido del catálogo de índices de vegetación obtenidos a partir de las imágenes satelitales procesadas.

**Modelo de Combustible Prometheus**

Los modelos de combustible fueron determinados a partir de la metodología descrita en el modelo cartográfico de clasificación supervisada de la Fase 5 - Capítulo 3, obteniendo como resultado los 7 modelos de combustible que componen al Regio de Vida Silvestre Pasochoa (Apéndice 2). El método de clasificación supervisada para la determinación de los modelos combustible fue validado a partir de la matriz de confusión, en donde, se calcularon los valores de precisión global y el índice Kappa como se indica en la Tabla 25. Estos valores de concordancia se compararon con la Tabla 11, dando como resultado una fuerza de concordancia muy buena.

**Tabla 25.**

*Valores de Concordancia*

<b>Evaluación</b>	<b>Valor de Concordancia (%)</b>
Global	86.81
Kappa	84.21

*Nota:* La tabla describe los valores resultantes de la evaluación de concordancia global y kappa.

### ***Cobertura Vegetal que Componen los Modelos de Combustible***

Se identificaron las coberturas vegetales del Refugio de Vida Silvestre Pasochoa mediante la información obtenida del Instituto Geográfico Militar. Se distinguieron coberturas de bosque nativo, vegetación arbustiva, páramo y pastizal, mismos que se describen en la Tabla 26 y se representan gráficamente en el Apéndice 3.

**Tabla 26.**

#### *Cobertura Vegetal*

<b>Cobertura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Superficie (ha)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Bosque Nativo	Comunidad vegetal que se caracteriza por las dominancias de árboles de diferentes especies nativas, edades y portes variados.	470.26	75.94
Vegetación Arbustiva	Áreas con un componente substancial de especies leñosas nativas no arbóreas, incluyendo áreas degradadas en transición a una cobertura densa de dosel.	73.74	11.91
Páramo	Vegetación altoandina caracterizada por especies dominantes no arbóreas que incluyen fragmentos de bosque nativo propio de la zona.	50.1	8.09
Pastizal	Vegetación herbácea dominada por especies de gramíneas y leguminosas introducidas, utilizadas con fines pecuarios que para su establecimiento y conservación requieren de labores de cultivo y manejo.	25.13	4.06

<b>Suma</b>	619.23	100
-------------	--------	-----

*Nota:* La tabla describe la cobertura vegetal que se encuentra en el Refugio de Vida Silvestre Pasochoa. Adaptado de (Instituto Geográfico Militar, 2016).

Como se indica en la Tabla 27, la caracterización de la cobertura vegetal del Refugio de Vida Silvestre Pasochoa permitió identificar la cobertura que conforma a los modelos de combustible generados con anterioridad.

**Tabla 27.**

*Descripción de la Vegetación de los Modelos de Combustible según Prometheus*

<b>Modelo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Figura</b>
Modelo 1	Combustibles terrestres (Pasto).	
Modelo 2	Combustibles de superficie: arbustos y arboles de entre 0.3 a 0.6 m de altura (Pajonal de Páramo).	
Modelo 3	Arbustos de altura media con una altura de entre 0.6 y 2.0 m (Vegetación Arbustiva).	
Modelo 4	Arbustos altos (entre 2.0 y 4.0 m) y árboles en regeneración (Vegetación Arbustiva).	

---

Modelo 5	Bosque con árboles mayores a 4 m con una superficie de suelo limpia (Bosque Nativo).	
Modelo 6	Bosque con árboles mayores a 4 m con combustibles de superficie media (Bosque Nativo).	
Modelo 7	Bosque con árboles mayores a 4 m con combustibles pesados en la superficie. No existe diferencia de altura entre los arbustos y las copas de los árboles (Bosque Nativo).	

---

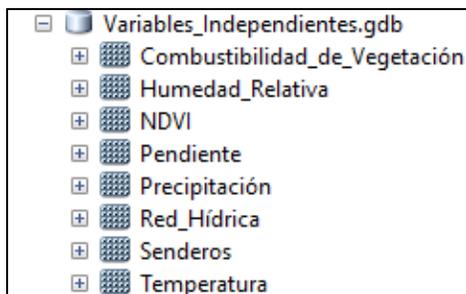
*Nota:* La tabla representa la descripción e identificación de la vegetación a partir de la clasificación de la cobertura vegetal (Apéndice 3) de los modelos de combustible según Prometheus en el Refugio de Vida Silvestre Pasochoa.

### **Modelamiento de Variables Independientes**

Mediante el análisis espacial descrito en el Capítulo 2 de la presente investigación, se generaron los modelos ráster de las variables independientes, por ejemplo, los datos meteorológicos fueron modelados mediante la distancia inversa ponderada y las distancias fueron modeladas mediante distancias euclidianas. En base a esta información se diseñó una Geodatabase (Figura 37) estructurada por los modelos de las variables independientes, mismas que fueron utilizadas en el cálculo de probabilidad.

**Figura 37.**

Geodatabase de las Variables Independientes



*Nota:* La figura representa la Geodatabase de las variables que intervienen en el cálculo de probabilidad mediante el método de Lógica Difusa.

### **Cálculo de Probabilidad Mediante el Método de Lógica Difusa**

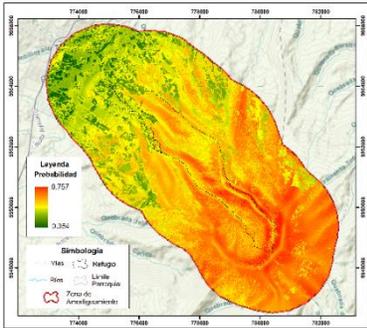
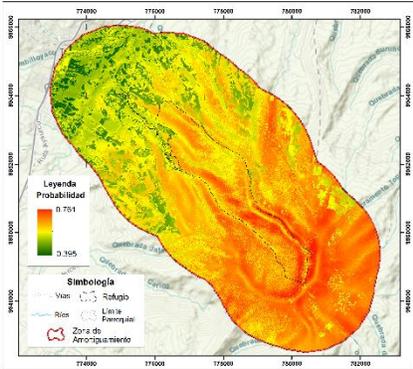
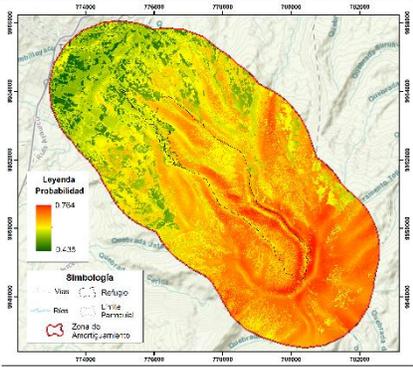
Mediante los modelos cartográficos descritos en la Fase 8 del Capítulo 3 se logró determinar los modelos de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales, dando como resultado 3 modelos de probabilidad acorde a lo presentado en la Tabla 6 del Capítulo 2. Como se puede observar en la Tabla 28, los valores de probabilidad para el modelo 1 se encuentran en un rango de 0.354 a 0.757, para el modelo 2 el rango de probabilidad es de 0.395 a 0.761, y para el rango 3 la probabilidad va de 0.435 a 0.764. Posteriormente se ajustaron los valores de los modelos como se observa en la Tabla 11 del Capítulo 3, en donde, se determinó que el menor valor de ajuste es del modelo 1, por ende, es el que mejor se ajusta a la realidad y cuyo resultado se presenta a escala 1:50000 en el Apéndice 4.

### **Informe de Validación**

- Tipo de Evaluación: Probabilidad de ocurrencia de incendios forestales
- Nombre del Método: Lógica Difusa
- Variables Involucradas: NDVI, temperatura, humedad relativa, precipitación, distancia a senderos, distancia a recursos hídricos, pendiente, combustibilidad de vegetación.

Tabla 28.

## Modelos de Probabilidad de Incendios Forestales

Modelo	Desviación Estándar	Ajuste
<p data-bbox="532 422 651 455">Modelo 1</p> 	0.052	0.948
<p data-bbox="532 827 651 861">Modelo 2</p> 	0.046	0.953
<p data-bbox="532 1274 651 1308">Modelo 3</p> 	0.041	0.959

Nota: La tabla representa los resultados de los modelos de probabilidad calculados al 100, 95 y 90 % respectivamente.

- **Análisis:** Como se observa en la Tabla 28 los tres modelos de probabilidad presentan una desviación estándar cercana a cero, lo que significa que los resultados de probabilidad se encuentran cercanos a la media. El ajuste realizado permitió determinar que los tres modelos poseen valores cercanos, pero el que mejor se adapta a la realidad es Modelo 1, ya que de los tres valores de ajuste es el que evidencia un valor menor.

## Capítulo 5

### Conclusiones y Recomendaciones

El presente capítulo expone las conclusiones y recomendaciones obtenidas del análisis de resultados de la investigación. Este apartado se desarrolla acorde a los objetivos planteados en el Capítulo 1, en donde, cada conclusión se asocia a un objetivo determinado.

#### Conclusiones

La información recopilada de las entidades públicas y plataformas de libre acceso fue seleccionada por su disponibilidad, vigencia y relación con el proyecto. Esta información fue depurada bajo el sistema de proyección WGS84 UTM 17 Sur para la elaboración de una base de datos consistente, cuyo resultado se empleó para determinar la probabilidad de incendios forestales en el Refugio de Vida Silvestre Pasochoa.

Dentro del cálculo de índices de vegetación cabe mencionar que NDVI es una variable significativa al momento de determinar la probabilidad de incendios forestales, debido a que presenta valores importantes del estado fenológico de la vegetación. Los valores máximos del NDVI indican vegetación vigorosa, por ende, poseen mayor cantidad de humedad, caso contrario los valores mínimos representan una vegetación poco vigorosa, es decir que contienen poca humedad; debido a estas condiciones fenológicas el índice NDVI formó parte de las variables que intervienen en el proceso de cálculo de probabilidad de incendios forestales.

La clasificación supervisada de la imagen satelital Sentinel 2 recopilada de la plataforma de libre acceso USGS, permitió determinar los 7 modelos de combustible según la clasificación de Prometheus, mismos que corresponden a pastos, matorrales y bosques. Los modelos de combustible fueron validados mediante el cálculo del índice kappa y precisión global, cuyos resultados de 84 y 86% de concordancia aseveran que la precisión se encuentra en un rango muy bueno de aceptación.

La información correspondiente a la cobertura de vegetación proporcionada por el Instituto Geográfico Militar permitió identificar la vegetación de los modelos de combustibles, en donde el modelo 1 contiene cobertura de pastos, el modelo 2, modelo 3 y modelo 4 se encuentran conformados por vegetación arbustiva, y finalmente el modelo 5, modelo 6 y modelo 7 se conforma por vegetación de bosque nativo.

El análisis espacial de la información recopilada permitió generar modelos ráster de los datos meteorológicos a partir del método IDW y modelos ráster de las distancias mediante el cálculo de distancias euclidianas. Dichas variables fueron analizadas según su caso (sinusoidal o cosenoidal) para intervenir en cálculo de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales.

Para el cálculo de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales se identificaron 3 modelos de probabilidad, de los cuales el modelo 1 fue el que mejor se ajustó en función a la desviación estándar debido a que su valor ajustado es el que más se acerca a cero. Según estos resultados se determina que existe una mayor probabilidad de ocurrencia de incendios forestales a lo largo del bosque nativo y pajonal de páramo.

### **Recomendaciones**

Generalmente el análisis de probabilidad de incendios forestales es abordado desde una perspectiva de cuidado ambiental, por ende, se propone que la metodología planteada en esta investigación se aplique en futuros proyectos relacionados con la prevención y mitigación de este tipo de eventos en las áreas protegidas del Ecuador.

El acceso a la información de las diferentes plataformas públicas y de acceso libre permiten el desarrollo de proceso de investigación en el Ecuador, por ello se recomienda actualizar los datos del Sistema Nacional de Información, debido a que no es posible acceder a varios insumos presentes en su plataforma. En adición, es recomendable que el manejo de las mencionadas plataformas permita al usuario identificar sus requerimientos de una forma sencilla y rápida, para tener una mejor eficacia al momento de recolectar información.

El análisis espacial permitió generar modelos de probabilidad a partir del método de Lógica Difusa, este resultado permitirá desempeñar un papel importante en la toma de decisiones para la conservación del medio ambiente, por ende, es recomendable tomar en cuenta estos resultados como insumo para el Plan Técnico Interinstitucional para la Gestión de Incendios Forestales en el Refugio de Vida Silvestre Pasochoa.

Es importante difundir los resultados del cálculo de probabilidad de incendios forestales en el Refugio de Vida Silvestre Pasochoa, para que, de esta forma se tomen acciones de prevención en las zonas con mayor probabilidad de ocurrencia de este evento, y de esta manera garantizar el cuidado de uno de los últimos remanentes de bosque andino del Ecuador.

Es recomendable realizar campañas informativas sobre la importancia y el cuidado ecosistémico del Refugio de Vida Silvestre Pasochoa, y de esta manera generar conciencia en la comunidad sobre los peligros ocasionados a causa de los incendios forestales que amenazan al refugio.

## Bibliografía

- Abburu, S., & Golla, S. (2015). Satellite Image Classification Methods and Techniques: A Review. *International Journal of Computer Applications*, 119(8), 975–8887.  
<https://research.ijcaonline.org/volume119/number8/pxc3903779.pdf>
- Abdullah, F., & Kalyankar, N. (2013). *Major Limitations of Satellite images*.
- Achilleos, G. (2008). Errors within the Inverse Distance Weighted (IDW) interpolation procedure. *Http://Dx.Doi.Org/10.1080/10106040801966704*, 23(6), 429–449.  
<https://doi.org/10.1080/10106040801966704>
- Adan, M. (2015). *Generación de distancias euclidianas en ArcGIS | TYC GIS*.  
<https://www.cursosgis.com/generacion-de-distancias-euclidianas-en-arcgis/>
- Administración del Distrito de Yakovlevsky. (2018). *Tipos de incendios, acciones en caso de incendios*. <http://yakovlevsky.ru/np/427-vidy-pozharov-deistvija-pri-pozharah.html>
- Agencia de Cooperación Internacional del Japón. (2005). *Material Educativo de Apoyo para Docentes Temática de Gestión de Riesgo a Desastres*.  
[https://www.eird.org/cd/toolkit08/material/insercion-curricular/material\\_apoyo\\_docentes/material.pdf](https://www.eird.org/cd/toolkit08/material/insercion-curricular/material_apoyo_docentes/material.pdf)
- Agencia para el Desarrollo Internacional de los Estados Unidos. (2006). *Curso de Operaciones de Prevención y Control de Incendios Forestales*. 24–25.  
<https://scms.usaid.gov/sites/default/files/documents/1866/MR-COPCIF.pdf>
- Aguilar, N., Galindo, G., Fortanelli, J., & Contreras, C. (2010). *Evaluación multicriterio y aptitud agroclimática del cultivo de caña de azúcar en la región de Huasteca (México)*. 11(2), 144–154. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=449945029006>
- Al-Abadi, A., Shahid, S., Ghalib, H., & Handhal, A. (2017). A GIS-Based Integrated Fuzzy Logic and Analytic Hierarchy Process Model for Assessing Water-Harvesting Zones in Northeastern Maysan Governorate, Iraq. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42(6), 2487–2499. <https://doi.org/10.1007/S13369-017-2487-1>

- Alkatib, A. (2021). Determination the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for the NH-38-2 Al-Najaf Plateau, Iraq with the Assistance of the Remote Sensing Technology. *Journal of Physics: Conference Series*, 1973(1), 012150. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012150>
- Allee, G. K. (2017). *GFMC / IWPM / UNISDR Global Wildland Fire Network Bulletin 9th Annual Global Wildland Fire Fatalities and Damages Report-2016 The Global Fire Monitoring Center (GFMC)*. <http://gfmcc.online/fire@fire.uni-freiburg.de>
- Alonso, C., Moreno, V., & Rodríguez, E. (1999). *Determinación Experimental de la Firma Espectral de la Vegetación. Una Sencilla Práctica de Introducción a la Teledetección*. 429–432.
- ArcGIS. (2020). *Sentinel-2 Views - Información general*. <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=fd61b9e0c69c4e14bebd50a9a968348c>
- ArcGIS Pro. (n.d.-a). *Análisis espacial en ArcGIS Pro*. Retrieved July 12, 2022, from <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/2.8/help/analysis/introduction/spatial-analysis-in-arcgis-pro.htm>
- ArcGIS Pro. (n.d.-b). *Descripción del análisis de distancia euclidiana*. Retrieved June 28, 2022, from <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/understanding-euclidean-distance-analysis.htm>
- Arizaga, N. (2017). *Desarrollo de una producción audiovisual de concienciación ambiental para el refugio de vida silvestre pasachoa dirigido a escolares de la unidad educativa Thomas Jefferson*. Universidad Tecnológica Equinoccial.
- Banco de Desarrollo de América Latina. (2022). *Ecuador fortalecerá la prevención de incendios forestales en las zonas más vulnerables | CAF*. <https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2020/05/ecuador-fortalecera-la-prevencion-de-incendios-forestales-en-las-zonas-mas-vulnerables/>
- Banko, G. (1998). *A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed*

- Data and of Methods Including Remote Sensing Data in Forest Inventory.* www.iiasa.ac.at
- Barbosa, L., Daniele, A., Moreira, A., Lima, A., & Oliveira, E. (2015). *Detection of burned forests in Amazonia using the Normalized Burn Ratio (NBR) and Linear Spectral Mixture Model from Landsat 8 images.* <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0594.pdf>
- Berumen, S., & Llamazares, F. (2007). *La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el ahp) en un entorno de competitividad creciente.* <http://www.scielo.org.co/pdf/cadm/v20n34/v20n34a04.pdf>
- Bhowmick, P., Mukhopadhyay, S., & Sivakumar, V. (2014). A review on GIS based Fuzzy and Boolean logic modelling approach to identify the suitable sites for Artificial Recharge of Groundwater. *Scholars Journal of Engineering and Technology*, 2(SJET), 316–319. [www.saspublisher.com](http://www.saspublisher.com)
- Boeser, S., & Hamylton, S. (2019). *Geographic Information Systems (GIS)*. 870–875. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-93806-6\\_149](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93806-6_149)
- Borunda, A. (2020). *¿Cuál es la relación entre los incendios forestales y el cambio climático?* <https://www.nationalgeographicla.com/ciencia/2020/09/cual-es-la-relacion-entre-los-incendios-forestales-y-el-cambio-climatico>
- Bullock, J. A., Haddow, G. D., & Coppola, D. P. (2013). Mitigation, Prevention, and Preparedness. *Introduction to Homeland Security*, 435. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415802-3.00010-5>
- Cai, L., He, H., Wu, Z., Lewis, B., & Liang, Y. (2014). Development of Standard Fuel Models in Boreal Forests of Northeast China through Calibration and Validation. *PLOS ONE*, 9(4). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0094043>
- Cao, X., Chen, J., Matsushita, B., Imura, H., & Wang, L. (2009). An automatic method for burn scar mapping using support vector machines. *International Journal of Remote Sensing*, 30(3), 577–594. <https://doi.org/10.1080/01431160802220219>
- Castillo, M., Pedernera, P., & Peña, E. (2003). Incendios forestales y medio ambiente: una

- síntesis global. *Ambiente y Desarrollo de CIPMA*, XIX, 44–45. [www.tierramerica.net](http://www.tierramerica.net)
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2001). *Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México*. 194–195.
- [https://www3.azc.uam.mx/proteccioncivil/frames/doc\\_cons/doc/Diagnostico.pdf](https://www3.azc.uam.mx/proteccioncivil/frames/doc_cons/doc/Diagnostico.pdf)
- Chavero, P. (2011). *Cartografía de modelos de combustible del monte N°117 del C.U.P. (Término municipal de Cuenca) basada en datos de sensores remotos*. Escuela Universitaria Técnica Forestal.
- Chávez, P. (1996). *Image-Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved*.
- [https://www.researchgate.net/publication/236769129\\_Image-Based\\_Atmospheric\\_Corrections\\_-\\_Revisited\\_and\\_Improved](https://www.researchgate.net/publication/236769129_Image-Based_Atmospheric_Corrections_-_Revisited_and_Improved)
- Chen, X., Vierling, L., & Deering, D. (2005). A simple and effective radiometric correction method to improve landscape change detection across sensors and across time. *Remote Sensing of Environment*, 98(1), 63–79. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2005.05.021>
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial* (Segunda Edición). Rialp, S.A .
- <http://cursosihlla.bdh.org.ar/Sist. Cart. y Teledet./Bibliografia/FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO.pdf>
- Chuvieco, E. (2008). Chuvieco (2008) Teledeteccion Ambiental.pdf. *La Observación de La Tierra Desde El Espacio*, 62.
- <https://books.google.com.ec/books?id=aKsNXCVcTcQC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- Código Orgánico del Ambiente. (2017). *Código Orgánico del Ambiente*.
- [https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/01/CODIGO\\_ORGANICO\\_AMBIENTE.pdf](https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/01/CODIGO_ORGANICO_AMBIENTE.pdf)
- Columba, M., & Quisilema, W. (2013). *Determinación de áreas vulnerables a incendios forestales y cálculo de probabilidad de ocurrencia mediante lógica fuzzy aplicando herramientas geoinformáticas, en el Distrito Metropolitano de Quito* [Universidad de las

- Fuerzas Armadas ESPE]. <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/7291>
- Comisión Nacional Forestal. (2010). *Incendios forestales. Guía práctica para comunicadores*.
- Comité Forestal de la Región de Moscú. (2019). *Tipos de Incendios*.  
<https://klh.mosreg.ru/deyatelnost/pamyatki-naseleniyu/vidy-pozharov>
- Community Planning Assistance for Wildfire. (2018). *Basics of Wildland Fire Behavior and the Wildland-Urban Interface*. 14. <http://www.nwccg.gov/glossary/a-z>
- Cruz Roja Ecuatoriana. (2021). *Servicio de Gestión de Riesgos | Cruz Roja Ecuatoriana*.  
<https://www.cruzroja.org.ec/gestion-de-riesgos/>
- Dave, C., Joshi, R., & Srivastava, S. (2015). A Survey on Geometric Correction of Satellite Imagery. *International Journal of Computer Applications*, 116(12), 24–27.  
<https://doi.org/10.5120/20389-2655>
- Diakonie Katastrophenhilfe. (2017). *Herramientas para la gestión del riesgo a desastres Compendio de su aplicación local para el fortalecimiento de la resiliencia comunitaria financiado por*. [https://www.adelphi.de/en/system/files/mediathek/bilder/Manual de Resiliencia\\_es\\_0.pdf](https://www.adelphi.de/en/system/files/mediathek/bilder/Manual%20de%20Resiliencia_es_0.pdf)
- Díaz, E. (2015). *Construcción de Mapas de Combustible Forestal para Detectar el Peligro de Incendio en un Bosque de Pino-Encino* [Universidad Autónoma de Nuevo León].  
<http://eprints.uanl.mx/9390/1/1080214888.pdf>
- Domingo, D., de la Riva, J., Lamelas, M. T., García, A., Ibarra, P., Echeverría, M., & Hoffrén, R. (2020). Fuel Type Classification Using Airborne Laser Scanning and Sentinel 2 Data in Mediterranean Forest Affected by Wildfires. *Remote Sensing 2020*, Vol. 12, Page 3660, 12(21), 36–60. <https://doi.org/10.3390/RS12213660>
- Donoso, P., Soto, L., Alvarado, C., Bahamondes, P., & Osorio, M. (1975). *NOTAS SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL FUEGO Y SU APLICACION EN EL CONTROL DE INCENDIOS FORESTALES*. 20–21. <http://revistas.uach.cl/pdf/bosque/v1n1/art04.pdf>
- Dowdy, A., Purcell, L., Boulter, S., & Carvalho, L. (2022). *Wildfires under climate change: a*

*burning issue - World | ReliefWeb.* <https://reliefweb.int/report/world/wildfires-under-climate-change-burning-issue>

Drapalyuk, M., Stupnikov, D., Druchinin, D., & Pozdnyakov, E. (2019). *Forest fires: methods and means for their suppression.* 2–3. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012061>

Durán, C. (2012). *Modelamiento espacial de vulnerabilidad socio-ambiental en los municipios de Colombia.* 45–46. [www.sxc.hu](http://www.sxc.hu)

Earth Observing System. (2021). *Spatial Analysis: Data Processing And Use Cases.* <https://eos.com/blog/spatial-analysis/>

Eastman, R. (1987). *TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling System Manual.* <https://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/10/Terrset-Manual.pdf>

Ecuador Turístico. (2012). *Ecosistemas frágiles de Ecuador – Información de la Biodiversidad de Ecuador.* <https://www.ecuador-turistico.com/2012/05/ecosistemas-fragiles-de-ecuador.html>

Ekstrand, S. (1996). *Landsat TM-Based Forest Damage Assessment: Correction for Topographic Effects.* 151–151. [https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1996journal/feb/1996\\_feb\\_151-161.pdf](https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1996journal/feb/1996_feb_151-161.pdf)

El Universo. (2004). *Incendio destruyó 12 hectáreas de parque natural en Pasochoa | Ecuador | Noticias | El Universo.* <https://www.eluniverso.com/2004/08/17/0001/12/E835F70BD1894FFC8367B76803BA93CA.html>

El Universo. (2019). *62.000 hectáreas de bosque afectadas por incendios desde 2012 en Ecuador | Ecología | La Revista | El Universo.* <https://www.eluniverso.com/noticias/2019/09/08/nota/7506112/62000-hectareas-bosque-afectadas-incendios-2012-ecuador/>

Emergency Management Department of Angeles. (2022). *What is Hazard Mitigation? | Emergency Management Department.* <https://emergency.lacity.org/about/hazard->

mitigation-plan/what-hazard-mitigation

Enderle, D., & Weih, R. (2005). Integrating Supervised and Unsupervised Classification

Methods to Develop a More Accurate Land Cover Classification. *Journal of the Arkansas Academy of Science*, 59, 10.

<http://scholarworks.uark.edu/jaas><http://scholarworks.uark.edu/jaas/vol59/iss1/10>

Enoh, M. A., Okeke, U. C., & Narinua, N. Y. (2021). Identification and modelling of forest fire severity and risk zones in the Cross – Niger transition forest with remotely sensed satellite data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3), 879–887.

<https://doi.org/10.1016/J.EJRS.2021.09.002>

Environmental Protection Agency. (2021). *Climate Change Indicators: Wildfires*.

<https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-wildfires>

European Space Agency. (n.d.). *Sentinel Missions*. Retrieved June 21, 2022, from

<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions>

European Space Agency. (2016). *New format for Sentinel-2 Level-1C products implemented 06*

*December 2016*. [https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/news/-/asset\\_publisher/Ac0d/content/new-format-for-sentinel-2-level-1c-products-implemented-06-december-](https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/news/-/asset_publisher/Ac0d/content/new-format-for-sentinel-2-level-1c-products-implemented-06-december-2016;jsessionid=34A0D8F24EC289C268B2C1FA26388F58.jvm1?redirect=https%3A%2F%2Fsentinels)

[2016;jsessionid=34A0D8F24EC289C268B2C1FA26388F58.jvm1?redirect=https%3A%2F%2Fsentinels](https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/news/-/asset_publisher/Ac0d/content/new-format-for-sentinel-2-level-1c-products-implemented-06-december-2016;jsessionid=34A0D8F24EC289C268B2C1FA26388F58.jvm1?redirect=https%3A%2F%2Fsentinels)

FONAG. (2022). *Sistema de Estandarización de Datos Hidroclimáticos Crudos*.

<https://sedc.fonag.org.ec/>

Food and Agriculture Organization [FAO]. (2016). *El estado mundial de la Agricultura y la*

*Alimentación*. [www.fao.org/publications](http://www.fao.org/publications)

Fotheringham, S., & Wegener, M. (2000). *Spatial Models and GIS: New and Potential Models -*

*Stewart Fotheringham, Michael Wegener - Google Libros*.

<https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=fKPZI4LYDtC&oi=fnd&pg=PA3&dq=GI>

S+spatial+modeling&ots=LnP8XxFSiB&sig=mskci1tuBs9\_akv0XLz\_8zM1hLc#v=onepage  
&q=GIS spatial modeling&f=false

Füreder, P. (2010). *Topographic Correction Of Satellite Images For Improved Lulc Classification In Alpine Areas*. <https://pdfcookie.com/documents/topographic-correction-of-satellite-images-for-improved-lulc-classification-in-alpine-areas-eyv8nkz47ov1>

Gatti, A., & Galoppo, A. (2018). *Sentinel-2 Products Specification Document Sentinel-2 Products Specification Document Written by Company Responsibility Date Signature*.

Geoinnova. (2018). *Proyecto Copernicus sobre cambio climático - Geoinnova*.

<https://geoinnova.org/blog-territorio/tecnologia-copernicus-cambio-climatico/>

Gessesse, A., & Melesse, A. (2019). Temporal relationships between time series CHIRPS-rainfall estimation and eMODIS-NDVI satellite images in Amhara Region, Ethiopia.

*Extreme Hydrology and Climate Variability: Monitoring, Modelling, Adaptation and*

*Mitigation*, 81–92. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815998-9.00008-7>

Ghobadi, G., Gholizadeh, B., & Dashliburun, O. (2012). Forest Fire Risk Zone Mapping From Geographic Information System in Northern Forests of Iran (Case study, Golest.

*International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. [www.ijagcs.com](http://www.ijagcs.com)

GIS Resources. (2013). *Types of Interpolation Methods*. [https://gisresources.com/types-of-interpolation-methods\\_2/](https://gisresources.com/types-of-interpolation-methods_2/)

Government of Canada. (2015). *Pre-processing*. <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/satellite-imagery-and-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/image-interpretation-analysis/pre-processing/9403>

Government of Canada. (2021). *Fire behaviour*. <https://www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/forests/wildland-fires-insects-disturbances/forest-fires/fire-behaviour/13145>

Government of Nova Scotia. (2021). *Basic Forest Fire Suppression Course*.

<https://novascotia.ca/natr/forestprotection/wildfire/bffsc/lessons/lesson3/topography.asp>

Green, E., Clark, C., & Edwards, A. (2000). *Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal*

*Management.*

[https://www.researchgate.net/publication/261795733\\_Geometric\\_correction\\_of\\_satellite\\_and\\_airborne\\_imagery](https://www.researchgate.net/publication/261795733_Geometric_correction_of_satellite_and_airborne_imagery)

Grégory, G., & Hy, D. (2016). *Sentinel-2 and Landsat-7 satellite images qualitative comparison for evaluating advances in detecting lakes' quality parameters* .

Hadjimitsis, D., Papadavid, G., Agapiou, A., Themistocleous, K., Hadjimitsis, M., Retalis, A., Michaelides, S., Chrysoulakis, N., Toullos, L., & Clayton, C. (2010). Natural Hazards and Earth System Sciences Atmospheric correction for satellite remotely sensed data intended for agricultural applications: impact on vegetation indices. *Hazards Earth Syst. Sci*, 10, 89–95. [www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/10/89/2010/](http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/10/89/2010/)

Hasmadi, Pakhriazad, & Shahrin. (2009). Evaluating supervised and unsupervised techniques for land cover mapping using remote sensing data. *Malaysian Journal of Society an Space*, 1–10.

[https://www.researchgate.net/publication/50361148\\_Evaluating\\_supervised\\_and\\_unsupervised\\_techniques\\_for\\_land\\_cover\\_mapping\\_using\\_remote\\_sensing\\_data](https://www.researchgate.net/publication/50361148_Evaluating_supervised_and_unsupervised_techniques_for_land_cover_mapping_using_remote_sensing_data)

Haygot Technologies. (2020). *Man Made Disaster - Fire Accident*.

<https://www.toppr.com/ask/content/concept/man-made-disaster-fire-accident-206070/>

Huete, A. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)

Huete, Alfredo. (2004). Remote Sensing for Environmental Monitoring. *Environmental Monitoring and Characterization*, 183–206. <https://doi.org/10.1016/B978-012064477-3/50013-8>

Ikechukwu, M. N., Ebinne, E., Idorenyin, U., Raphael, N. I., Ikechukwu, M. N., Ebinne, E., Idorenyin, U., & Raphael, N. I. (2017). Accuracy Assessment and Comparative Analysis of IDW, Spline and Kriging in Spatial Interpolation of Landform (Topography): An Experimental Study. *Journal of Geographic Information System*, 9(3), 354–371.

<https://doi.org/10.4236/JGIS.2017.93022>

Indira Gandhi National Open University. (2018). *GIS Data Models and Spatial Data Structure* .

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés. (2003). *Diseño y operación del Sistema de Información Ambiental, la Línea Base y el Sistema Nacional de Monitoreo Ambiental para Colombia*.

Insurance Institute for Business and Home Safety. (2020). *The Fire Behavior Triangle*. 6–7.

ISO 9001. (2015). *Definición de riesgos y peligros* . <https://www.nueva-iso-9001-2015.com/2020/09/definicion-de-riesgos-y-peligros-segun-iso-9001/>

Jiang, W., Ni, Y., Pang, Z., He, G., Fu, J., Lu, J., Yang, K., Long, T., & Lei, T. (2020). *A NEW INDEX FOR IDENTIFYING WATER BODY FROM SENTINEL-2 SATELLITE REMOTE SENSING IMAGERY*. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-3-2020-33-2020>

Jijón, C., & Pazmiño, X. (1990). *Plan de Manejo del Bosque Protector Pasochoa*.

<http://190.152.46.74/documents/10179/242256/29+PLAN+DE+MANEJO+PASOCHOA+RV+S+Pasochoa.pdf/637bb158-b2ed-4b75-8743-d6a03cfcc3ce>

Jiménez, J., Sobrino, J., Mattar, C., & Franch, B. (2010). *Atmospheric correction of optical imagery from MODIS and Reanalysis atmospheric products*.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.022>

Jog, S., & Dixit, M. (2016). Supervised classification of satellite images. *Conference on Advances in Signal Processing, CASP 2016*, 93–98.

<https://doi.org/10.1109/CASP.2016.7746144>

Jones, T. (2017). *Unsupervised learning for data classification - IBM Developer*.

<https://developer.ibm.com/articles/cc-unsupervised-learning-data-classification/>

Jong, S., Meer, F., & Clevers, J. (2004). *Basics of Remote Sensing*. 1–15.

[https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2560-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2560-0_1)

Juvanhol, R., Fiedler, N., Dos Santos, A., Omena, M., Eugenio, F., Pinheiro, C. J., & Filho, A. (2021). Gis and fuzzy logic applied to modelling forest fire risk. *Anais Da Academia*

- Brasileira de Ciências*, 93, 20190726. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120190726>
- Khan Academy. (2022). *La luz: ondas electromagnéticas, espectro electromagnético y fotones (artículo)* | Khan Academy. <https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry/electronic-structure-of-atoms-ap/bohr-model-hydrogen-ap/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>
- Koncsag, E., & Dimen, L. (2000). *The Use of Vegetation Indices to Establish the Land Use* . [https://www.academia.edu/22147779/The\\_Use\\_of\\_Vegetation\\_Indices\\_to\\_Establish\\_the\\_Land\\_Use](https://www.academia.edu/22147779/The_Use_of_Vegetation_Indices_to_Establish_the_Land_Use)
- Kottasová, I. (2021). *Los incendios forestales arrasan con zonas que no solían arder*. <https://cnnespanol.cnn.com/2021/07/22/incendios-forestales-estragos-mundo-calcinando-incendiarse-trax/>
- Kravchenko, A. N. (2003). Influence of Spatial Structure on Accuracy of Interpolation Methods. *Soil Science Society of America Journal*, 67(5), 1564–1571. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ2003.1564>
- Lasaponara, R., Lanorte, A., & Pignatti, S. (2006). Characterization and Mapping of Fuel Types for the Mediterranean Ecosystems of Pollino National Park in Southern Italy by Using Hyperspectral MIVIS Data. *Earth Interactions*, 10(13), 1–11. <https://doi.org/10.1175/EI165.1>
- Lasso, S. V. (2017). Evaluación del uso recreativo y turístico del Refugio de Vida Silvestre Pasochoa. *RICIT: Revista Turismo, Desarrollo y Buen Vivir*, ISSN-e 2588-0861, ISSN 1390-6305, N.º. 11, 2017, Págs. 2-24, 11, 2–24. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6252632&info=resumen&idioma=SPA%0Ahttps://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6252632>
- Leavell, D., Berger, A., Fitzgerald, E., & Parker, B. (2017). *Module 3: Fire Behavior*. 6–7. <https://catalog>.
- Ley Forestal y de Conservación de Áreas naturales y Vida Silvestre. (2004). *Ley Forestal y de Conservación de Áreas naturales y Vida Silvestre* . <https://www.ambiente.gob.ec/wp->

content/uploads/downloads/2015/06/Ley-Forestal-y-de-Conservacion-de-Areas-Naturales-y-Vida-Silvestre.pdf

- Liang, S., & Wang, J. (2020). Atmospheric correction of optical imagery. *Advanced Remote Sensing*, 131–156. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815826-5.00004-0>
- Ljubomir, G., Pamučar, D., Drobňak, S., & Pourghasemi, H. R. (2019). Modeling the Spatial Variability of Forest Fire Susceptibility Using Geographical Information Systems and the Analytical Hierarchy Process. *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences*, 337–369. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815226-3.00015-6>
- López, & Pita. (2001). *Medidas de concordancia: el índice de Kappa* . 169–171. <https://docplayer.es/333608-Medidas-de-concordancia-el-indice-de-kappa.html>
- Lora, J. (2016). *Comparativa de sensores espaciales de diferente resolución espectral en la exploración minera* [Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa]. [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/96828/lora\\_lopez.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/96828/lora_lopez.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Lü, G., Batty, M., Strobl, J., Lin, H., Zhu, A. X., & Chen, M. (2019). Reflections and speculations on the progress in Geographic Information Systems (GIS): a geographic perspective. *International Journal of Geographical Information Science*, 33(2), 346–367. <https://doi.org/10.1080/13658816.2018.1533136>
- Lu, G., & Wong, D. (2008). An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. *Computers & Geosciences*, 34(9), 1044–1055. <https://doi.org/10.1016/J.CAGEO.2007.07.010>
- Maglione, P. (2016). *Very High Resolution Optical Satellites: An Overview of the Most Commonly used*. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2016.91.99>
- Malladi, C. (2017). *Detection of Objects in Satellite images using Supervised and Unsupervised Learning Methods*. [www.bth.se](http://www.bth.se)
- Manickam, M. (2021). *8-Bit vs 16-Bit Images*. <https://photographylife.com/8-bit-vs-16-bit-images>

- Martín, P., & Chuvieco, E. (1998). *Cartografía e inventario de incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR*. 7, 109–128.  
[https://digital.csic.es/bitstream/10261/6426/1/Martin\\_Isabel\\_Serie\\_Geografica.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/6426/1/Martin_Isabel_Serie_Geografica.pdf)
- Martín, P., Gómez, I., & Chuvieco, E. (2006). Burnt Area Index (BAIM) for burned area discrimination at regional scale using MODIS data. *Forest Ecology and Management*, 234, S221. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2006.08.248>
- Mataix, J., & Cerdà, A. (2009). *Incendios forestales en España. Ecosistemas terrestres y suelos*. [https://www.senderismograncanaria.com/descargas/gestion-ambiental/10\\_Incendios\\_forestales.pdf](https://www.senderismograncanaria.com/descargas/gestion-ambiental/10_Incendios_forestales.pdf)
- Meira, A., Nunes, A., Sousa, A., & Lourenço, L. (2020). Mapping the causes of forest fires in Portugal by clustering analysis. *Geosciences (Switzerland)*, 10(2).  
<https://doi.org/10.3390/GEOSCIENCES10020053>
- Michalijos, M. P., & Uboldi, J. (2013). Propuesta metodológica para la evaluación de áreas afectadas por incendios mediante el uso de imágenes satelitales (Sierra de la Ventana, Argentina). *Revista de Geografía Norte Grande*, 56(56), 223–234.  
<https://doi.org/10.4067/S0718-34022013000300012>
- Ministère des Richesses Naturelles. (2014). *Évaluation et atténuation des risques de feu de végétation et manuel de référence*. <https://files.ontario.ca/wildland-fire-risk-assessment-and-mitigation-reference-manual-french.pdf>
- Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica. (2020). *Plan Técnico Interinstitucional para la Gestión de Incendios Forestales en el Refugio de Vida Silvestre Pasochoa*.
- Ministerio del Interior de la República de Colombia. (2012). *Ley Sistema Nacional de Gestión del Riesgo*.  
[https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/20575/Ley\\_1523\\_2012.pdf?sequence=4&isAllowed=y](https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/20575/Ley_1523_2012.pdf?sequence=4&isAllowed=y)
- Mohamed, S. (2021). Comparison of Satellite Images Classification Techniques Using Landsat-

- 8 Data for Land Cover Extraction in Alexandria, Egypt. *IJCIS*, 21(3), 29–43.  
<https://doi.org/10.21608/ijicis.2021.78853.1098>
- Mohammed, A., & Khamees, H. (2021). Categorizing and measurement satellite image processing of fire in the forest greece using remote sensing. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 21(2), 846–853.  
<https://doi.org/10.11591/ijeecs.v21.i2.pp846-853>
- Mons, A. (2015). *Cartografía de Modelos de Combustible Forestal mediante Imágenes de Satélite y LiDAR aereotransportado*.
- Montúfar, M. (2010). Refugio de Vida Silvestre Pasochoa. *Cotopaxi Magazine*.  
<http://ingeomatica.com.ec/pasochoa.pdf>
- Moran, M. S., Jackson, R. D., Slater, P. N., & Teillet, P. M. (1992). Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. *Remote Sensing of Environment*, 41(2–3), 169–184. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90076-V](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90076-V)
- Mountrakis, G., Im, J., & Ogole, C. (2011). Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66, 247–259.  
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.11.001>
- Naciones Unidas. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. [www.cepal.org/es/suscripciones](http://www.cepal.org/es/suscripciones)
- Nasery, S., & Kaan, K. (2020). Burn Area Detection and Burn Severity Assessment Using Sentinel 2 MSI Data: The Case of Karabağlar District. *Turkish Journal of Geosciences*, 1(2), 72–77. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1206281>
- Navalgund, R. (2001). Remote sensing. *Resonance*, 6(12), 51–60.  
<https://doi.org/10.1007/BF02913767>
- Olaode, A., Naghdy, G., & Todd, C. (2014). *Unsupervised Classification of Images: A Review*.  
[https://www.researchgate.net/publication/265729668\\_Unsupervised\\_Classification\\_of\\_Ima](https://www.researchgate.net/publication/265729668_Unsupervised_Classification_of_Ima)

ges\_A\_Review

Olivera, W. (2018). *¿Qué es la gestión de riesgos? Entender los objetivos y conceptos.*

<https://www.heflo.com/es/blog/gestion-de-riesgos/que-es-gestion-de-riesgos/>

Oñate, C. (2018). *Análisis del estado de gobernanza del Refugio de Vida Silvestre Pasochoa*

[Pontificia Universidad Católica del Ecuador].

[http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/15883/ANALISIS\\_ESTADO\\_DE\\_GOBERNANZA\\_PASOCHOA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/15883/ANALISIS_ESTADO_DE_GOBERNANZA_PASOCHOA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Ose, K., Corpetti, T., & Demagistri, L. (2016). Multispectral Satellite Image Processing. *Optical Remote Sensing of Land Surface: Techniques and Methods*, 57–124.

<https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-102-4.50002-8>

Ossa, A., Giraldo, V., & Botero, E. (2015). *Metodología para Resolver por Diferencias Finitas Nuevos Modelos Constitutivos en el Programa FLAC3D.*

[https://www.researchgate.net/publication/342248545\\_METODOLOGIA\\_PARA\\_RESOLVER\\_POR\\_DIFERENCIAS\\_FINITAS\\_NUEVOS\\_MODELOS\\_CONSTITUTIVOS\\_EN\\_EL\\_PROGRAMA\\_FLAC3D](https://www.researchgate.net/publication/342248545_METODOLOGIA_PARA_RESOLVER_POR_DIFERENCIAS_FINITAS_NUEVOS_MODELOS_CONSTITUTIVOS_EN_EL_PROGRAMA_FLAC3D)

Padilla, O. (2007). Fundamento Teórico para Modelización de Variables Ambientales Mediante Operadores Difusos. *Geoespacial*, 4, 56–63.

[https://www.academia.edu/5008167/http\\_biblioteca\\_espe\\_edu\\_ec\\_upload\\_Geoespacial04\\_pdf\\_](https://www.academia.edu/5008167/http_biblioteca_espe_edu_ec_upload_Geoespacial04_pdf_)

Padilla, O., Cruz, M., & Andocilla, Lorena. (2012). *Implementación del Algoritmo de Lógica Fuzzy Aplicado a la Determinación del Grado de Suceptibilidad a Deslizamientos en el Área Monjas-Ferrovial-La Magdalena-Itchimbía del Distrito Metropolitano de Quito .*

Pinty, B., & Verstraete, M. (1992). GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio* 1992 101:1, 101(1), 15–20. <https://doi.org/10.1007/BF00031911>

Pisharoty, P. (1983). Introduction to remote sensing. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences Section C: Engineering Sciences*, 6(2), 97–107.

<https://doi.org/10.1007/BF02842927>

Plana, E., Font, M., & Serra, M. (2016). *Guideline for communicators and journalists*.

[http://efirecom.ctfc.cat/docs/efirecomperiodistes\\_en.pdf](http://efirecom.ctfc.cat/docs/efirecomperiodistes_en.pdf)

Prairie Climate Centre. (2022). *Forest Fires and Climate Change*. <https://climateatlas.ca/forest-fires-and-climate-change>

Prefectura de Imbabura. (2021). *Prefectura de Imbabura - Campaña para prevenir incendios forestales en la Provincia de Imbabura*.

<https://www.imbabura.gob.ec/index.php/noticias/blog-noticias/18-ambiente/586-campana-para-prevenir-incendios-forestales-en-la-provincia-de-imbabura>

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A., Kerr, Y., & Sorooshian, S. (1994). *A Modified Soil Adjusted Vegetation Index*. 48, 119–126. <https://pubag.nal.usda.gov/download/50306/pdf>

Queensland Government. (2022). *Prevention Preparedness, Response and Recovery Disaster Management Guideline*. <https://www.disaster.qld.gov.au/dmg/Pages/DM-Guideline.aspx#3.3>

Radhika, K. S. R., Venkateswara Rao, C., & Prasad, V. K. (2018). Comparison of Pixel Based Classification Using Kappa Analysis. *International Journal for Research in Engineering Application & Management (IJREAM)*, 04, 3. <https://doi.org/10.18231/2454-9150.2018.0424>

Ramírez, A. (2014). Lógica fuzzy, verdad y cognición. *Revista de Filosofía*, 70, 133–147. <https://doi.org/10.4067/S0718-43602014000100009>

Razmjooei, S., & Dudek, P. (2010). *Approximating Euclidean Distance Transform with Simple Operations in Cellular Processor Arrays*.

<https://personalpages.manchester.ac.uk/staff/p.dudek/papers/razmjooei-cnna2010.pdf>

Renda, E., Rozas, M., Moscardini, O., & Torchia, N. (2017). *Manual para la Elaboración de Mapas de Riesgo*. <https://www.mininterior.gov.ar/planificacion/pdf/Manual-elaboracion-mapas-riesgo.pdf>

- Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, J., Palacios-Orueta, A., & Bastarrika, A. (2002). Generation of fuel type maps from Landsat TM images and ancillary data in Mediterranean ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(8), 1301–1315. <https://doi.org/10.1139/X02-052>
- Richter, R. (1996). Atmospheric correction of satellite data with haze removal including a haze/clear transition region. *Computers & Geosciences*, 22(6), 675–681. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(96\)00010-6](https://doi.org/10.1016/0098-3004(96)00010-6)
- Richter, R., Kellenberger, T., & Kaufmann, H. (2009). Mediterranean School on Nano-Physics held in Marrakech-MOROCCO Comparison of Topographic Correction Methods Remote Sensing Comparison of Topographic Correction Methods. *Remote Sens*, 1, 184–196. <https://doi.org/10.3390/rs1030184>
- Robinne, N. (2021). *Impacts of disasters on forests, in particular forest fires*. [https://www.researchgate.net/publication/350850462\\_UNFF16\\_background\\_paper\\_Impacts\\_of\\_disasters\\_on\\_forests\\_in\\_particular\\_forest\\_fires](https://www.researchgate.net/publication/350850462_UNFF16_background_paper_Impacts_of_disasters_on_forests_in_particular_forest_fires)
- Rodríguez, E., & Hernández, G. (2019). *Manual de prácticas de laboratorio para el procesamiento de imágenes de satélite P R E S E N T A UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA*. 26–27. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/16682/MaterialDidactico.pdf>
- Rodríguez, V., & Bullock, S. (2013). Comparación espacial y temporal de índices de la vegetación para verdor y humedad y aplicación para estimar LAI en el Desierto Sonorense. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4, 611–623. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v4n4/v4n4a10.pdf>
- Roldán, A., Merino, S., González, F., García, S., & Cuevas, J. (2006). Minas de Riotinto (south Spain) forest fire: Burned area assessment and fire severity mapping using Landsat 5-TM, Envisat-MERIS, and Terra-MODIS postfire images. *J. Geophys. Res*, 111, 4–11. <https://doi.org/10.1029/2005JG000136>

- Ruiz, A. (2004). *La Predicción de la Humedad en los Restos Forestales Combustibles; Aplicación a Masas Arboladas en Galicia* [Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes]. [https://oa.upm.es/302/1/Ana\\_Daria\\_Ruiz\\_González.pdf](https://oa.upm.es/302/1/Ana_Daria_Ruiz_González.pdf)
- Saaty. (1987). The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Saaty. (2001). *Fundamentals of the Analytic Hierarchy Process* (pp. 15–35). Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-9799-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9799-9_2)
- Sahu, J., & Ram, S. (2018). *Forest Fire in India*. 1–2.
- Salcedo, D., Padilla, O., Morales, B., & Toulkeridis, T. (2017). Evaluación De Susceptibilidad a Deslizamientos Mediante Lógica Fuzzy y Técnicas De Evaluación Multicriterio en La Avenida Simón Bolívar, Quito. *GEOESPACIAL*, 1–20.
- Salgado, P. (2021). *Cartografía para modelos combustibles utilizando tecnologías geoespaciales para la predicción de incendios forestales en la Reserva Geobotánica Pululahua*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Sánchez, E. (2017). *Estudio de Capacidad de Carga de los Senderos Turísticos en el Refugio de Vida Silvestre Pasochoa*. Universidad Tecnológica Equinoccial.
- Santhosh, B., & Renuka, D. (2011). *Corrección Geométrica en Máximo Reciente Resolución Satélite Imágenes: Un caso Estudiar en Coimbatore, Tamil Nad*. 14. <https://docplayer.net/17676653-Geometric-correction-in-recent-high-resolution-satellite-imagery-a-case-study-in-coimbatore-tamil-nadu.html>
- Sathya, P. (2017). Analysis of Supervised Image Classification Method for Satellite Images. *International Journal of Computer Science Research*, 5(2), 16–19. [https://www.academia.edu/33546348/Analysis\\_of\\_Supervised\\_Image\\_Classification\\_Method\\_for\\_Satellite\\_Images](https://www.academia.edu/33546348/Analysis_of_Supervised_Image_Classification_Method_for_Satellite_Images)
- Sena, L. (2006). *Disaster Prevention and Preparedness*.
- Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. (2020). *SERFOR insta a pobladores de puno*

*evitar la quema de residuos agrícolas y pastos porque ocasionan incendios forestales.*

<https://www.serfor.gob.pe/portal/noticias/serfor-insta-a-pobladores-de-puno-evitar-la-quema-de-residuos-agricolas-y-pastos-porque-ocasionan-incendios-forestales>

Shandilya, K., Shukla, S., & Pathak, V. (2013). *Applications of Remote Sensing.*

[https://www.researchgate.net/publication/286241215\\_Applications\\_of\\_Remote\\_Sensing](https://www.researchgate.net/publication/286241215_Applications_of_Remote_Sensing)

Shepherd, J., & Dymond, J. (2003). Correcting satellite imagery for the variance of reflectance and illumination with topography. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 24, 3503–3514.

<https://doi.org/10.1080/01431160210154029>

SIGTIERRAS. (2016). *Fotografía Aérea y Ortofotos.*

[http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/MDT\\_SIGTIERRAS\\_16092016](http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/MDT_SIGTIERRAS_16092016)

SIGTIERRAS. (2022). *Descargas.* <http://www.sigtierras.gob.ec/descargas/>

Sivakumar, M., Roy, P., Harmsen, K., & Saha, S. (2003). *Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology World Meteorological Organization (WMO) India Meteorological Department (IMD) Centre for Space Science and Technology Education in Asia and the Pacific (CSSTEAP) Indian Institute of Remote Sensing (IIRS) National Remote Sensing Agency (NRSA) and Space Application Centre (SAC).*

<http://www.bishensinghbooks.com>

Small, C., Okujeni, A., Van der Linden, S., & Waske, B. (2018). Remote Sensing of Urban Environments. *Comprehensive Remote Sensing*, 1–9, 96–127.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10380-X>

Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434–440.

<https://doi.org/10.1016/J.RSE.2004.02.003>

Sowmya, D., Deepa, P., & Venugopal, K. (2017). Remote Sensing Satellite Image Processing Techniques for Image Classification: A Comprehensive Survey. *Article in International*

*Journal of Computer Applications*, 161(11), 975–8887.

<https://doi.org/10.5120/ijca2017913306>

Sreenivas, B., & Narasimha, B. (2011). *Processing of Satellite Image Using Digital Image Processing*.

[https://www.academia.edu/12828289/PROCESSING\\_OF\\_SATELLITE\\_IMAGE\\_USING\\_DIGITAL\\_IMAGE\\_PROCESSING](https://www.academia.edu/12828289/PROCESSING_OF_SATELLITE_IMAGE_USING_DIGITAL_IMAGE_PROCESSING)

Stefanov, W. (2004). *Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) image of 2000 Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM) image*. <https://sustainability-innovation.asu.edu/capiter/data/view/knb-lter-cap.237.9/>

Tarralba, J. (2013). *Generación de algoritmo para la identificación de Alerce (Fitzroya Cupressoides) mediante análisis de imágenes hiperespectrales en el lago Tagua-Tagua, X Región, Chile* [Universidad de Castilla ].

[https://www.researchgate.net/publication/332188185\\_Generacion\\_de\\_algoritmo\\_para\\_la\\_identificacion\\_de\\_Alerce\\_Fitzroya\\_Cupressoides\\_mediante\\_analisis\\_de\\_imagenes\\_hiperespectrales\\_en\\_el\\_lago\\_Tagua-Tagua\\_X\\_Region\\_Chile](https://www.researchgate.net/publication/332188185_Generacion_de_algoritmo_para_la_identificacion_de_Alerce_Fitzroya_Cupressoides_mediante_analisis_de_imagenes_hiperespectrales_en_el_lago_Tagua-Tagua_X_Region_Chile)

Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente. (2003). *Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente* . <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/TULSMA.pdf>

Théau, J. (2008). Temporal Resolution. *Encyclopedia of GIS*, 1150–1151.

[https://doi.org/10.1007/978-0-387-35973-1\\_1376](https://doi.org/10.1007/978-0-387-35973-1_1376)

Toutin, T. (2003). Geometric Correction of Remotely Sensed Images. *Remote Sensing of Forest Environments*, 143–180. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0306-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0306-4_6)

Turner, W., Spector, S., Gardiner, N., Fladeland, M., Sterling, E., & Steininger, M. (2003). Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends in Ecology and Evolution*, 18(6), 306–314. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00070-3](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00070-3)

Twele, A., & Erasmi, S. (2005). *Evaluating topographic correction algorithms for improved land*

*cover discrimination in mountainous areas of Central Sulawesi.*

[https://www.researchgate.net/publication/231338236\\_Evaluating\\_topographic\\_correction\\_algorithms\\_for\\_improved\\_land\\_cover\\_discrimination\\_in\\_mountainous\\_areas\\_of\\_Central\\_Sulawesi](https://www.researchgate.net/publication/231338236_Evaluating_topographic_correction_algorithms_for_improved_land_cover_discrimination_in_mountainous_areas_of_Central_Sulawesi)

U.S. National Park Service. (2017). *Wildland Fire Behavior U.S. National Park Service.*

<https://www.nps.gov/articles/wildland-fire-behavior.htm>

UCGIS. (2022). *Geospatial Analysis and Model Building.* <https://gistbok.ucgis.org/bok-topics/2022-quarter-01/geospatial-analysis-and-model-building>

United States Geological Survey. (2022). *EarthExplorer.* <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Valarezo, J. (2019). *Acción Andina Ecuador: Paisaje Pichincha – Aves y Conservación.*

<https://avesconservacion.org/accion-andina-ecuador-paisaje-pichincha/>

Vignesh, G. (2015). *Simulation of Spread of Forest Fire Using Cellular Automata Network*

[International Institute of Information Technology - Hyderabad].

[https://www.researchgate.net/publication/282974876\\_SIMULATION\\_OF\\_SPREAD\\_OF\\_FOREST\\_FIRE\\_USING\\_CELLULAR\\_AUTOMATA\\_NETWORK](https://www.researchgate.net/publication/282974876_SIMULATION_OF_SPREAD_OF_FOREST_FIRE_USING_CELLULAR_AUTOMATA_NETWORK)

Villegas, H. (2008). *Introducción a la Percepción Remota y sus Aplicaciones Geológicas.*

<https://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008002524448/documento/pdf/2105244481102000.pdf>

Vispute, P. (2022). A Brief Review of GPS, GIS and RS & Its Applications in Civil Engineering

Perspective. *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES) ISSN, 10, 31–35.* [www.ijres.org](http://www.ijres.org)

Viswambharan, V., & Lenhardt, J. (2019). *Introducing the Spectral Index Library in ArcGIS.*

<https://www.esri.com/about/newsroom/arcuser/spectral-library/>

Wacker, A., & Landgrebe, D. (1972). Minimum Distance Classification in Remote Sensing.

*LARS Technical Reports.* <https://docs.lib.purdue.edu/larstech/25>

World Wild Life [WWF]. (2020). *En 2020, los incendios forestales podrían ser peores que en*

*2019 para Sudamérica y el mundo | Historias | Descubre WWF.*

<https://www.worldwildlife.org/descubre-wwf/historias/en-2020-los-incendios-forestales-podrian-ser-peores-que-en-2019-para-sudamerica-y-el-mundo>

Yakubu, I., Mireku, D., & Duker, A. (2015). Review of methods for modelling forest fire risk and hazard. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 9(3), 155–165.

<https://doi.org/10.5897/AJEST2014.1820>

## Apéndices

