



Cartografía para modelos combustibles utilizando tecnologías geoespaciales para la predicción de incendios forestales en la Reserva Geobotánica Pululahua

Salgado Chávez, Paola Alexandra

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 Ingeniera Geógrafa y del Medio Ambiente

PHD. Padilla Almeida, Oswaldo Vinicio

25 de febrero del 2021



Urkund Analysis Result

Analysed Document: Salgado_Paola.docx (D91693902)
Submitted: 1/11/2021 3:13:00 PM
Submitted By: ovpadilla@espe.edu.ec
Significance: 2 %

Sources included in the report:

GONZALEZ_SOTO_UC20660_20200919_2001_c004.pdf (D79584827)
 TESIS JOSÉ GUILLERMO FLORES CUMBAL.pdf (D19494004)
https://www.researchgate.net/publication/319265479_Cartografia_de_alta_resolucion_de_modelos_de_combustible_forestal_metodologia_de_bajo_coste_basada_en_datos_LIDAR
<https://docplayer.es/30623949-Cartografia-de-modelos-de-combustible-del-monte-no-117-del-c-u-p-termino-municipal-de-cuenca-basada-en-datos-de-sensores-remotos.html>
<https://core.ac.uk/download/pdf/58908575.pdf>
https://www.researchgate.net/publication/329153698_Estimacion_de_Biomasa_Aerea_y_Carbono_con_Teledeteccion_en_Bosques_Alto-Andinos_de_Boyaca_Colombia_Estudio_de_caso_Santuario_de_Fauna_y_Flora_Iguaque
<https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/462/3/TMIPICYTE8E72016.pdf>
<https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-geoespacial/article/download/1264/936>

Instances where selected sources appear:

10

Firma:

Oswaldo
Padilla Almeida

Firmado digitalmente por Oswaldo Padilla Almeida
 Nombre de reconocimiento (DN): cn=Oswaldo Padilla Almeida, ou=Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, ou=Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción,
 email=ovpadilla@espe.edu.ec, c=EC
 Fecha: 2021.03.11 16:32:51 -05'00'

Padilla Almeida, Oswaldo Vinicio

DIRECTOR



**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, “**Cartografía para modelos combustibles utilizando tecnologías geospaciales para la predicción de incendios forestales en la Reserva Geobotánica Pululahua**” fue realizado por la señorita **Salgado Chávez, Paola Alexandra** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 11 de enero del 2021

Firma:

Oswaldo
Padilla Almeida

Firmado digitalmente por Oswaldo Padilla Almeida
Nombre de reconocimiento (DN): cn=Oswaldo Padilla Almeida, ou=Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, ou=Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción,
email=owpad@unpaep.edu.ec, c=EC
Fecha: 2021.01.11 16:34:42 -0500

Padilla Almeida, Oswaldo Vinicio

C. C.1709776650



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Salgado Chávez, Paola Alexandra**, con cédula de ciudadanía n°1720071339 declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Cartografía para modelos combustibles utilizando tecnologías geoespaciales para la predicción de incendios forestales en la Reserva Geobotánica Pululahua”**, 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, 11 de enero del 2021

Firma

Salgado Paola Chz.
.....

Salgado Chávez, Paola Alexandra

C.C.: 1720071339



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Salgado Chávez, Paola Alexandra**, con cédula de ciudadanía n°1720071339, autorizo/autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Cartografía para modelos combustibles utilizando tecnologías geoespaciales para la predicción de incendios forestales en la Reserva Geobotánica Pululahua”**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 11 de enero del 2021

Firma
Salgado Paola Cz.

Salgado Chávez, Paola Alexandra

C.C.: 1720071339

Agradecimiento

Agradezco principalmente a Dios por darme la sabiduría para culminar con éxito este proyecto, y por haber sido mi fortaleza durante toda mi carrera universitaria para mantenerme firme en mi caminar durante esta etapa.

A toda mi familia por su incondicional apoyo, especialmente a mi abuelito Manuel por haberme motivado a seguir esta carrera y a mi madre Wendy por ser de inspiración en cada instancia y por sus enseñanzas, a mi padre Leonardo, a mis hermanos Hernán y Wendy, por confiar en mí por estar en cada momento de mi vida y a mi abuelita Norma por sus palabras de aliento cuando sentía botar la toalla.

A los amigos Karlita y Fabricio que me acompañaron desde mis primeros semestres, a Fer, Michelle, Santiago, Luis, Mishel, las "Carishinas", al "Cuartel" y la "CECE" por haber hecho de esta etapa más llevadera junto a su amistad, y a mis amigos Meli, Mari, Andrea, por haber confiado siempre en mí y sobre todo por compartir momentos inolvidables que permanecerán grabados en mi corazón.

A Ramiro por su amor y compañía en mis largas desveladas y por brindarme su apoyo en esta última etapa, y a Guillermo por haber sido participe en la ejecución de mi trabajo de campo.

Además, quiero agradecer a los docentes que me ayudaron directa o indirectamente en la elaboración de este trabajo.

A mi tutor Dr. Oswaldo Padilla por su paciencia y apoyo tanto académico como personal otorgado no solo en el desarrollo de la tesis sino durante la carrera, al Ing. Santiago Rojas por su orientación y apoyo para el desarrollo de mi tesis, al Ing. Alexander Robayo y Ing. Mario Cruz. A la Universidad de las Fuerzas Armadas, alma mater de la educación, en especial a los profesores de la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente por brindarme sus conocimientos y por su formación profesional e integral.

Dedicatoria

La culminación de este proyecto representa mi fe en Dios, el amor a mis padres, mi esfuerzo y mi dedicación, perseverancia y constancia en mí misma, por lo dedico este trabajo principalmente a mi familia por el apoyo brindado a lo largo de este proceso, y por el esfuerzo; en especial a mi madre por el ejemplo de perseverancia y constancia para llegar a cumplir todo aquello que se propone, y a todas las personas que me acompañaron en este caminar.

Índice de Contenido

Urkund.....	2
Certificado del director del trabajo de titulación	3
Autoría de responsabilidad	4
Autorización de publicación de la ESPE	5
Agradecimiento.....	6
Dedicatoria.....	7
RESUMEN	16
ABSTRACT	17
Capítulo 1.....	18
Aspectos Generales	18
Antecedentes	18
Problema	19
Planteamiento del problema.....	19
Justificación e importancia	20
Área de influencia.....	21
Ubicación Geográfica	21
Objetivos.....	22
Objetivo General.....	22
Objetivos Específicos	23
Metas	23

Capítulo 2.....	24
Marco Teórico	24
Incendios Forestales	24
Factores de inicio de fuego	25
Causas de los incendios forestales.....	26
Causas estructurales.....	27
Causas inmediatas	27
Incendios en el Ecuador.....	28
Incendios en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ).....	29
Incendios en la Reserva Geobotánica Pululahua (RGP)	30
Combustibles Forestales.....	32
Clasificación de los combustibles forestales	32
Características de los combustibles.....	34
Modelos de Combustible.....	36
Modelo de Rothermel	37
Modelo Prometheus	39
Tecnologías Geoespaciales.....	40
Sistema de Información Geográfica.....	41
Imágenes satelitales.....	41
Aplicaciones de Sensores remotos.....	42
Características de los satélites	42

	10
Sentinel-2.....	42
SPOT- 6.....	43
Correcciones de las imágenes.....	45
Corrección atmosférica.....	45
Corrección Radiométrica.....	47
Corrección Geométrica	47
Corrección Topográfica	48
Clasificaciones.....	49
Clasificación no supervisada.....	50
Índices de vegetación	51
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	52
SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index):	53
GEMI (Global Environmental Monitoring Index):	54
NDII (Normalized Difference Infrared Index):	55
NBR (Normalized Burn Ratio) Key y Benson (2005):.....	55
IAQ (El Índice de Área Quemada) o BAI (Burn Area Index)	56
BAIM (Burn Area Index MODIS):	57
La biomasa en ecosistemas forestales.....	57
Estimación de biomasa basada en Percepción Remota	58
Las ecuaciones alométricas	59
Capítulo 3.....	61

Metodología.....	61
Selección de las imágenes satelitales.....	62
Modelo Digital del Terreno.....	64
Generación de la Geodatabase.....	67
Corrección atmosférica.....	69
Corrección topográfica.....	69
Trabajo de campo.....	71
Hoja de campo.....	71
Toma de puntos.....	73
Clasificación según modelos combustibles.....	74
Índices de vegetación.....	78
Clasificaciones.....	80
Clasificación no supervisada.....	80
Clasificación supervisada.....	81
Estimación de Biomasa.....	82
Cálculo del índice de Vegetación Normalizado para estimación de biomasa.....	83
Estimación de la biomasa aérea.....	84
Toma de datos en campo para estimación de biomasa.....	84
Estimación de la biomasa área.....	86
Toma de muestras.....	87
Ecuación de correlación.....	88

Capítulo 4	89
Resultados	89
Geodatabase.....	89
Identificación de coberturas vegetales	91
Índices de vegetación	94
Índice de vegetación Normalizado (NDVI).....	94
Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)	95
Proporción de quema normalizada (BNR)	96
Índice de monitoreo ambiental global (GEMI)	97
Cálculo de biomasa.....	98
Biomasa aérea de las coberturas vegetales.....	98
Ecuación de regresión.....	101
Biomasa aérea total.....	102
Clasificación no supervisada	102
Clasificación supervisada	105
CAPITULO 5	108
Conclusiones y Recomendaciones	108
Conclusiones	108
Recomendaciones.....	109
Referencias Bibliográficas	111
Anexos	118

Índices de Tablas

Tabla 1 <i>Tabla climática y datos históricos del tiempo de Quito</i>	30
Tabla 2 <i>Clasificación de los modelos combustibles según Rothermel</i>	37
Tabla 3 <i>Clasificación de los modelos combustibles según Prometheus</i>	39
Tabla 4 <i>Características de las bandas de Sentinel-2</i>	43
Tabla 5 <i>Características de las bandas de Spot 6</i>	44
Tabla 6 <i>Características de las clasificación supervisada y no supervisada</i>	49
Tabla 7 <i>Modelos alometricos genéricos más empleadas para la estimación de biomasa de leñosas perennes</i>	60
Tabla 8 <i>Puntos GPS</i>	73
Tabla 9 <i>Clasificación de los modelos combustibles según Rothermel en la RGP</i>	76
Tabla 10 <i>Clasificación de los modelos combustibles Prometheus en la RGP</i>	77
Tabla 11 <i>Fórmulas de índices de vegetación</i>	79
Tabla 12 <i>Cobertura vegetal</i>	84
Tabla 13 <i>Especies de árboles analizados en la Reserva Geotánica Pululahua</i>	87
Tabla 14 <i>Coberturas de la base de datos</i>	90
Tabla 15 <i>Cobertura Vegetal de la Reserva Geobotánica Pululahua</i>	91
Tabla 16 <i>Clasificación de Ecosistemas según Sierra</i>	93
Tabla 17 <i>Especies de Bosque Nativo</i>	98
Tabla 18 <i>Especies de Vegetación Arbustiva</i>	99
Tabla 19 <i>Especies de Vegetación Herbácea</i>	99
Tabla 20 <i>Especies de Mosaico Agropecuario</i>	100
Tabla 21 <i>Biomasa por cobertura vegetal en la Reserva Geobotánica Pululahua</i>	100
Tabla 22 <i>Datos de Biomasa por cobertura vegetal de la RGP</i>	101
Tabla 23 <i>Cálculo de biomasa por cobertura vegetal</i>	102

Índices de Figuras

Figura 1 <i>Ubicación Reserva Geobotánica Pulahua</i>	22
Figura 2 <i>Triángulo del fuego</i>	26
Figura 3 <i>Triángulo de comotamiento del fuego</i>	26
Figura 4 <i>Mirador de Veitanillas</i>	32
Figura 5 <i>Clasificación según el estado vital del combustible</i>	33
Figura 6 <i>Clasificación de los modelos combustibles según Prometheus</i>	39
Figura 7 <i>Metodología para la generación de cartografía de combustibles</i>	62
Figura 8 <i>Busqueda de imágenes satelitales</i>	63
Figura 9 <i>Descarga de imágenes Sentinel-2</i>	63
Figura 10 <i>Selección de imagen satelital Spot-6</i>	64
Figura 11 <i>Modelo Digital del Terreno</i>	65
Figura 12 <i>Mapa de pendientes</i>	66
Figura 13 <i>Mapa de sombras</i>	67
Figura 14 <i>Modelo cartográfico de base de datos</i>	68
Figura 15 <i>Corrección atmosférica</i>	69
Figura 16 <i>Metadatos de la imagen satelital</i>	70
Figura 17 <i>Aplicación de Corrección - C</i>	70
Figura 18 <i>Corrección topográfica</i>	71
Figura 19 <i>Formato de hoja de campo</i>	72
Figura 20 <i>Toma de puntos GPS en la RGP</i>	73
Figura 21 <i>Clasificación de los modelos combustibles según Prometheus</i>	74
Figura 22 <i>Toma de puntos GPS según tipo de combustible</i>	75
Figura 23 <i>Modelo cartográfico de índices de vegetación</i>	79
Figura 24 <i>Índices de vegetación</i>	80

Figura 25 <i>Modelo cartográfico clasificación no supervisada</i>	81
Figura 26 <i>Modelo cartográfico clasificación supervisada</i>	82
Figura 27 <i>Cálculo del índice NDVI</i>	83
Figura 28 <i>Toma de medidas de diametro de altura de pecho</i>	85
Figura 29 <i>Toma de distancia y ángulo de inclinación</i>	86
Figura 30 <i>Ubicación de muestras relaizadas en campo</i>	88
Figura 31 <i>Geodatabase de la Reserva Geobotánica Pululahua</i>	89
Figura 32 <i>Clasificación de Coberturas vegetales en la Reserva Geobotánica Pululahua</i>	92
Figura 33 <i>Clasificación de Ecosistemas en la Reserva Geobotánica Pululahua</i>	93
Figura 34 <i>Índice de vegetación Normalizada</i>	94
Figura 35 <i>Índice de vegetación ajustado al suelo</i>	95
Figura 36 <i>Proporción de quema Normalizada</i>	96
Figura 37 <i>Índice de monitereo ambiental global</i>	97
Figura 38 <i>Gráfica de la ecuación de regresión para estimación biomasa</i>	101
Figura 39 <i>Modelos combustibles de Rothermel</i>	103
Figura 40 <i>Modelos combustibles de Prometheus</i>	104
Figura 41 <i>Modelos combustibles de Rothermel</i>	105
Figura 42 <i>Modelos combustibles de Prometheus</i>	106
Figura 43 <i>Zonas propensas a incendios</i>	104

RESUMEN

El presente proyecto de investigación plantea la generación de cartografía de modelos combustibles en base a la utilización de imágenes satelitales y tecnologías de la geoinformación, aplicadas en la Reserva Geobotánica Pululahua, la misma que se encuentra ubicada en la ciudad de Quito. Uno de sus objetivos, es encontrar las peculiaridades del bosque y tipo de combustible característico, a través de imágenes satelitales y del trabajo de campo realizado, con el fin de identificar los modelos combustibles pertenecientes a Prometheus y Rothermel, haciendo uso de clasificaciones supervisadas y no supervisadas. Posteriormente, con el uso de imágenes satelitales, se logró realizar el cálculo de índices de vegetación como el NDVI (índice de vegetación normalizado), SAVI (índice de vegetación ajustado al suelo), GEMI (índice de monitoreo ambiental global) y BNR (proporción de quema normalizado), los mismos que sirven para determinar zonas quemadas. Adicionalmente, se emplearon imágenes satelitales para estimar la cantidad de biomasa forestal según el tipo de cobertura vegetal perteneciente a la Reserva Geobotánica Pululahua. Este proyecto se realizó con la finalidad de conocer la importancia de los modelos combustibles en un área muy propensa a incendios, lo que ayudará a la toma de la toma de decisiones claves sobre las acciones en tareas tanto de prevención como de extinción en incendios forestales. Se busca que esta investigación sirva de apoyo para las instituciones encargadas como el cuerpo de bomberos y pueda ser replicada en otras ciudades que se encuentran inmersas en esta problemática.

PALABRAS CLAVE:

- **MODELOS COMBUSTIBLES**
- **INCENDIOS FORESTALES**
- **INDICES DE VEGETACIÓN**

ABSTRACT

This research project proposes the generation of cartography of fuel models based on the use of satellite images and geoinformation technologies, applied in the Pululahua Geobotanical Reserve, which is located in the city of Quito. One of its objectives is to find the peculiarities of the forest and the characteristic type of fuel, through satellite images and the field work carried out, in order to identify the fuel models belonging to Prometheus and Rothermel, making use of supervised and non-supervised classifications. supervised. Subsequently, with the use of satellite images, it was possible to calculate vegetation indices such as NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), GEMI (Global Environmental Monitoring Index) and BNR (Normalized Burn Ratio), the same ones used to determine burned areas. Additionally, satellite images were used to estimate the amount of forest biomass according to the type of vegetation cover belonging to the Pululahua Geobotanical Reserve. This project was carried out with the purpose of knowing the importance of fuel models in an area very prone to fires, which will help to make key decisions about actions in both prevention and extinction tasks in forest fires. It is intended that this research serves as support for the institutions in charge such as the fire department and can be replicated in other cities that are immersed in this problem.

KEYWORDS:

- **FUEL MODELS**
- **FOREST FIRES**
- **VEGETATION INDICES**

Capítulo 1

Aspectos Generales

Antecedentes

Desde hace miles de años, el hombre utiliza el fuego como herramienta para labores agrícolas y ganaderas; lo que ha modelado la estructura de la vegetación, favoreciendo y manteniendo su diversidad, es así, que se lo considera como parte de un proceso natural al cumplir funciones para mantener el equilibrio de comunidades vegetales.

(Jàtiva, 2013)

Las técnicas ancestrales como quemas controladas de pastos lo mencionan Chuvieco y Martin (2004) “forman parte de la tradición de campesinos, pequeños productores y pueblos indígenas, son practicadas en diversas zonas del planeta a fin de establecer nuevos espacios aptos para la agricultura principalmente, modificando su ambiente geográfico”.

Dado el cambio del entorno climático, se tienen temperaturas más extremas, que provocan una vegetación en condiciones de sequía en efecto de la ausencia de lluvias y el aumento de vientos; estas condiciones propician que al darse un incendio forestal, el fuego salga de control y represente una amenaza potencial para los bosques y su biodiversidad, es decir que al no ser controlados alcanzan extensas superficies, provocando importantes pérdidas ecológicas, económicas y humanas. (FAO, 2008)

La implementación del monitoreo terrestre a través de la teledetección, permite realizar una mejor planificación en la prevención de incendios, no obstante, se presentan estadísticas preocupantes respecto a incendios forestales a nivel mundial; un ejemplar de ello es el incendio en Australia, que inició en el mes de diciembre del año 2019, y según informes de la BBC (2020) y Maxouris (2020) ha devastado aproximadamente 10 millones de hectáreas de bosque , alrededor de 500 millones de

animales, miles de casas y cientos de personas tras los incendios incontrolables en las diferentes zonas del país, llegando a pérdidas superiores a la combinación de países como Haití y Bélgica en superficie.

En el Ecuador se conoce que entre los años 2012 al 2018 se quemó un área correspondiente a 62.000 hectáreas de bosque que equivale a 87.000 canchas de fútbol, de las cuales la mayoría de incendios forestales fueron provocados en un 99% por el hombre; siendo la provincia más afectada la de Pichincha. (Bomberos, 2019).

En la Reserva Geobotánica del Pululahua mediante el informe de incendios forestales del Sistema Nacional de Información SNI (2019) se conoce que, en el mes de agosto del 2019 la reserva sufrió la pérdida de 91 hectáreas de bosque a casusa de un incendio forestal que tardo 10 días en ser controlado.

Por las razones expuestas, es normal que nazca la necesidad de combatir a los incendios forestales a nivel nacional y se busquen alternativas para reducir esta problemática.

Para reducir la cantidad de incendios forestales, se plantea la utilización de cartografía de modelos combustibles, la misma que proporciona información sobre el estado actual en que se encuentran las zonas de análisis y su posible respuesta de apoyo al emplear estos datos, con el fin de conocer una posible evolución del fuego; facilitando así la toma de decisiones en las tareas de prevención y extinción de un incendio forestal. (Chavero, 2013)

Problema

Planteamiento del problema

Los daños y las consecuencias ocasionadas por incendios forestales pueden provocar siniestros y pérdidas irreparables

La Reserva Geobotánica del Pululahua ha sufrido varios incendios forestales con pérdida de la biodiversidad, por lo tanto, el método de generación de cartografía de modelos combustibles, permite aportar a la predicción del comportamiento del fuego según el tipo de vegetación y su probabilidad de ignición.

Justificación e importancia

Los procesos antrópicos como la quema de vegetación, es realizada en actividades agrícolas, forestales y ganaderas, para limpiar terrenos o facilitar la cosecha en muchos ecosistemas. Sin embargo, la dependencia para recuperarse mediante el uso de fuego disminuye la calidad del suelo y su potencial productivo, mientras que en otros casos al provocarse los incendios pueden ser el causante de la devastación del bosque y su biodiversidad. (Jàtiva, 2013)

El efecto inmediato de los incendios forestales es la reducción de las funciones que cumplen las áreas afectadas (producción, protección o recreación); otra consecuencia del fuego es la creación y liberación a la atmósfera de gases y partículas que resultan de la combustión de biomasa. (Andreae, 1991)

Menciona Velazco (2013) la importancia del uso de los Sistemas de Información Geográfica representa una herramienta valiosa en la búsqueda de estrategias para la prevención de incendios.

Además, es indispensable para la prevención de incendios, desarrollar mediante herramientas SIG modelos que permitan la conjunción de las variables en relación con la incidencia del fuego, y tengan alta eficiencia en la representación de la vulnerabilidad real en el bosque según algunos factores para la propagación del fuego. Por esta razón, el generar cartografía de modelos combustibles a través del uso de imágenes

satelitales, permite establecer las condiciones donde se desarrolla el fuego y su comportamiento. (Chuvienco, E; Salas, J, 1995).

Debido a la gran cantidad de incendios forestales que se presentaron por el Sistema Nacional de Información y Emergencias SNI en los últimos años, en la provincia de Pichincha, y según la cantidad de pérdidas de biodiversidad generadas; se ve la relevancia de generar cartografía de modelos combustibles, que faculten el aporte a instituciones encargadas de combatir los incendios forestales como son el cuerpo de bomberos y el programa “Amazonía sin fuego”. También el interés de realizarlo en un área protegida es la Reserva Geobotánica Pululahua, que es el hogar de una gran variedad de especies.

Área de influencia

El área de influencia de la Reserva Geobotánica Pululahua según el Sistema Único de Información Ambiental (SUIA) (2011) son las poblaciones de Calacalí, San Antonio de Pichincha y Pomasqui.

Ubicación Geográfica

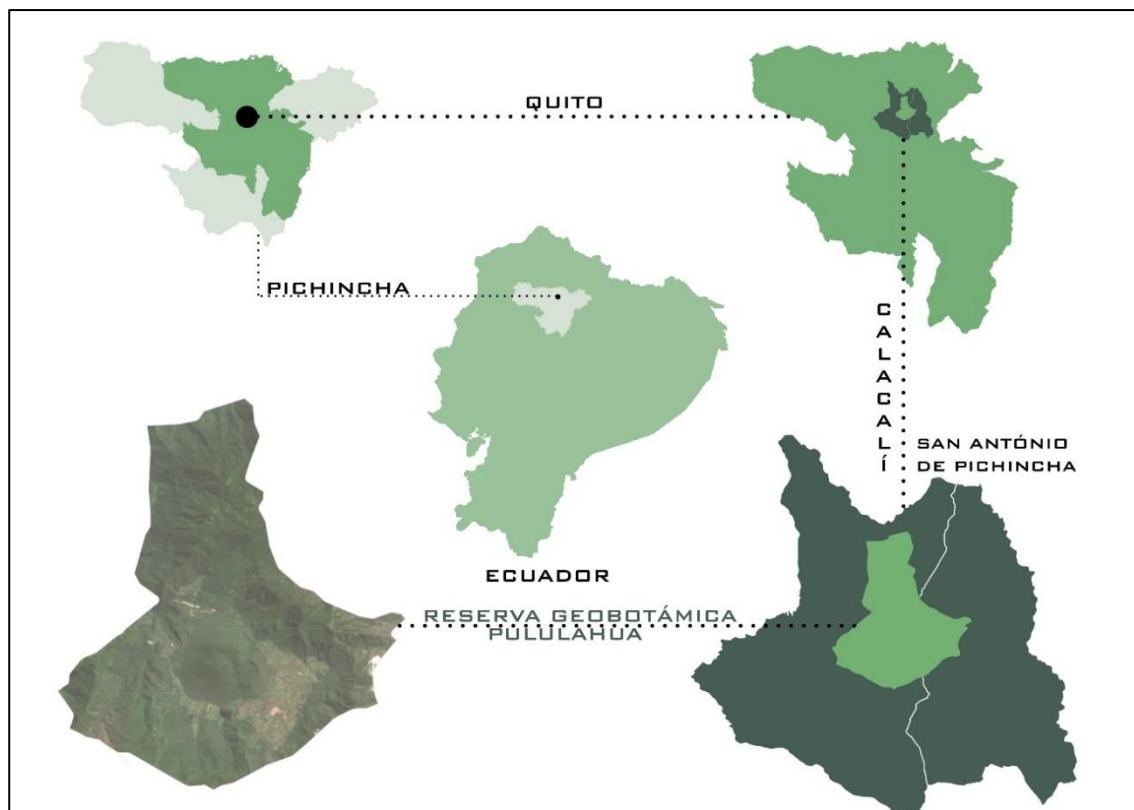
La Reserva Geobotánica Pululahua (RGP) se encuentra ubicada en la parte noroccidental de la provincia de Pichincha, ubicada a 17 kilómetros de Quito, cerca de la Mitad del Mundo, en las parroquias de Calacalí y San Antonio de Pichincha (figura 1). La reserva posee un área de 3.983 hectáreas y corresponde a las jurisdicciones del Distrito Metropolitano de Quito.

Los límites de la Reserva Geobotánica Pululahua son: al norte empieza en el cauce del Río Blanco sector de la hacienda Portalanza 0°06'00" N, 78°30'52" W. Al sur desde la elevación de La Marca 0°06'20" N, 78°29'25" W hasta elevación El Volcán 00°04'54" N, 78°29'17" W. (SUIA, 2011)

Al este avanza por el río El Aguacatal 00°04'54" N, 78°29'17" W. Al oeste parte desde la elevación El Volcán 00°04'54" N, 78°29'17" W hasta el Río Blanco 0°06'00" N, 78°30'52" W. (SUIA, 2011)

Figura 1

Ubicación Reserva Geobotánica Pululahua



Nota: El gráfico elaborado representa la ubicación de la Reserva Geobotánica Pululahua.

Objetivos

Objetivo General

Generar cartografía de modelos de combustibles para establecer el comportamiento de los incendios forestales en la Reserva Geobotánica Pululahua a través de herramientas geoespaciales como apoyo para la toma de decisiones en la prevención o extinción de los mismos.

Objetivos Específicos

- Recopilar la información para generación de cartografía de modelos de combustibles, mediante la descarga de imágenes satelitales e información característica de bosques y coberturas vegetales pertenecientes a la reserva.
- Realizar el diagnóstico actual con la información cartográfica recopilada, para determinar zonas propensas y con incidencias a incendios forestales en área de estudio.
- Clasificar las imágenes satelitales, mediante la clasificación supervisada y no supervisada para la identificación de los modelos representativos del bosque.
- Estimar la biomasa forestal mediante el uso de imágenes satelitales para establecer las características del ecosistema.
- Estructurar la cartografía de modelos combustibles con la información de incendios y modelos resultantes, para la predicción del comportamiento de incendios en la zona de estudio

Metas

- Generar una base de datos estructurada con la información de incendios.
- Realizar un mapa de la situación actual de las zonas de recurrencia de incendios forestales en la Reserva Geobotánica Pululahua mediante un análisis geoespacial
- Generar un mapa de cobertura vegetación.
- Estimar la cantidad de biomasa forestal de la Reserva Geobotánica Pululahua.
- Obtener los modelos combustibles característicos de la Reserva Geobotánica Pululahua.
- Elaborar un artículo científico para difundir los resultados obtenidos y la metodología de modelos combustibles empleada.

Capítulo 2

Marco Teórico

El presente capítulo abarca diversos temas en relación al desarrollo del proyecto de investigación, se basa en cinco ejes fundamentales. El primero involucra a los conceptos de incendio forestal, características, factores y causas que provocan su propagación, además de incendios forestales a nivel nacional, en el Distrito Metropolitano de Quito y en la Reserva Geobotánica Pululahua. El segundo eje muestra la clasificación y características de combustibles forestales. El tercero a la clasificación de modelos combustibles respecto a los 13 modelos de Rothermel y 7 modelos de Prometheus. El cuarto eje conceptualiza que son las tecnologías geoespaciales, imágenes satelitales, tipo de satélites empleados en el proyecto, el tipo de correcciones de imágenes, y índices de vegetación para quemas. El quinto en la estimación de la biomasa con el uso de sensores remotos y ecuaciones alométricas.

Incendios Forestales

Los incendios forestales han contribuido al deterioro de los recursos naturales y afectan a los bosques de todo el mundo con pérdidas irreversibles. No obstante, los esfuerzos realizados en la prevención y extinción de incendios forestales de forma recurrente, se dan episodios que generalmente interaccionan con los asentamientos e infraestructuras urbanas, poniendo en peligro a la población y llevando con ello a pérdidas económicas, humanas y ambientales. (Ressl & Cruz, 2012)

El uso de la tecnología para el establecer el comportamiento de un incendio es fundamental como soporte para mejores y más oportunas intervenciones. Los sensores remotos son herramientas utilizadas para el estudio espacial del ambiente y se destacan por su capacidad de seguir procesos dinámicos, que permiten realizar un

análisis del mapeo de los incendios forestales, logrando así proporcionar información relevante de la ocurrencia e intensidad del fuego, considerando las causas que lo originan, asumiendo que el riesgo de incendio aumenta con los cambios de uso de suelo, causado por la intervención de bosques originadas por actividades agrícolas e invasión de zonas residenciales, o pérdidas de bosque. (Chéret, 2007)

Los incendios forestales se producen por la combustión de la vegetación, a partir de un fuego originado por causas naturales o por causas humanas. Incendio forestal es la propagación no controlada del fuego. A menudo se usa de forma indistinta fuego e incendio, el primero es el elemento y el otro una expresión del mismo. El tipo de combustible permite diferenciar los fuegos/incendios urbanos de los forestales e incluso los de tipo agrícola, cuando afectan únicamente campos de cultivo. (Plana, Font, & Serra, 2016)

Se calcula que las actividades humanas ocasionan el 99% de incendios, y tan sólo el 1 % tiene como causas fenómenos naturales como descargas eléctricas y la erupción de volcanes. De acuerdo con el promedio en los diez últimos años, los incendios forestales se producen por actividades agropecuarias y de urbanización, junto con las acciones intencionadas y los descuidos de personas. (Forestal, 2010)

Factores de inicio de fuego

Para que se produzca un fuego es necesaria la coincidencia de tres elementos: una fuente de calor, el combustible y el comburente (figura 2)

Una vez originado, la propagación del incendio está influenciada por tres factores: el tipo de combustible, la climatología y la topografía, (figura 3). (Plana, Font, & Serra, 2016)

Figura 2*Triángulo del fuego*

Nota: El gráfico representa el triángulo de fuego y sus componentes necesarios para que la reacción de ignición y combustión tenga lugar. Tomado de la Los incendios forestales (pág. 7) por Serra M, 2016, Efirecom.

Figura 3*Triángulo del comportamiento del fuego*

Nota: El gráfico representa el triángulo del comportamiento del fuego y las variables que influyen en su grado de intensidad. Tomado de la Los incendios forestales (pág. 7) por Serra M, 2016, eFIRECOM.

Causas de los incendios forestales

Según PROMIF (2015) las causas de los incendios forestales, se dividen en dos tipos:

- **Estructurales:** Son las que dependen de factores intrínsecos del propio medio natural, es decir, condiciones permanentes, ecológicas y sociales.

- **Inmediatas:** Las que derivan de comportamientos antrópicos o de agentes naturales.

Causas estructurales.

Son de difícil modificación, a veces imposible, se pueden mencionar las siguientes:

- Características climáticas: Sequías, altas temperaturas estivales, fuertes vientos.
- Alta inflamabilidad de las especies vegetales asociadas a los tipos de ecosistemas.
- Gran acumulación de cargas de combustible.
- Uso extendido del fuego como herramienta tradicional en los trabajos agrícolas y ganaderos.
- El desconocimiento de la población en la fragilidad de los ecosistemas forestales ante un uso indebido del fuego.
- Las características morfológicas, con fuertes pendientes y relieves abruptos, facilitan la propagación de los fuegos.
- Estacionalidad del fenómeno que impide el establecimiento permanente de su combate.
- Dispersión territorial de las zonas de peligro.

Causas inmediatas

Como explica PROMIF (2015) los incendios forestales originados por agentes naturales o derivados de comportamientos humanos son de tres tipos:

- **TIPO I. Originados por descargas eléctricas:** Son consecuencia de las tormentas secas, muy comunes durante el verano.
- **TIPO II. Originados por negligencias:** Son los ocasionados por descuidos y actuaciones sin esperar aparición del incendio forestal tales como:

- Quemadas de pastos, quemadas en predios forestales y no forestales.
- Quemadas de residuos procedentes de trabajos silvícolas, quemadas en basureros y originados por máquinas agrícolas o forestales.
- Hogueras para comidas, luz y calor, fumadores, entre otros.
 - **TIPO III. De origen Intencionado:** Se da por múltiples motivaciones, acaban manifestándose a través de incendios forestales como:
 - Para ahuyentar animales que originan daños en cultivos y ganadería.
 - Para expresar la inconformidad por acotamiento de la caza o intencionados para obtener caza.
 - Por la disminución de las inversiones públicas en las zonas forestales.
 - Por pirómanos, delincuentes y contrabandistas.
 - Por agitadores en busca de malestar e inconformidad social o política, entre otros.

Incendios en el Ecuador

En el Ecuador, según el Sistema de Administración Forestal, en el reporte emitido el 12 de septiembre del 2019, se conoce que entre los años 2012 al 2018 se quemó un área correspondiente a casi 87.000 canchas de fútbol que equivales 62.000 hectáreas de bosque, donde un 99 % de los incendios fueron ocasionados por el hombre. (Ramos, 2019).

En el informe emitido por los Bomberos (2019) presenta a las provincias con mayor afectación por incendios forestales, en la zona andina son Pichincha, Loja, Imbabura, Carchi; y las tropicales Guayas y El Oro.

De estas cifras se conoce una mayor incidencia en la Sierra en los meses de septiembre y octubre, y en la Costa a partir de noviembre con la preparación de la tierra para los cultivos, siendo la provincia de Pichincha la más afectada. (Riesgos, 2019)

En el Ecuador la mayor parte de incendios forestales, son causados por la actividad humana (antropogénica), ya que consideran el uso del fuego como una herramienta de trabajo para la preparación de tierras, de cultivos, además de la renovación de pastizales y el cambio de uso del suelo. Las prácticas llevadas de manera inadecuada, antitécnica, constituyéndose en la principal causa, seguido de las quemas a través de acciones piromaniáticas y también actos inescrupulosos de personas que visitan las áreas naturales y bosques a lo que se puede asociar la falta de conocimiento e información sobre el uso controlado del fuego. (MAE, 2020)

Incendios en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ)

La ocurrencia de incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito es constante, y poco conocida en cuanto a su gestión y periodicidad. Los reportes presentados por El Cuerpo de Bomberos de Quito al considerar como incendios forestales, se relacionan con espacios periurbanos de la ciudad de Quito (laderas del Pichincha, zonas orientales de Quito y zonas de protección); espacios públicos correspondientes a vegetación arbustiva y arbórea del interior de la ciudad (bordes de quebrada, espacios vacantes o espacios de recreación), los mismos que están asociados a zonas inaccesibles y alejadas de la ciudad, y no poseen registros exactos en su base de datos para la respuesta a emergencias de incendios a estos sitios. (Estacio & Narváez, 2011)

En cada época de sequía (julio, agosto y septiembre), el DMQ es susceptible a la recurrencia de incendios forestales con diferentes consecuencias en términos de pérdida de áreas protegidas y de su gran biodiversidad, afectación a espacios de propiedad pública y privada de diferentes usos y, en general, repercusiones al bienestar de la población. (Estacio & Narváez, 2011)

Debido a la complejidad de registrar y georreferenciar las zonas de incendios forestales directamente en el terreno (por la dificultad de acceso y por la irregularidad de la morfología), por tal motivo, la generación de un estudio sobre incendios forestales potenciales constituye un primer paso hacia su comprensión y reducción de riesgos. (Estacio & Narváez, 2011)

Quito posee un clima templado y cálido, con gran presencia de lluvia incluso en meses con pocas precipitaciones. En Quito, la temperatura media anual es de 13.9 °C y una precipitación promedio de 123 mm, su variación anual es de 0.5°C como se observa a mayor detalle en la tabla 1.

Tabla 1

Tabla climática y datos históricos del tiempo quito

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Temperatura media (°C)	14	14	14	13.9	13.6	13.6
Temperatura min. (°C)	7.7	8	8.1	8	8	7.1
Temperatura máx. (°C)	20.4	20.1	20	19.9	20.2	20.2
Precipitación (mm)	120	137	163	189	116	56
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	13.7	13.8	13.9	14	13.8	14
Temperatura min. (°C)	6.7	6.6	6.8	7.5	7.3	7.6
Temperatura máx. (°C)	20.7	21.1	21.1	20.6	20.4	20.5
Precipitación (mm)	22	32	84	130	120	104

Nota: Esta tabla muestra la precipitación que varía de 22 mm el mes más seco a 189mm el mes más húmedo. Datos de: 1982- 2012. Tomado de Quito-clima Ecuador, por Climate, (2013), sitio web.

Incendios en la Reserva Geobotánica Pululahua (RGP)

El informe de incendios forestales del Sistema Nacional de Información SNI (2019) en la Reserva Geobotánica del Pululahua menciona que, en el mes de agosto del 2019 la reserva sufrió la pérdida de 91 hectáreas de bosque a causa de un incendio forestal

que tardó 10 días en ser controlado, en la que participaron alrededor de 600 personas para combatirlo, e intervino el programa "Amazonia sin fuego".

El incendio se localizó en una zona de difícil acceso por sus características físicas, por lo que las llamaradas llegaron a superar los cuatro metros de altura y los vientos cambiaban de 20 a 40 kilómetros por hora, registrados en la zona de laderas.

(Comercio, 2019)

Los encargados en las labores de combate y extinción de incendios forestales son generalmente los bomberos, militares y guarda parques, que se ubican en los flancos activos y zonas accesibles de la montaña, cuando deben combatir un incendio.

(Comercio, 2019)

La Reserva Geobotánica Pululahua es una zona montañosa, con vegetación tupida, morfología irregular y laderas pronunciadas que superan los 80 grados de inclinación (figura 4), lo que mencionan los Bomberos de Quito, "dificulta las operaciones de control del fuego".

De acuerdo al Ministerio del Ambiente (MAE), en ella habitan más de 140 especies de aves y 22 de mamíferos, entre los que se encuentran osos de anteojos (andinos), pumas, zorros y lobos de páramo, además, especies de reptiles y anfibios. Debido a la morfología del terreno, en los incendios suelen trabajar miembros del Grupo Táctico Forestal, una unidad especializada en el combate y control de incendios forestales en zonas agrestes, junto a miembros del Ministerio de Ambiente y de las Fuerzas Armadas.

(COMERCIO, 2019)

Figura 4

Mirador de ventanillas



Nota: La fotografía fue tomada en el mirador Ventanillas tomada por la autora.

Combustibles Forestales

Llamamos combustible forestal a toda la materia vegetal susceptible a arder. Su importancia de cara a los incendios forestales tiene relación directa con: Las características del combustible forestal influyen notablemente en la posibilidad de que se inicie un incendio, así como en su evolución posterior. De los tres factores que constituyen el triángulo de comportamiento del fuego, el combustible es el único sobre el que se puede actuar, tanto preventiva como durante las labores de extinción.

(Garrido, 2016)

Clasificación de los combustibles forestales

Según Garrido (2016) estos combustibles forestales se clasifican desde distintos puntos de vista:

➤ **Según su estado vital:**

- Combustibles vivos o verdes (herbáceas, especies arbustivas, arbolado).
- Combustibles muertos o secos (ramas caídas, hojarasca, troncos secos, árboles muertos, entre otros.). (Figura 5).

Figura 5

Clasificación según el estado vital del combustible



Nota: El gráfico representa a los combustibles forestales en su estado vital. Tomado de Incendios (pág. 2) por REMER, 2020.

La mayor o menor presencia de combustibles vivos o muertos depende de factores como la latitud, la altitud, el tipo de suelo, el clima, características de la especie y la masa.

➤ Según el estrato que ocupan en el terreno:

- Combustibles aéreos: copas (ramas y hojas) se encuentran por encima de 1,5 m sobre el suelo)
- Combustibles superficiales: va del suelo a 1,5 m de altura (hojas, ramas, troncos, arbustos, entre otros.).
- Combustibles subterráneos: raíces u otras partes vegetales que se encuentren dentro del suelo.

➤ Según su tamaño:

- Combustibles ligeros: diámetro inferior a 6 mm (hierbas, hojas, entre otros).
- Combustibles regulares: diámetro comprendido entre 6-25 mm (ramillas, arbustos, entre otras cosas.).
- Combustibles medianos: diámetro comprendido entre 25-75 mm (ramas y árboles pequeños).

- Combustibles gruesos o pesados: su diámetro supera los 75 mm (troncos, ramas gruesas).

➤ **Según su disponibilidad**

La disponibilidad varía según el tipo de vegetación y su estado, la época del año, la hora del día, su ubicación, condiciones meteorológicas y condiciones del incendio.

(Garrido, 2016)

- Combustible total: todo el combustible vegetal que está en el área afectada por el incendio.
- Combustible disponible: está en condiciones de arder y de consumirse en el fuego
- Combustible restante: no está en condiciones de arder y queda sin quemarse después del incendio.

Características de los combustibles

A continuación, estudiaremos las características de los combustibles que influyen en la posibilidad de inicio de un incendio forestal y en su propagación posterior. (Garrido, 2016)

- **Inflamabilidad y combustibilidad:** En un combustible forestal la inflamabilidad indica su mayor o menor capacidad para arder al aplicarle un foco térmico que se mide en relación al tiempo que tarda en emitir gases inflamables, lo cual evidencia la aparición de la llama. La combustibilidad es la forma en la que arden los combustibles una vez que se han inflamado, o, la mayor o menor facilidad que este combustible tiene para arder. (Garrido, 2016)
- **Cantidad de combustible:** Se refiere al peso seco de combustible por unidad de superficie (kg/m^2 o tm/m^2), que va a variar según cada una de

sus formaciones vegetales, pues, cuanto mayor sea la cantidad de combustible presente en el área de un incendio, mayor será la cantidad de calor desprendida y mayor será la intensidad del mismo. (Garrido, 2016)

- **Tamaño y forma:** La relación superficie/volumen es la cantidad de superficie de un combustible por unidad de volumen del mismo, influye directamente en la mayor o menor facilidad del mismo para arder: al intercambio de agua con el exterior es más rápido, la absorción del calor que producen los combustibles próximos que están ardiendo es más rápida y si tienen mayor contacto con el oxígeno.
- **Humedad:** La humedad del combustible se define como la cantidad de agua presente en él, expresada como porcentaje de su peso seco. Otro factor importante es la celeridad con la que un combustible gana o pierde humedad. Algunos métodos de extinción de incendios se basan en la aplicación de agua sobre los combustibles, con el objetivo de aumentar su contenido de humedad y, por lo tanto, reducir su inflamabilidad y combustibilidad. (Garrido, 2016)
- **Distribución espacial. Continuidad del combustible:** La existencia de continuidad horizontal dentro de un estrato, esto es, cuando no existen grandes huecos entre el combustible, favorece la propagación del fuego en dicho estrato. La presencia de barreras naturales o artificiales que creen discontinuidades en los combustibles impide, o al menos aminora, el avance del incendio en esa dirección. La continuidad vertical entre los combustibles de diferentes estratos favorece el paso de un fuego de superficie a un fuego de copas. (Garrido, 2016)

- **Composición química:** Los tejidos de los vegetales están constituidos fundamentalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. Algunos combustibles contienen también otros compuestos, como las ceras, resinas, terpenos, aceites, etc., que influyen notablemente en la inflamabilidad, ya que consiguen que estén disponibles para arder en condiciones que, de no contenerlos, no arderían. La presencia de estas sustancias hace que aumente la velocidad de propagación y la intensidad del fuego. (Garrido, 2016)

Modelos de Combustible

Los modelos de combustible son representaciones de las distintas estructuras de vegetación que podemos encontrar en la naturaleza, y son susceptibles de propagar un fuego. Para cada uno de estos modelos de combustible se realiza una descripción de la vegetación que lo compone y se le asocian los valores medios que alcanzarían determinados parámetros de un incendio, por ejemplo, velocidad de propagación, altura de llama, etc. (Garrido, 2016)

Según Garrido (2016) de esta forma, eligiendo el modelo de combustible que le corresponde a una determinada zona, podemos tener una predicción del comportamiento del fuego en ese lugar.

Para la clasificación de un modelo combustible el estrato vegetal es fundamental para definirlo en su comportamiento en propagación del fuego. Chavero (2013) menciona en su trabajo la importancia de “Ensayos de laboratorio y sobre el terreno permitieron obtener valores de la velocidad de avance del frente de llamas, longitud de llama, intensidad por metro de frente y calor por unidad de área desprendida por el frente de fuego”. Los resultados obtenidos de estos valores permiten predecir el comportamiento el fuego en caso de un incendio forestal.

Modelo de Rothermel

En la actualidad existen 13 modelos de combustibles para la predicción del comportamiento de los incendios forestales. De estos 13 modelos, 11 fueron desarrollados por Anderson y Brown, y publicados por Rothermel (1972) y Albini (1976). La tabla 2, se divide en cuatro grupos: pastos, matorral, hojarasca bajo arbolado y restos de corta y operaciones silvícolas. (Fernandez, 2011)

Tabla 2

Clasificación de los modelos combustibles según Rothermel

Grupo	Modelo	Descripción
Pastos	1	Pasto fino, seco y bajo (por debajo de la rodilla, hasta 30 cm), que recubre totalmente el suelo. El matorral o arbolado, se hay, se encuentra disperso cubriendo menos de un tercio de la superficie. Cantidad de combustible (materia seca): 1 - 2 t/ha.
	2	Similar al modelo 1, pero donde el matorral o arbolado cubre de uno a dos tercios de la superficie. Humedad de extinción = 15%. Cantidad de combustible (materia seca): 5 - 10 t/ha.
	3	Pasto grueso, espeso, seco y alto (alrededor de un metro). Los campos de cereales son representativos de este modelo. Cantidad de combustible (materia seca): 4 - 6 t/ha.
Matorral	4	Matorral o arbolado joven muy denso (de unos 2 metros de altura). Continuidad horizontal y vertical del combustible. La humedad del combustible vivo tiene gran influencia en el comportamiento del fuego. Cantidad de combustible (materia seca): 25 - 35 t/ha.
	5	Matorral denso y joven, pero bajo (según algunos artículos hasta un metro de altura y según otros hasta 0,6m). Poca presencia de material leñoso muerto. Cantidad de combustible (materia seca): 10 - 15 t/ha.
	6	Matorral similar al modelo 5, pero más alto (según algunos artículos más de un metro de altura y según otros de 0,6 hasta 1,2 m). Con menos combustible vivo que en el modelo 5, el conjunto es más inflamable que dicho modelo. Cantidad de combustible (materia seca): 10 - 15 t/ha.

Continúa...

Grupo	Modelo	Descripción
Matorral	7	Matorral muy inflamable, de hasta 2 metros de altura, o pinares de sotobosque. El incendio se desarrolla con mayores contenidos de humedad del combustible muerto que los otros. Cantidad de combustible (materia seca): 10 - 12 t/ha.
Hojarasca bajo el arbolado	8	La hojarasca forma una capa compacta, integrada por acículas cortas (5cm o menos) o por hojas planas no muy grandes. Poca o nula presencia de matorral. Cantidad de combustible (materia seca): 10 - 12 t/ha.
	9	Similar el modelo 8, pero la capa de hojarasca es menos compacta, más esponjosa y con mucho aire interpuesto. La capa está integrada por acículas largas o por hojas grandes y rizadas. Cantidad de combustible (materia seca): 10 - 12 t/ha.
	10	Bosque con material leñoso, caído naturalmente como consecuencia de vientos, plagas, madurez de la masa vegetal, etc. Presencia de vegetación herbácea y matorral que crece entre los restos leñosos. Cantidad de combustible (materia seca): 30 - 35 t/ha.
Restos de corta y operaciones silvícolas	11	Restos ligero recientes (con diámetros menores a los 76mm), restos de poda y zonas aclaradas con plantas herbáceas rebrotando. Los restos forman una capa poco compacta de hasta 30 cm de alto. Cantidad de combustible (materia seca): 30 - 35 t/ha.
	12	Restos más pesados que en el modelo 11 (de diámetros menores a los 76mm), predominan los restos sobre el arbolado, no hay combustibles vivos que influyan en el fuego. Los restos forman una capa poco compacta de hasta de 60 cm de alto. Cantidad de combustible (materia seca): 50 - 80 t/ha.
	13	Grandes acumulaciones de restos gruesos (de diámetros mayores a los 76mm) m cubriendo todo el suelo. Cantidad de combustible (materia seca): 100 - 150 t/ha.

Nota: Tomado de Geotecnologías y modelos de combustibles de Rothermel (págs. 10-12) por Fernández, 2011.

Modelo Prometheus

Descripción de los siete modelos de combustible propuestos en el proyecto europeo Prometheus, son una clasificación simple como se presenta en la tabla 3 (figura 6).

Tabla 3

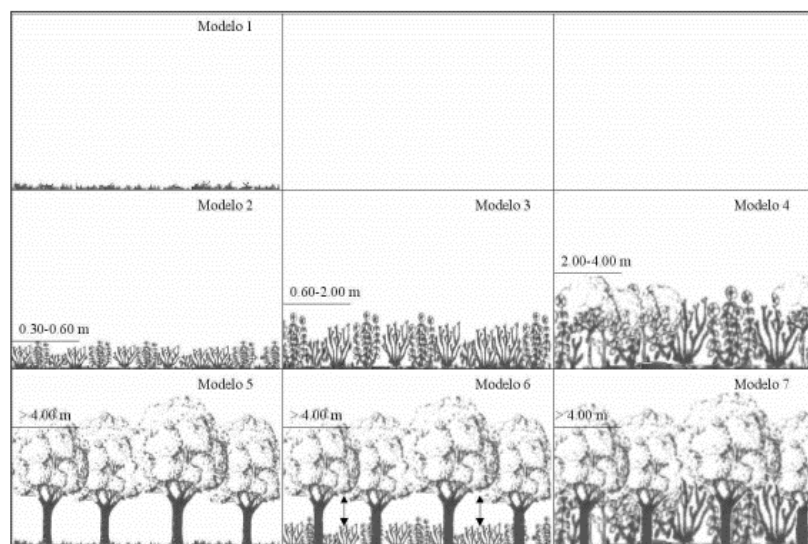
Clasificación de los modelos combustibles según Prometheus

Modelo	Característica
1	Pasto
2	Matorral (0.30-0.60 m)
3	Matorral (0.60-2.00 m)
4	Matorral (2.00-4.00 m)
5	Bosque sin combustibles de superficie (sin arbustos ni herbáceas)
6	Bosque con combustibles de superficie. Existe diferencia de altura entre los arbustos y las copas de los árboles
7	Bosque con combustibles de superficie. No existe diferencia de altura entre los arbustos y las copas de los árboles (continuidad vertical).

Nota: Tomado de Modelos combustibles (págs. 230-231) por Riaño, Chuvieco, 2000, Universidad de Alcalá.

Figura 6

Clasificación de los modelos combustibles según Prometheus



Nota: Tomado de Modelos combustibles (págs. 230-231) por Riaño, Chuvieco, 2000, Universidad de Alcalá.

Tecnologías Geoespaciales

El desarrollo de las tecnologías geoespaciales (TG) como se menciona en CONACYT (2020) ha cobrado un gran impulso diversificando cada vez más su aplicación. Desde las telecomunicaciones, la navegación asistida o autónoma y las ciudades inteligentes, se sustentan por las tecnologías geoespaciales.

En las últimas décadas, la disponibilidad de mapas digitales y servicios web de imágenes satelitales ha cambiado radicalmente el concepto de interconectividad del planeta, así como la importancia que se le da a mapas e imágenes. Actualmente el desarrollo de las tecnologías para la visualización de mapas forma parte de nuestro día a día. (Baker et al., 2012).

La conciencia de componente espacial y geográfico que se ha logrado en temas de interés con la sociedad, permite la representación de datos e imágenes en mapas, así como la familiarización con tecnologías para su visualización en diversos temas de importancia en nuestras vidas. (Jimenez, 2014)

Por lo tanto, los conceptos de TG y de Sistema de Información Geográfica (SIG), se engloban dentro de este concepto más amplio de Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs). Aunque en principio ambos conceptos (SIG y TG) puedan parecer sinónimos, se deben de establecer algunas diferencias importantes. Tradicionalmente se ha utilizado el término SIG para referirse al sistema complejo de adquisición, manipulación, gestión, y visualización, de todo tipo de información geográfica digital. (Baker, Kerski, Huynh, Viehring, & Bednan, 2012)

Sistema de Información Geográfica

La definición de Sistema de información Geográfica (SIG) no es simple, existiendo varias definiciones aceptadas con connotaciones ligeramente diferentes. Hay acuerdo en que se requieren 5 componentes básicos (hardware, software, datos, recursos humanos, procedimientos) y en que debe de cumplir 4 funciones básicas (adquisición de datos espaciales, almacenamiento y gestión, capacidades de análisis, y representación creación de mapas digitales). (Bosque-Sendra, 1997) (ESRI, 2010)

Un sistema de información geográfica es un marco de trabajo para reunir, gestionar y analizar datos. Arraigado en la ciencia geográfica, SIG integra diversos tipos de datos. Analiza la ubicación espacial y organiza capas de información para su visualización, utilizando mapas y escenas 3D. Con esta capacidad única, SIG revela el conocimiento más profundo escondido en los datos, como patrones, relaciones y situaciones, ayudando a los usuarios a tomar decisiones más inteligentes (Aeroterra, 2020)

Imágenes satelitales

Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (s,f) define a las imágenes satelitales como una representación visual de los datos reflejados de superficie de la tierra, que son capturados por un sensor montado en un satélite artificial que se encuentra fuera de la tierra. Estos datos recolectados de la tierra serán enviados a una estación terrena que posteriormente se procesan y se convierten en imágenes, enriqueciendo de esta manera al conocimiento de las características de la Tierra en diferentes escalas espaciales. (Inegi, s,f)

Las imágenes se presentan en formato ráster, que significa en sus componentes una matriz regular o rejilla de celdas. A cada una de ellas se le conoce como píxel y se le asigna un valor digital, que corresponde a la reflectividad recogida por el sensor. (Inegi)

Aplicaciones de Sensores remotos

Las imágenes satelitales, para usos civiles, empezaron a utilizarse en forma regular en la década de 1970 a partir del programa Landsat gestionado por la NASA y el US Geological Survey que consiste en una serie de misiones satelitales para la observación de la tierra. Los satélites de estas misiones, de los cuales hay dos actualmente en órbita y planes para otros a futuro, posibilitaron la adquisición de imágenes de todo el planeta en forma sistemática y el consiguiente desarrollo de aplicaciones para el monitoreo de recursos naturales, así como efectos antrópicos. (Mieza, Kovac, & Martinez, 2012)

Características de los satélites

Sentinel-2

El satélite europeo Sentinel-2 forma parte de la familia de misiones de la ESA dentro de su programa espacial Copernicus, es una misión de imágenes multiespectrales de alta resolución espacial (10m y 60m) en órbita polar, que sirve para el monitoreo de la tierra y está diseñado como una constelación de dos satélites: Sentinel-2A y -2B que obtienen información de la superficie de la tierra, con una revisita de 10 días individualmente y de 5 días conjuntamente. El lanzamiento de Sentinel-2A fue realizado el 23 de junio de 2015 y Sentinel-2B el 7 de marzo de 2017. (Bravo Morales, 2017)

La cámara multiespectral que lleva Sentinel-2 es de alta resolución, basada en otras misiones como SPOT y Landsat, con la diferencia que posee 13 bandas espectrales que aportan una nueva perspectiva de la superficie terrestre y de la vegetación (tabla 4). (GEODIM, 2018)

La cámara cuenta con dos grandes planos focales, uno en las bandas del visible (VIS) y del infrarrojo próximo (NIR) y el otro, en el infrarrojo medio (SWIR). Cada uno de ellos está equipado con 12 detectores con un total de 450.000 píxeles. (GEODIM, 2018)

Altura de órbita de los satélites es de 786 km aproximadamente, las mismas que son sincrónicas con el Sol, Sentinel-2B vuela a 180° opuesto a Sentinel-2A, y cubren las superficies terrestres, grandes islas, aguas continentales y costeras de la Tierra 84° N y 56° S cada cinco días. Las imágenes están disponibles de manera gratuita y pueden ser utilizadas en un rango amplio de aplicaciones. (Bravo Morales, 2017)

Tabla 4

Características de las bandas de Sentinel-2

Bandas	Sentinel-2	Longitud de onda (μm)	Resolución espacial (m)
Banda 1	Coastal aerosol	0.443	60
Banda 2	Blue	0.490	10
Banda 3	Green	0.560	10
Banda 4	Red	0.665	10
Banda 5	Vegetation red edge	0.705	20
Banda 6	Vegetation red edge	0.740	20
Banda 7	Vegetation red edge	0.783	20
Banda 8	NIR	0.842	10
Banda 8A	Vegetation red edge	0.865	20
Banda 9	Water vapour	0.945	10
Banda 10	SWIR- Cirrus	1.375	60
Banda 11	SWIR	1.610	20
Banda 12	SWIR	2.190	20

Nota: En la tabla muestra las bandas del satélite Sentinel-2. Tomado de Características de los satélites Sentinel (pág. 4) por MagsterGis,2019.

SPOT- 6

El satélite SPOT-6 fue lanzado el 9 de septiembre del 2012, como parte de la misión que realizaba el satélite SPOT, que lleva realizando imágenes de la Tierra en alta resolución desde 1986. (ASTRIUM, 2019)

Spot-6 tiene la capacidad de obtener imágenes similares a los satélites Pléyades. Pancromáticas y multiespectrales (R, G, B & NIR), véase tabla 5, a una distancia

terráquea de muestreo (GSD) de 1.5m. Tiene la capacidad de adquisición de 3 millones de km² al día, y con una revisión de 26 días. Cuentan con un instrumento óptico sobre el eje central, un sensor estelar con tres cabezales, un giroscopio de fibra óptica y cuatro ruedas de reacción giroscópicas. La resolución de las imágenes producidas: Pancromático: 1,5 m, color: 1,5m y Multiespectral: 6 m, y se encuentra a una altitud de la tierra de 694 km. (CONAE, 2017) & (GEOCENTO, 2020)

Opera en la misma órbita que el satélite SPOT-7, trabajando en conjunto con él para proporcionar imágenes de alta resolución (diariamente) el cual aumenta las posibilidades de obtener imágenes sin nubes. SPOT-6 continuará su misión hasta el 2022, ofreciendo así, un servicio de larga duración para la obtención de importante información.

Tabla 5

Características de las bandas de Spot-6

Bandas	Longitud de Onda (µm)	GDS(m)
Pancromática	0.450-0.745	1.5-2.5
1.Azul	0.450-0.520	6.0-10
2.Verde	0.530-0.590	6.0-10
3.Rojo	0.625-0.695	6.0-10
4.Infrarojos	0.760-0.890	6.0-10

Nota: En la tabla se muestra las características de las bandas del satélite Spot-6, Tomada de Spot 6 y 7 (pág. 3) por ASTRIUM,2019.

Niveles de Procesamiento

La asociación entre la ESA y el USGS permite la distribución de datos de reflectancia de nivel superior de la atmósfera (TOA).

Niveles de Procesamiento

El procesamiento del NIVEL 1C incluye las correcciones radiométricas y geométricas y a su vez la ortorrectificación y registro espacial en un sistema de

referencia global con precisión de subpíxeles, que permite generar productos geo localizados de alta precisión. El procesamiento de Level-1C se descompone en los siguientes pasos: (Bravo Morales, 2017)

- **Asociación de azulejos:** selección de azulejos predefinidos que intersecan la huella de la imagen requerida.
- **Cálculo de la rejilla de rejilla:** permite vincular la imagen de geometría nativa a la imagen de geometría de destino (orto-rectificada).
- **Re-muestreo de cada banda espectral** en la geometría de la orto imagen usando las rejillas de re-muestreo y un filtro de interpolación. El cálculo de las reflectancias TOA también ocurre en este paso.
- **Cálculo de máscaras:** se generan máscaras de nubes y tierra / agua.
- **Compactación de imágenes de las imágenes** de nivel 1C resultante mediante el algoritmo JPEG2000 y un encabezado codificado por imágenes geográficas GML

Correcciones de las imágenes

Corrección atmosférica

La corrección atmosférica trata de evaluar y eliminar las distorsiones que la atmósfera, introduce en los valores de radiancia que llegan al sensor desde la superficie terrestre. Por tanto, se va a basar en modelos físicos más complejos que modelos estadísticos utilizados anteriormente. El primer paso es convertir los Niveles Digitales (ND) almacenados por el sensor en valores de radiancia. (Geograf, s,f)

La corrección atmosférica sirve para intentar eliminar el efecto de la dispersión de la radiación electromagnética originada por parte de los gases y partículas en suspensión de la atmósfera, para que las variaciones en los modelos fueran independientes de las

condiciones atmosféricas. Para ello se calculó la reflectividad mediante la ecuación (1).

(Chuvienco E. , 1996)

$$\rho_k = \frac{K\pi(L_{sen,k}-L_{a,k})}{\tau_{k,o}(E_{o,k}\cos\theta_i\tau_{k,i}+E_{d,k})} \quad (1)$$

Donde:

ρ_k = Reflectividad en la banda

K = Distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas (1 UA = 1.49598· 10⁸ Km, varía a lo largo del año entre 0.983 y 1.017 UAs).

$L_{sen,k}$ = Radiancia espectral recibida por el sensor en la banda k (W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹).

$L_{a,k}$ = Radiancia atmosférica debida a la dispersión en la banda k (W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹).

$\tau_{k,o}$ = Transmisividad atmosférica para el flujo ascendente en la banda k.

$E_{o,k}$ = Irradiancia solar en el techo de la atmósfera en la banda k (W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹).

$\cos\theta_i$ = Coseno del ángulo cenital del flujo incidente (complementario del ángulo de elevación solar).

$\tau_{k,i}$ = Transmisividad atmosférica para el flujo descendente en la banda k.

$E_{d,k}$ = Irradiancia difusa atmosférica debida a la dispersión en la banda k (Wm⁻²sr⁻¹ μm⁻¹).

El método de corrección aplicado fue el de la transmisividad de la atmósfera descendente por defecto (Chávez, 1996) que utiliza en la ecuación 1 los siguientes valores:

$L_{a,k} = a_{o,k} + a_{i,k}ND_{min}$. El ND_{min} del histograma en la banda k.

$\tau_{k,o} = \cos\theta_o$. Como $\theta_o = 0$; $\tau_{k,o} = 1$.

Este método recurre al Nivel digital (ND) mínimo de cada banda como medida de la radiancia debida a la dispersión atmosférica, mientras que la transmisividad atmosférica para el flujo descendente se extrapola de experimentos físicos llevados a cabo sobre atmósferas reales sin cobertura nubosa. (David, 2000)

Corrección Radiométrica

La corrección radiométrica es una de las alternativas para tratar los valores de píxel de una imagen satelital, con el fin de obtener valores de intensidad homogéneos equilibrando histogramas o corrigiendo imperfecciones presentes en los píxeles. Existen distintos motivos que llegan a influir a que se produzcan estas distorsiones en las imágenes satélites al momento de ser receptadas, como pueden ser: fallos de los propios sensores, alteraciones en el movimiento del sensor o instrumento a bordo del satélite/avioneta o la interferencia de la atmósfera. La corrección radiométrica implica por una parte la restauración de líneas o píxeles perdidos y por otra la corrección del bandeo de la imagen. (Fing.edu, 2011)

Corrección Geométrica

La corrección geométrica ubica los píxeles en el espacio geográfico corrigiendo las posibles distorsiones. Dado que una imagen de satélite, al igual que las fotografías aéreas, no proporciona su información georreferenciada; es por ello, que cada píxel se ubica en un sistema de coordenadas arbitrario de tipo fila-columna como los que manejan los programas de tratamiento digital de imágenes. (Geograf, s,f)

El proceso de georreferenciación consiste en dar a cada píxel su localización en un sistema de coordenadas estándar (UTM (universal transversal de Mercator), Lambert, coordenadas geográficas) para de este modo poder combinar la imagen de satélite con otro tipo de capas en un entorno SIG, ya sean estas: vías, ríos, entre otros, para realizar estudios más completos. Tras la georreferenciación se obtiene una capa nueva en la que cada columna va a tener correspondencia con un valor de longitud y cada fila con un valor de latitud. Si la imagen satelital no hubiese sufrido ningún tipo de distorsión, el procedimiento sería bastante sencillo. (Geograf, s,f)

Para transformar cada punto de la imagen es importante realizar las correcciones de sus coordenadas arbitrarias (fila - columna) en coordenadas reales (X e Y UTM, por ejemplo). (Geograf)

Corrección Topográfica

Uno de los principales elementos que introducen errores en la georreferenciación son los cambios bruscos de altitud dentro de una imagen. Generalmente puede disponerse de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), es decir una capa ráster que contiene en cada celdilla su valor de altitud. Puede incorporarse este MDE al proceso de georreferenciación complicando algo más las ecuaciones de transformación: (Geograf)

David Riaño (2000) menciona que la corrección topográfica permite compensar las diferencias de iluminación solar, dadas por la variación de altura del terreno. Estas zonas conocidas como umbría al no corregirse presentan menor reflectividad de lo deben, por lo contrario que zonas en exposición al sol al presentar una reflectividad mayor a lo esperado. Para realizar la corrección topográfica es necesario calcular la iluminación (IL), es decir, el coseno del ángulo de incidencia (γ_i): (Riano, 2000)

$$IL = \cos\gamma_i = \cos\theta_p \cos\theta_i + \sin\theta_p \sin\theta_i \cos(\phi_a - \phi_o) \quad (2)$$

Donde:

θ_p = pendiente del terreno: La inclinación del terreno con respecto a la horizontal.

θ_i = ángulo cenital solar: El ángulo complementario de la elevación solar.

ϕ_a = ángulo azimutal solar: La dirección del sol con respecto al norte.

ϕ_o = ángulo de orientación: El ángulo existente entre el vector que señala el norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en ese punto.

Se eligió un método de corrección topográfica semiempírico conocido como corrección-c. (Teillet, 1982)

$$\rho_{\mu} = \rho_T \frac{(\cos\theta_i + c_k)}{(IL + c_k)} \quad (3)$$

Donde:

$$c_k = \frac{b_k}{m_k}; \text{ Para } \rho_T = b_k + m_k IL \quad (4)$$

Introduce un parámetro “ c_k ” que es el cociente entre la pendiente (b_k) y el término independiente (m_k) de la ecuación de regresión entre la ρ_T y la IL . (David, 2000)

Clasificaciones

La clasificación supervisada y no supervisada (tabla 6) permite explorar diferentes tipos de atributos o clases por medio del análisis estadístico multivariado, este proceso identifica los valores de cada píxel de una o varias bandas de una imagen ráster; crean y evalúa las clases o firmas, finalmente reclasifica de acuerdo a las probabilidades de cada clase. Este procedimiento es muy práctico para crear de forma automática un mapa de uso del suelo o de cobertura vegetal. (Arcgeek, 2020)

Tabla 6

Características de la clasificación supervisada y no Supervisada

Clasificación Supervisada	Clasificación No Supervisada
Se parte de un cierto conocimiento sobre la zona a clasificar, a partir del cual se obtienen los criterios de clasificación.	No se posee ningún conocimiento previo y de lo que se trata es de discriminar píxeles en función de una magnitud cuantitativa de diferenciación entre unos y otros.
Previamente se han de seleccionar muestras de cada clase constitutiva	Supone la búsqueda automática de grupos de valores homogéneos
Esas zonas, conocidas como zonas de interés.	La intervención humana se centra más en la interpretación de resultados que en la consecución de los mismos.
Son procesadas a fin de calcular estadísticas: media, rango, desviación típica, etc. de todas las bandas que intervienen en la clasificación	

Nota: Tomada de Fundamentos de la Teledetección (pág. 269) por Chuvieco, 2000.

Clasificación no supervisada

El algoritmo k-means

K-means es un algoritmo de clasificación no supervisada (clusterización) que agrupa objetos en k grupos basándose en sus características. El agrupamiento se realiza minimizando la suma de distancias entre cada objeto y el centroide de su grupo o cluster. Se suele usar la distancia cuadrática. (Uniovido, 2020)

El algoritmo consta de tres pasos:

- **Inicialización:** una vez escogido el número de grupos, k , se establecen k centroides en el espacio de los datos, por ejemplo, escogiéndolos aleatoriamente.
- **Asignación objetos a los centroides:** cada objeto de los datos es asignado a su centroide más cercano.
- **Actualización centroides:** se actualiza la posición del centroide de cada grupo tomando como nuevo centroide la posición del promedio de los objetos pertenecientes a dicho grupo.

Se repiten los pasos 2 y 3 hasta que los centroides no se mueven, o se mueven por debajo de una distancia umbral en cada paso. (Uniovido, 2020)

El algoritmo k-means resuelve un **problema de optimización**, siendo la función a optimizar (minimizar) la suma de las distancias cuadráticas de cada objeto al centroide de su cluster.

Los objetos se representan con vectores reales de d dimensiones $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n)$ y el algoritmo *k-means* construye k grupos donde se minimiza la suma de distancias de los objetos, dentro de cada grupo $\mathbf{S}=\{S_1, S_2, \dots, S_k\}$, a su centroide. (Uniovido, 2020)

El problema se puede formular de la siguiente forma:

$$\min_S E(\mu_i) = \min_S \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} \|x_j - \mu_i\|^2 \quad (5)$$

donde S es el conjunto de datos cuyos elementos son los objetos x_j representados por vectores, donde cada uno de sus elementos representa una característica o atributo. Tendremos k grupos o clusters con su correspondiente centroide μ_i . (Uniovido, 2020)

En cada actualización de los centroides, desde el punto de vista matemático, imponemos la condición necesaria de extremo a la función $E(\mu_i)$ que, para la función cuadrática (6) es

$$\frac{\partial E}{\partial \mu_i} = 0 \rightarrow \mu_i^{(t+1)} = \frac{1}{|S_i^{(t)}|} \sum_{x_j \in S_i^{(t)}} x_j \quad (6)$$

Las principales ventajas del método *k-means* son que es un método sencillo y rápido. Pero es necesario decidir el valor de k y el resultado final depende de la inicialización de los centroides. En principio no converge al mínimo global sino a un mínimo local. (Uniovido, 2020)

Índices de vegetación

Las claves para una evaluación de recursos naturales y su monitoreo es el análisis de la vegetación y la detección de los cambios de sus patrones. Es por ello que la detección y la evaluación cuantitativa de la vegetación verde constituyen una de las mejores aplicaciones de la percepción remota para la toma de decisiones. (Reinoso, 2016)

Los índices de vegetación se refieren a un conjunto de operaciones algebraicas efectuadas sobre los valores numéricos de los píxeles, donde se utilizan dos o más bandas pertenecientes a la misma escena para los cálculos a efectuarse. El Índice de

Vegetación puede ser calculado a través de sus valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, las mismas que se conocen en las bandas que conforman de cada imagen satelital, y según sus características son sensibles o no a la cubierta vegetal.

Gilabert, et. al (1997)

También, corresponde a un número generado por alguna combinación de bandas espectrales y que puede tener alguna relación con la cantidad de la vegetación presente en un píxel dado. Estos índices, son utilizados para mejorar la discriminación entre el suelo y la vegetación, reduciendo el efecto del relieve en la caracterización espectral de las diferentes cubiertas. (Reinoso, 2016)

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) según (Rouse, 1974) es utilizado como indicador del vigor de la biomasa vegetal, permite ser utilizado en estudios relacionados a la evaluación del comportamiento de cultivos, de vegetaciones boscosas naturales.

De acuerdo con Sánchez, et al. (2000) es el índice de vegetación más utilizado para todo tipo de aplicaciones por su facilidad de cálculo, y dispone de un rango de variación fijo (entre -1 y $+1$), lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes estableciendo un valor de $+1$ para la cubierta vegetal sana y densa y de -1 para las áreas que no tienen ninguna vegetación, lo cual lo hace más sencillo comparado con otros índices de vegetación más complejos, dando así por la sencillez en sus cálculo la facilidad de interpretación directa en los parámetros biofísicos de la vegetación. Sin embargo, varios autores resaltan la afectación que suele darse por el suelo y condiciones atmosféricas. (Reinoso, 2016)

De la misma manera Gonzaga (2014) utilizó este índice en el Ecuador, resalta las ventajas del NDVI al verificar la existencia de vegetación verde en la superficie,

pertenciente a un sector estudiado, así como también permite, identificar el cambio de su estado a lo largo de un periodo de tiempo en estudios multitemporales, que se asocian principalmente a las variaciones climáticas de cada región. Gonzaga (2014), menciona que el NDVI presenta algunos problemas en la estimación de la cubierta vegetal ya que cuando se encuentra con una cubierta superior al 50% este índice se satura y resulta insensible al verde cuando la cubierta vegetal es más escasa, lo que el autor del índice define como una contaminación espectral proveniente del suelo debido a la falta de cobertura, y esto provoca una sobre estimación o subestimación de la cubierta vegetal produciendo una información errónea. (Reinoso, 2016).

La ecuación de cálculo utilizada para la estimación del NDVI es la (7) como se observa a continuación. (Reinoso, 2016).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (7)$$

Donde:

ρ_{NIR} = banda del infrarojo cercano

ρ_{RED} = banda roja

SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index): el cual ha resultado ser sensible a la discriminación de la vegetación en zonas de vegetación dispersa. Huete (1998) Incorpora una constante de suelo, la cual se usa de acuerdo con la vegetación baja, intermedia o alta densidad. Considera la influencia de la luz y del suelo en el índice. La ecuación de cálculo de este índice es la (8). Se recomienda usar un valor de $L=0,5$ para un mejor ajuste. (Muñoz, 2013)

$$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} * (1 + L) \quad (8)$$

Donde el término L tiene en cuenta la diferencia en la transmisividad de la cubierta en el rojo y en el infrarrojo cercano. Se ha demostrado que el valor de 0,5 proporciona buenos resultados para una gran variedad de condiciones Huete (1998), y (1+L) es un factor que mantiene los valores de este índice en el mismo rango que el NDVI.

GEMI (Global Environmental Monitoring Index): Índice propuesto para imágenes del sensor AVHRR de NOAA con la finalidad de obtener un conocimiento global de la vegetación en todo el planeta.

Se creó como alternativa del NDVI ya que está menos afectado por el suelo y las condiciones atmosféricas Pinty y Vestrete (1992) Se ha probado también que es más apropiado para la cartografía de áreas quemadas que el NDVI. (Martin & Chuvieco , 2005)

Sus autores proponen este índice de vegetación como una combinación de bandas no lineal lo cual permite reducir la influencia de los efectos atmosféricos lo máximo posible, especialmente importantes cuando se observan superficies oscuras, como aquellas recientemente quemadas. (Reinoso, 2016)

Según Bastarrika (2009), comparado con el NDVI, este comportamiento permite disminuir la confusión entre las superficies quemadas y otras cubiertas más claras cercanas a la línea 1:1 en el espacio espectral Rojo-NIR. Pereira (1999) Indica que este índice posee la capacidad de discriminación que ha sido evidenciada en varios trabajos, demostró así una mayor capacidad del GEMI frente al NDVI en la discriminación de áreas quemadas su ecuación de cálculo es la numero (9) y (10).

$$GEMI = n(1 - 0.25n) - \frac{\rho_{RED} - 0.125}{1 - \rho_{RED}} \quad (9)$$

Donde

$$n = 2 * \frac{(\rho_{NIR}^2 - \rho_{RED}^2) + 1.5 \rho_{RED}}{\rho_{NIR} - \rho_{RED} + 0.5} \quad (10)$$

NDII (Normalized Difference Infrared Index): también denominado Normalized Burn Ratio (NBR). El índice NDII es utilizado por varios autores en el campo de la cartografía de áreas quemadas y para el estudio de la severidad del incendio, por diversos sensores como SPOT-VEGETATION, Landsat-TM con las bandas 4 y 7, entre otros ver formula (11). (Garcia & Chuvieco, 2004)

$$NBR = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}} \quad (11)$$

Concluyeron que la utilización de este índice aclaraba la confusión que se establece entre las áreas quemadas y, las láminas de agua y las sombras de nubes. Como se observa en la ecuación 5.

NBR (Normalized Burn Ratio) Key y Benson (2005): Según Gonzaga (2014) Este es uno de los índices más utilizado para cartografiar área quemada, así como para la identificación de los niveles de daño que ha sufrido la vegetación por incendios, ya que fue propuesto para la evaluación de dichas áreas.

Según Martin, Gómez y Chuvieco (2005) la diferencia entre las dos bandas con las que funciona la ecuación de cálculo (5) de este índice ofrece un mayor contraste entre las áreas previas del fuego y posteriores del fuego, en especial en áreas con cobertura forestal. La banda correspondiente al infrarrojo cercano es más sensible al contenido de clorofila que está directamente relacionada con la vitalidad de la planta, en cuanto a la región del infrarrojo medio es más sensible a los cambios del contenido de agua. Por lo cual al contrario de otros índices el NBR es más propicio para presentar valores más bajos en áreas quemadas después del incendio ya que ocurre una disminución de la reflectividad en el infrarrojo. Así mismo el autor afirma que la importancia de este índice

es que no solo fue diseñado para delimitar áreas quemadas, sino que permite identificar y evaluar el grado de severidad de estas áreas. (Reinoso, 2016)

IAQ (El Índice de Área Quemada) o BAI (Burn Area Index): definido por (Chuvieco & Martin , 1998) específicamente para la discriminación de áreas quemadas. Este índice se basa en la distancia establecida entre cada píxel y un valor espectral de referencia, al cual las áreas recientemente quemadas tienden a converger, como se observa en la ecuación (12):

$$BAIM = \frac{1}{(\rho_{CRED} - \rho_{RED})^2 + (\rho_{CNIR} - \rho_{NIR})^2} \quad (12)$$

Donde ρ_{CRED} y ρ_{RED} son las reflectividades de referencias en el rojo y en el infrarrojo cercano, respectivamente, y ρ_{RED} y ρ_{RED} son las reflectividades de cada píxel en dichas bandas. Los valores de los puntos de convergencia se definieron para imágenes AVHRR como 0,1 y 0,06 para el rojo e infrarrojo cercano, respectivamente, basándose en la literatura y en el análisis de varios grupos de imágenes de satélite. Estos valores según Ventura (2002). Tienden a enfatizar la señal del carbón de las áreas quemadas. Por otro lado, otros estudios han demostrado el potencial de las bandas del SWIR para la cartografía de áreas quemadas. Los resultados obtenidos pusieron de manifiesto que con los índices compuestos en parte o únicamente por la banda del SWIR se obtuvieron las mayores precisiones en las clasificaciones realizadas. (Pereira, 1999) & (Rogan & Franklin, 2001)

El contenido de agua de las plantas, representado por la banda del SWIR, se confirmó como un parámetro clave a la hora del seguimiento de variaciones en el estado de la vegetación a través de imágenes de satélite. A partir de la nueva generación de satélites en los cuales se incluyen bandas en el SWIR, se produjo la

generación de nuevos índices destinados a la delimitación de áreas quemadas. (Key & Benson , 2005)

BAIM (Burn Area Index MODIS): El BAI anteriormente descrito ha sido modificado con la inclusión de una banda del SWIR (1,3 - 2 μm), la cual se ha demostrado que es sensible a la discriminación de las áreas quemadas. Este nuevo índice se ha desarrollado para imágenes MODIS, utilizando el infrarrojo cercano y el SWIR (bandas 2 y 7 a 500 metros de resolución), las cuales se han mostrado como las mejores bandas para la discriminación de áreas quemadas (ver formula (13)). (Martin & Chuvieco , 2005) (Pereira, 1999)

$$BAIM = \frac{1}{(\rho_{cNIR} - \rho_{NIR})^2 - (\rho_{cSWIR} - \rho_{SWIR})^2} \quad (13)$$

Donde ρ_{cNIR} y ρ_{cSWIR} son las reflectividades de referencias en el rojo y en el infrarrojo cercano, respectivamente, y ρ_{NIR} y ρ_{SWIR} son las reflectividades de cada píxel en dichas bandas.

Los valores de los puntos de convergencia se definieron como 0,05 y 0,2 para el infrarrojo cercano y para el SWIR, respectivamente. (Oliva & Verdu , 2008)

La biomasa en ecosistemas forestales

Se encuentran varias definiciones de la biomasa, Person (2005) la menciona como la materia orgánica de origen animal o vegetal, que se puede aprovechar energéticamente, esta se compone de biomasa área, biomasa subterránea, detritos gruesos, detritos finos y el suelo. La biomasa aérea representa toda la biomasa viva por encima del suelo incluyendo el tronco, el tocón, ramas, corteza, semillas y hojas, mientras que la biomasa por debajo del suelo se compone de todas las raíces vivas excluyendo raíces finas (menores de 2 mm de diámetro) (Escobar, 2016)

Estimación de biomasa basada en Percepción Remota

La biomasa se calcula mediante el uso de la densidad de la unidad de biomasa y el área de crecimiento forestal. Esto se realiza con el fin de estimar la biomasa aérea, mediante el uso de sensores remotos en dos formas distintas, la primera opción busca estimar biomasa forestal por el uso de modelos estadísticamente establecidos con relación entre a sus patrones espectrales y realiza mediciones a especies en campo de biomasa o revisar registros de inventarios forestales que cuenten con características para su estimación. Al permitir que se midan de esta forma sus variables, se considera un método no destructivo, pues las diferentes variables a considerar en este caso son: medición de las copas, la altura del árbol, y el diámetro del fuste, a estos datos que se convierten a biomasa mediante el uso de ecuaciones alométricas que describen la relación existente entre las variables medidas en campo con la biomasa. (Brown & Lugo, 1997) (Foody, Boyd, & Cutler , 2003)

La estimación de los valores de biomasa según Zheng (2004) “se da por la combinación de la cantidad de energía de radiación en el espectro electromagnético que es emitida o reflejada por un objeto y el área circundante”. Dado que la observación del satélite equivale el tope de la radiancia en la atmosfera, la cual es un conjunto del dosel arbóreo y la radiancia atmosférica, por lo que su reflectancia es la que refleja propiedades forestales. (Hanes, 2014)

Según Zheng (2004) que para evaluar espacialmente la biomasa forestal distribuida a diferentes niveles como local, regional o global se utiliza la teledetección como herramienta para derivar la estructura del bosque y su biomasa aérea. La metodología empleada por sensores remotos permite establecer los procesos y características de los ecosistemas a diversas escalas, dado el nivel de detalle en cada una de ellas, pues

según su resolución se pueden obtener de grandes áreas de interés. Así como también, las estimaciones tienen que tener un vínculo con índices de vegetación. (Hanes, 2014)

La razón por la que se emplean los índices de vegetación tales como: NDVI, SAVI, entre otros, es porque mejoran la interpretación de la vegetación, al reducir al mínimo la influencia de la radiación solar, el ángulo solar, el ángulo de visión del sensor, y los efectos de la atmósfera y el suelo, según como se calculen. (Huete A. R., 1988) (Richardson & Everitt, 1992) (Hanes, 2014)

Las ecuaciones alométricas

Los métodos alométricos permiten predecir la producción de biomasa en una forma no destructiva. Un método indirecto para la estimación de biomasa consiste en generar ecuaciones a partir de los datos generados en inventarios forestales o variables colectadas en terreno mediante las cuales es posible estimar la biomasa a partir del volumen del árbol, en función a su densidad y un factor de expansión para determinar el peso seco total. (Fonseca, Ruiz, & Rojas, 2013)

Afirma (Alvarez, 2008) que el volumen es una expresión que abarca la cantidad de madera contenida en los rodales. En consecuencia, una forma de acceder al conocimiento del volumen es a través de tablas de volumen, modelos de volumen, modelos matemáticos capaces de representar el volumen medio de madera por árbol a partir de las variables independientes, como es el diámetro a la altura del pecho (dap) y altura total (ht). (Fuccaraccio & Staffieri, 1999)

Al presentarse una continua dificultad para determinar directamente el volumen, mediante la cubicación de secciones, conviene contar con expresiones matemáticas que se basen en una muestra seleccionada cuidadosamente y objetivamente, que permite estimar el volumen de los árboles sobre una base de mediciones simples.

Según Segura y Kannien (2005) “Los modelos alométricos de biomasa y/o carbono son una herramienta útil para obtener estimados de la biomasa aérea total y del carbono almacenado en sistemas forestales y agroforestales”. Se define a modelos alométricos como ecuaciones matemáticas desarrolladas para describir el comportamiento de una variable (dependiente) ya sea esta el volumen, biomasa o carbono en árboles individuales. (Sit & Poulin-Costello, 1994)

Loestch y Haller (1973) muestran algunos modelos alométricos genéricos más empleados para la estimación de volumen, biomasa o carbono de árboles, arbustos y palmas (Tabla 7).

Tabla 7

Modelos alométricos genéricos más empleadas para la estimación de biomasa de leñosas perennes.

Nombre	Ecuación
<i>Berkhout</i>	$B = a + b * dap$
<i>Kopezky</i>	$B = a + b * dap$
Hohenadl-Krenn	$B = a + b * dap + c * dap$
Huach	$\ln(B) = a + b * \ln(dap)$
Spurr	$B = a + b * dap * ht$
Stoate	$B = a + b * dap + c * dap * ht + d * ht$
Mayer	$B = a + b * dap + c * dap * ht + d * dap * ht$
Scumacher-Hall	$\ln(B) = a + b * \ln(dap) + c * \ln(ht)$

Nota: La tabla presenta las distintas ecuaciones alométricas donde B: Biomasa arriba o abajo del suelo (kg planta⁻¹), dap: Diámetro a la altura de pecho (cm), ht: Altura total (m). Tomada de Allometric models for tree volumen (págs. 2-8) por Segura & Kannien, 2005.

Se puede estimar la biomasa aérea total de especies forestales mediante métodos directos (destructivos) o indirectos (modelos de biomasa o volumen). El cálculo directo de un modelo matemático se conoce a La forma de obtener el volumen o biomasa de un individuo. Segura y Kannien (2005) indican que “los modelos son específicos para cada tipo de ecosistema, zona de vida, especie o grupo de especies”. (Alvarez, 2008)

Capítulo 3

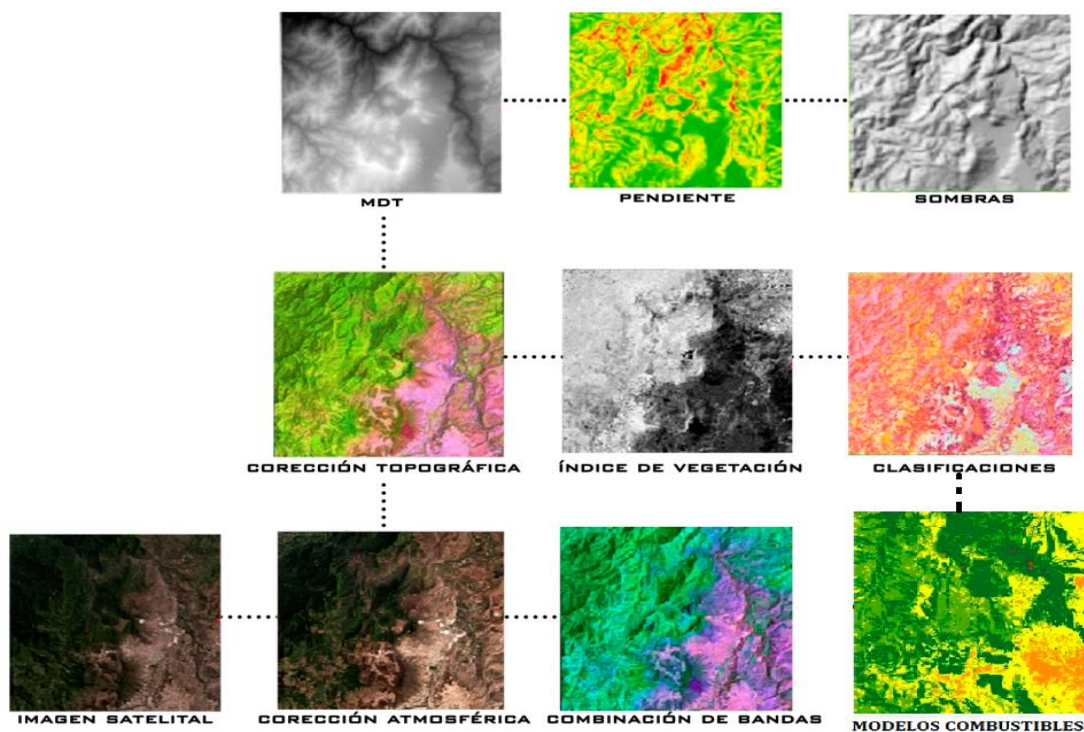
Metodología

El presente capítulo explica la metodología empleada para el cumplimiento de los objetivos propuestos, abarca los métodos empleados en la recopilación de la información base, en la obtención y especificación de los modelos empleados para el desarrollo del proyecto, en la elaboración de la base de datos con la información recopilada en el proceso, al igual que las correcciones que se realizaron a las imágenes satelitales, posterior a ello el cálculo de índices de vegetación que se emplearon para las imágenes recopiladas, la clasificación y generación de modelos y el cálculo de biomasa para su análisis como se describe a continuación (figura 7).

- Revisión y selección de las imágenes satelitales.
- Revisión del modelo digital del terreno (MDT) y generación de los mapas de pendientes y sombras (para el proceso de corrección topográfica) y como capas de información auxiliar para la clasificación.
- Elaboración de la Geodatabase con la información recopilada
- Corrección atmosférica de las imágenes satelitales.
- Corrección del efecto topográfico, para evitar las distorsiones que se generan por la iluminación en distintas zonas de las imágenes satelitales.
- Generación de índices de vegetación que sirvan de capas auxiliares para la clasificación digital.
- Realización de trabajo de campo para la toma de datos, recopilación fotográfica e identificación de las áreas de importancia, para la posterior clasificación digital.
- Procesamiento de los datos para la clasificación digital y estimaciones de biomasa.
- Generación de modelos combustibles con la integración de variables obtenidas.

Figura 7

Metodología para generación de cartografía de combustibles



Nota: El esquema representa la metodología empleada para la clasificación de modelos combustibles.

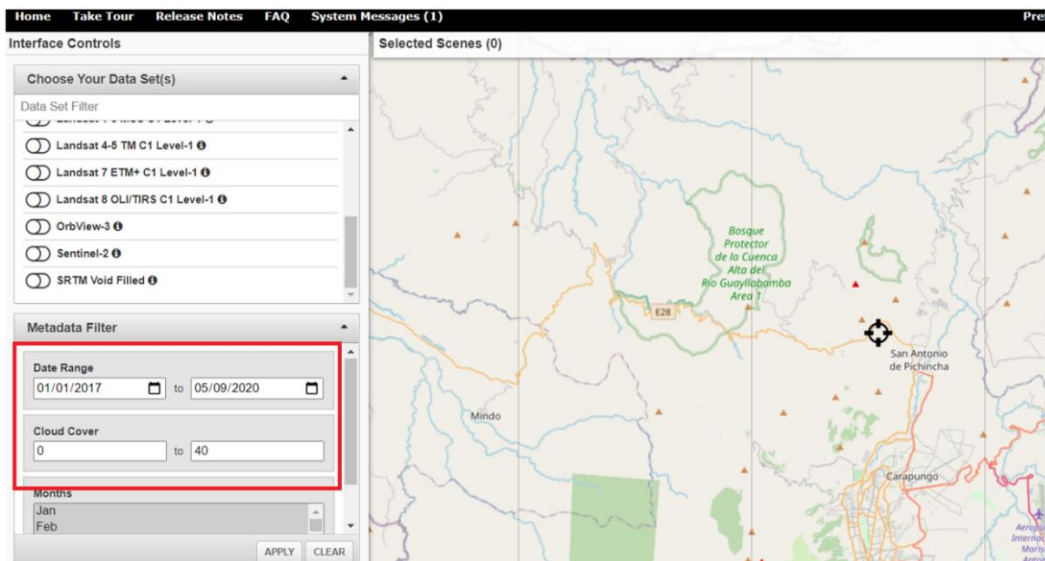
Selección de las imágenes satelitales

Una vez definida la zona de estudio, se procedió a ubicar el área de la Reserva Geobotánica Pululahua en la plataforma de búsqueda para la obtención de las imágenes satelitales. Como paso posterior se establecieron los parámetros para filtrar las imágenes por fechas de interés y por porcentaje de nubosidad (figura 8).

Luego de la revisión de las imágenes satelitales caracterizadas por los parámetros antes mencionados, se seleccionó y descargó las imágenes con el menor porcentaje de nubosidad en la zona de estudio pertenecientes al satélite Sentinel-2, mismas que serán utilizadas para el desarrollo del proyecto. (figura 9).

Figura 8

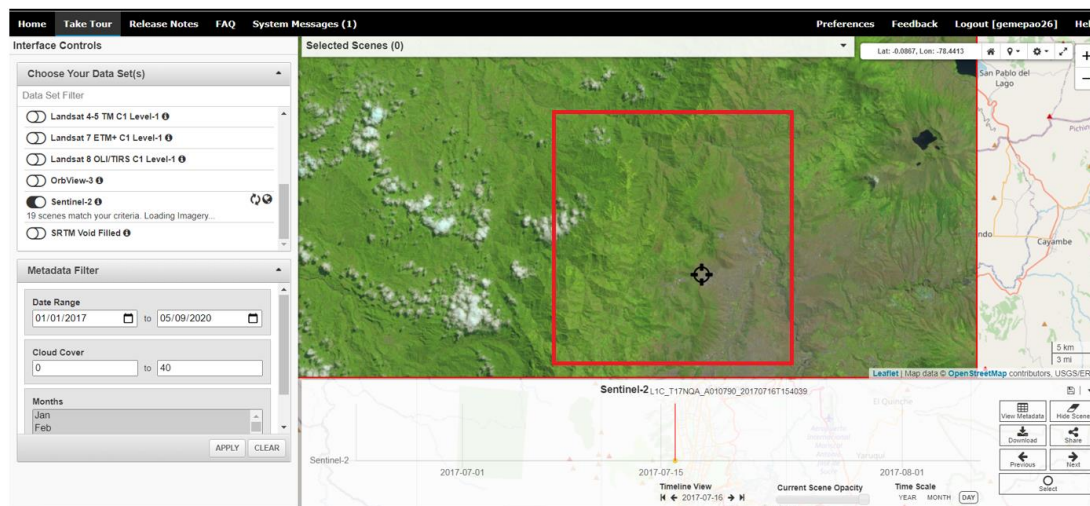
Búsqueda de imágenes satelitales



Nota: El gráfico representa los parámetros definidos de nubosidad y el rango de fecha. Tomado de la USGS-Glovis,2020.

Figura 9

Descarga de imágenes Sentinel-2

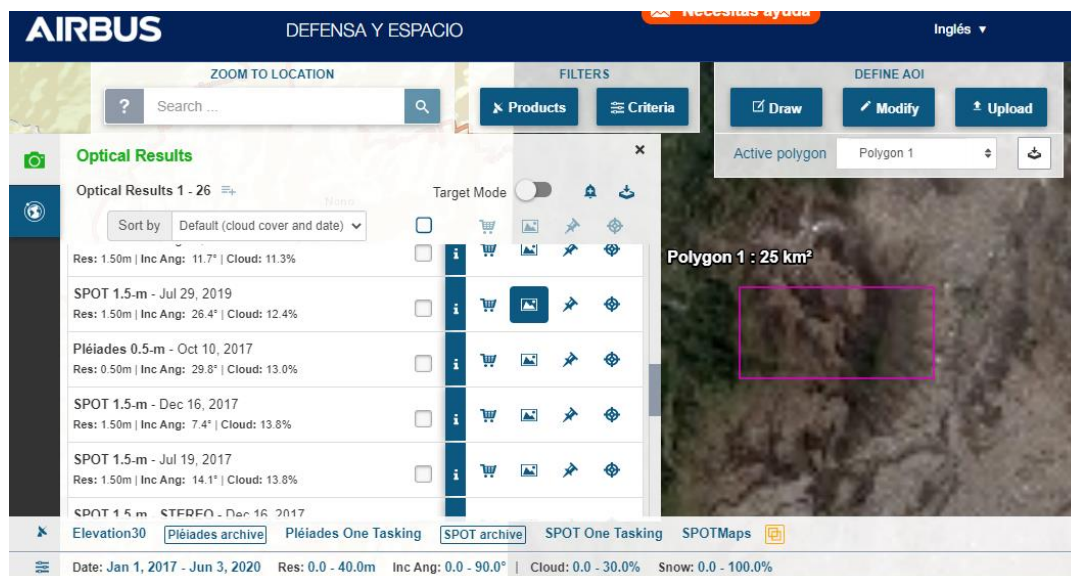


Nota: El gráfico muestra la elección de imágenes satelitales. Tomado de USGS-Glovis,2020.

Adicional a ello se obtuvo de cortesía una imagen satelital SPOT -6 perteneciente a la zona de estudio (figura 10).

Figura 10

Selección de imagen satelital SPOT-6



Nota: El gráfico representa la plataforma AIRBUS para la elección de la imagen Spot-6. Tomado de AIRBUS,2020. Cortesía de AGP Geoespacial.

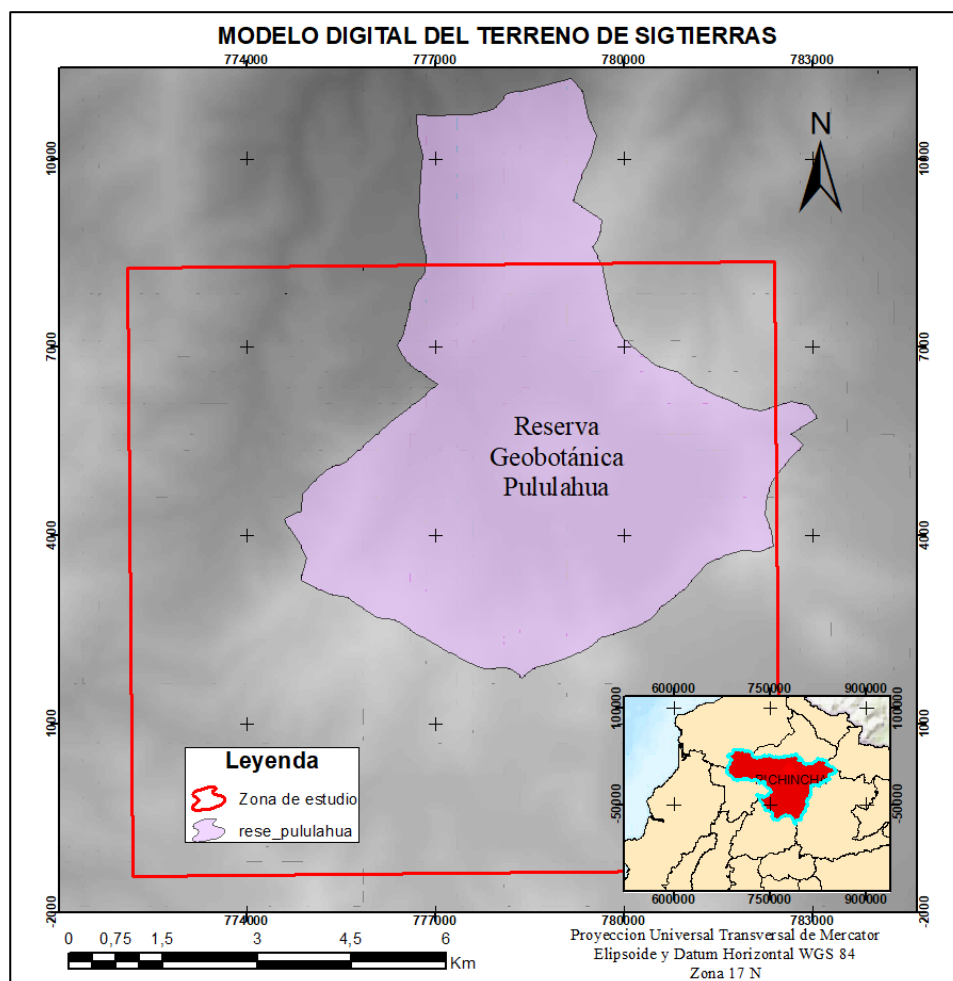
Modelo Digital del Terreno

El modelo digital del terreno (MDT) que se utilizó en el proyecto fue del Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTIERRAS), para la generación de los mapas de pendientes y sombras, y principalmente para realizar las correcciones topográficas de las imágenes satelitales. Este MDT se encuentra con una resolución espacial de 3m para la Sierra y Costa y 5 m para la Amazonia (figura 11).

El MDT muestra las alturas sobre el nivel medio del mar para un área específica. Por ello, constituye un insumo cartográfico esencial, puesto que se complementa con la ortofotografía al proveer del componente altimétrico, información sumamente útil. (SIGTIERRAS, 2016)

Figura 11

Modelo Digital del Terreno



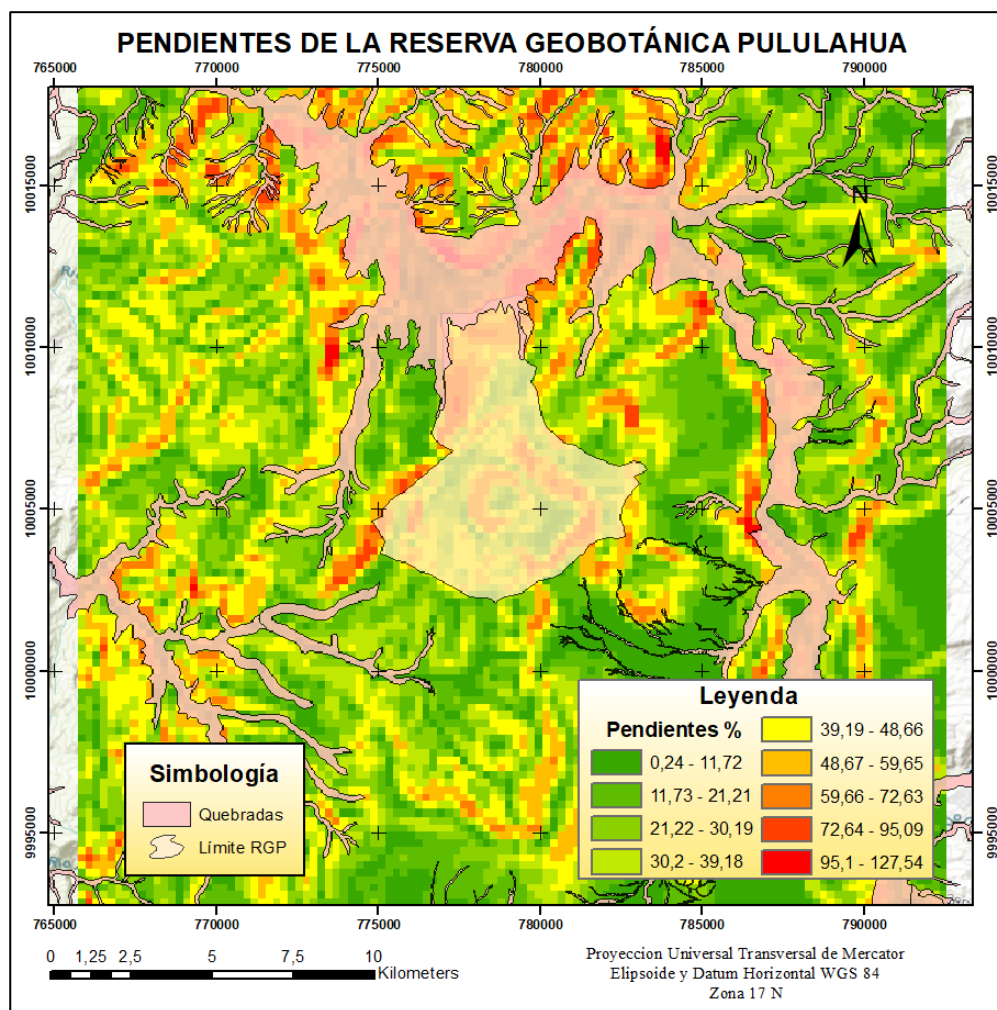
Nota: Mapa del modelo del terreno en la Reserva Geobotánica Pululahua en base al Modelo Digital del Terreno de SIGTIERRAS.

Una vez obtenido el MDT se realizaron dos aplicaciones con el mismo, que son los mapas de pendientes (figura 12) y sombras (figura 13).

El principal factor local es el topográfico, dado que limita la energía solar incidente sobre la superficie terrestre. La variedad de altitudes, pendientes y orientaciones crean fuertes contrastes locales que afectan directa e indirectamente a procesos biológicos y físicos. Algunos de estos factores son modelizables con los MDT. (Geograf, 2000)

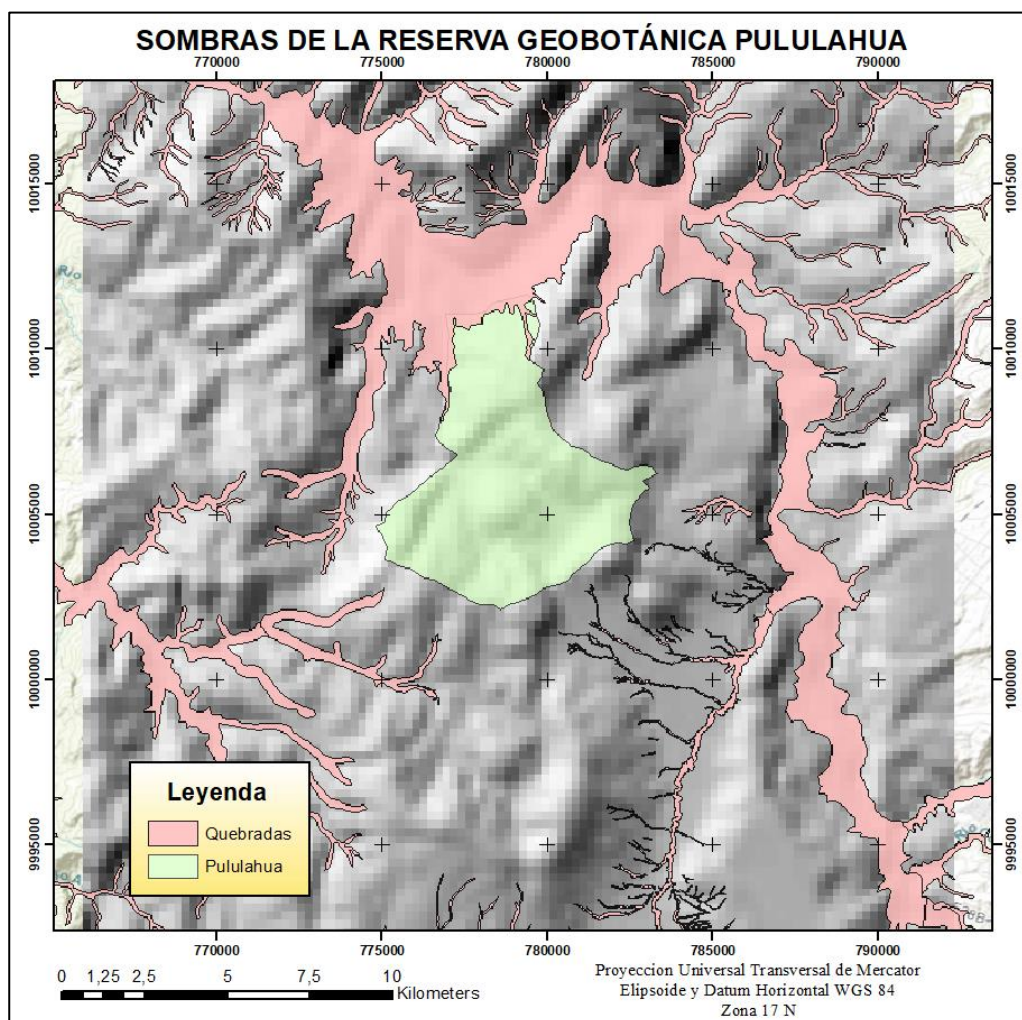
Figura 12

Mapa de pendientes



Nota: El mapa representa el en porcentaje de pendiente dentro de la Reserva Geobotánica Pululahua.

La existencia de zonas de sombra es una variable de gran interés en regiones montañosas, donde el relieve puede ser el factor determinante en los incendios forestales. Se define la insolación potencial en un punto como el tiempo máximo que ese lugar puede estar sometido a la radiación solar directa en ausencia de nubosidad. (Geograf, 2000)

Figura 13*Mapa de sombras*

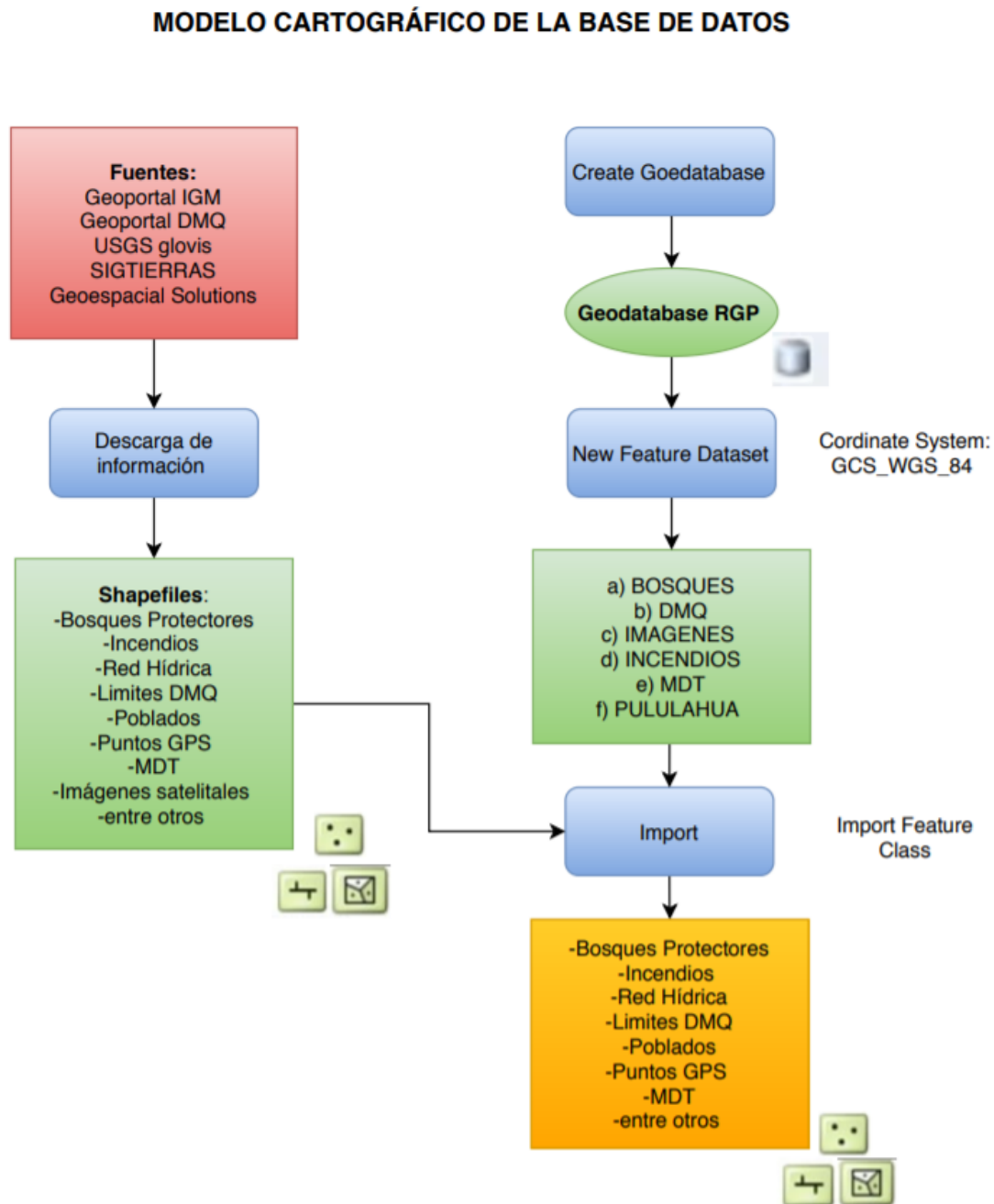
Nota: Mapa de sombras obtenido a partir de mapa de pendientes en la Reserva Geobotánica Pululahua.

Generación de la Geodatabase

Dada la importancia de tener estructurada el conjunto de datos geográficos, para facilitar la organización y manejo de los mismos, para su posterior análisis se realizó la generación de la base de datos con la información recopilada de las distintas fuentes (figura 14).

Figura 14

Modelo cartográfico de la Base de Datos



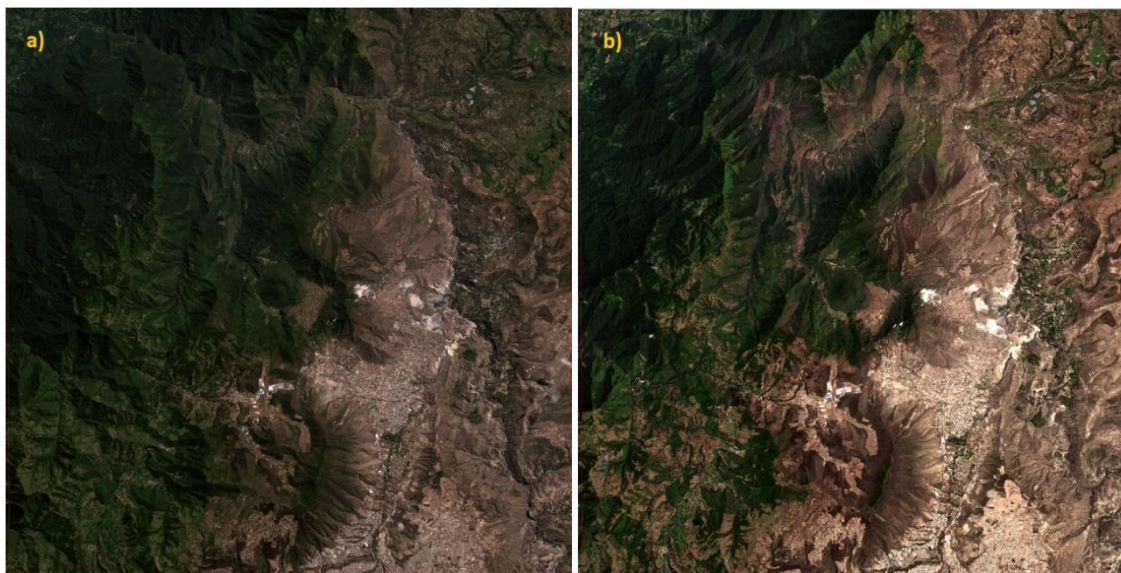
Nota: El gráfico representa la estructuración de la Geodatabase de la Reserva Geobotánica Pululahua.

Corrección atmosférica

Tras aplicar el método descrito en el apartado 2.6.1 mediante la fórmula (1) se obtiene la corrección atmosférica de las imágenes satelitales (figura 15).

Figura 15

Corrección atmosférica



Nota: El gráfico representa en a) la imagen sin corrección atmosférica y en b) la imagen con la corrección atmosférica.

Corrección topográfica

En el caso de las imágenes satelitales, se continuó con la búsqueda de los parámetros empleados en la corrección topográfica como se menciona en el apartado 2.6.4 con las fórmulas (2), (3) y (4), para realizar la corrección-C, se encuentran en los metadatos del archivo de cada imagen con datos como altura, azimut, (figura 16). Estos datos fueron aplicados para la corrección C (figura 17), la misma que presenta mejores resultados, con la cual se ve la diferencia de las imágenes posterior a realizar la corrección (figura 18).

Figura 16**Metadatos de la imagen satelital**

```

119.014 119.052 119.089 119.127 119.164 119.202 119.24
119.278 119.316 119.354 119.393 119.431 119.469 119.508
119.547 119.586 119.625 119.664</VALUES>
      <VALUES>118.763 118.8 118.837 118.874 118.911
118.948 118.985 119.023 119.06 119.098 119.136 119.173
119.211 119.249 119.287 119.326 119.364 119.402 119.441
119.48 119.518 119.557 119.596</VALUES>
    </Values_List>
  </Azimuth>
</Sun_Angles_Grid>
<Mean_Sun_Angle>
<ZENITH_ANGLE
unit="deg">29.9658921149433</ZENITH_ANGLE>
<AZIMUTH_ANGLE
unit="deg">119.898814236947</AZIMUTH_ANGLE>
</Mean_Sun_Angle>
<Viewing_Incidence_Angles_Grids bandId="0"
detectorId="1">
  <Zenith>
    <COL_STEP unit="m">5000</COL_STEP>
    <ROW_STEP unit="m">5000</ROW_STEP>
  <Values_List>

```

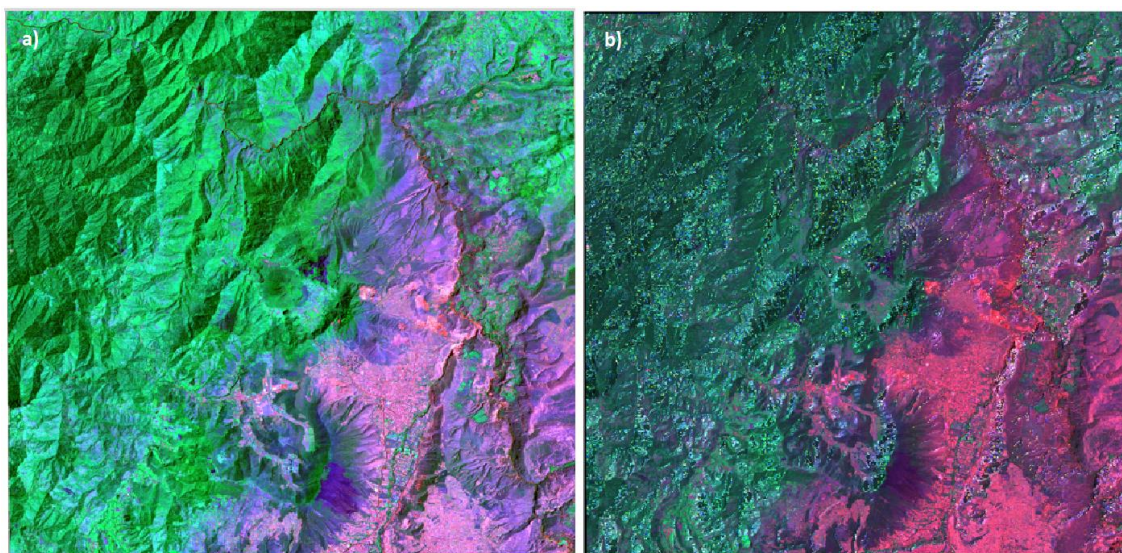
Nota: El gráfico presenta metadatos de la imagen satelital. Tomado de metadatos de Spot-6, 2019.

Figura 17**Aplicación de Corrección-C**

Nota: El gráfico fue elaborado con la herramienta Topographic correction en Q-Gis.

Figura 18

Corrección Topográfica



Nota: El gráfico representa en a) la imagen sin corrección topográfica y en b) la imagen ya realizada la corrección topográfica, obtenidas en Q-GIS.



Trabajo de campo

Hoja de campo

Se identificó las zonas accesibles dentro de la Reserva Geobotánica Pululahua, para determinar el protocolo en función a las necesidades en la toma de datos de campo, diseñando con ello la estructuración la hoja de campo (figura 19), que permitió especificar la ubicación de la especie forestal a levantar según sus coordenadas geográficas, descripción de los datos requeridos para la estimación biomasa como son: altura de pecho , distancia al árbol y ángulo de inclinación; adicionalmente se colocó en observaciones un espacio para la definición del tipo de modelo combustible según la clasificación Rothermel (tabla 2) y Prometheus (tabla 3) detallados en el marco teórico.

Figura 19

Formato de Hoja de Campo

 HOJA DE CAMPO 					
PROYECTO:			PROVINCIA:	CANTÓN:	PARROQUIAS:
Cartografía para modelos combustibles utilizando tecnologías geoespaciales para la predicción de incendios forestales en la Reserva Geobotánica Pululahua			Pichincha	Quito	Calacalí y San Antonio de Pichincha
UBICACIÓN:			FECHA:	NOMBRE DEL ENCARGADO:	
NUMERO DE PUNTO	NORTE	ESTE	SISTEMA DE REFERENCIA	NOMBRE DEL SENDERO:	
ALTURA ELIPSOIDAL			FOTOGRAFIA DEL TIPO DE ARBOL		
DESCRIPCION:					
<i>Diámetro de altura de pecho:</i>					
<i>Distancia al árbol:</i>					
<i>Ángulo de inclinación:</i>					
OBSERVACIONES: Modelo combustible					

Nota: Este gráfico presenta el diseño la tabla para el trabajo de campo según las necesidades del proyecto de investigación.

Toma de puntos

Se realizó la toma de puntos con navegador GPS (Sistema de Posicionamiento Global) en la Reserva Geobotánica Pululahua (Tabla 8), en áreas de interés como en las entradas de la RGP y de los senderos a los que se tuvo acceso durante el recorrido dentro de la misma (figura 20).

Figura 20

Toma de puntos con navegador GPS



Nota: Las fotografías fueron tomadas en a) La entrada de la Reserva Geobotánica Pululahua. y b) En la entrada del sendero El viento de la RGP.

Tabla 8

Puntos GPS

PUNTO	ESTE	NORTE	ALTURA	NOTA
1	779847	10003039	2833	ENTRADA 1
2	779818	10003086	2836	Sin Vegetación
3	779818	10003088	2837	
4	779788	10003136	2833	Especie 1
...				
47	777700	10002859	3018	Camino
48	777741	10002844	3013	Sendero
49	777756	10002842	3014	
50	777749	10002844	3018	Salida

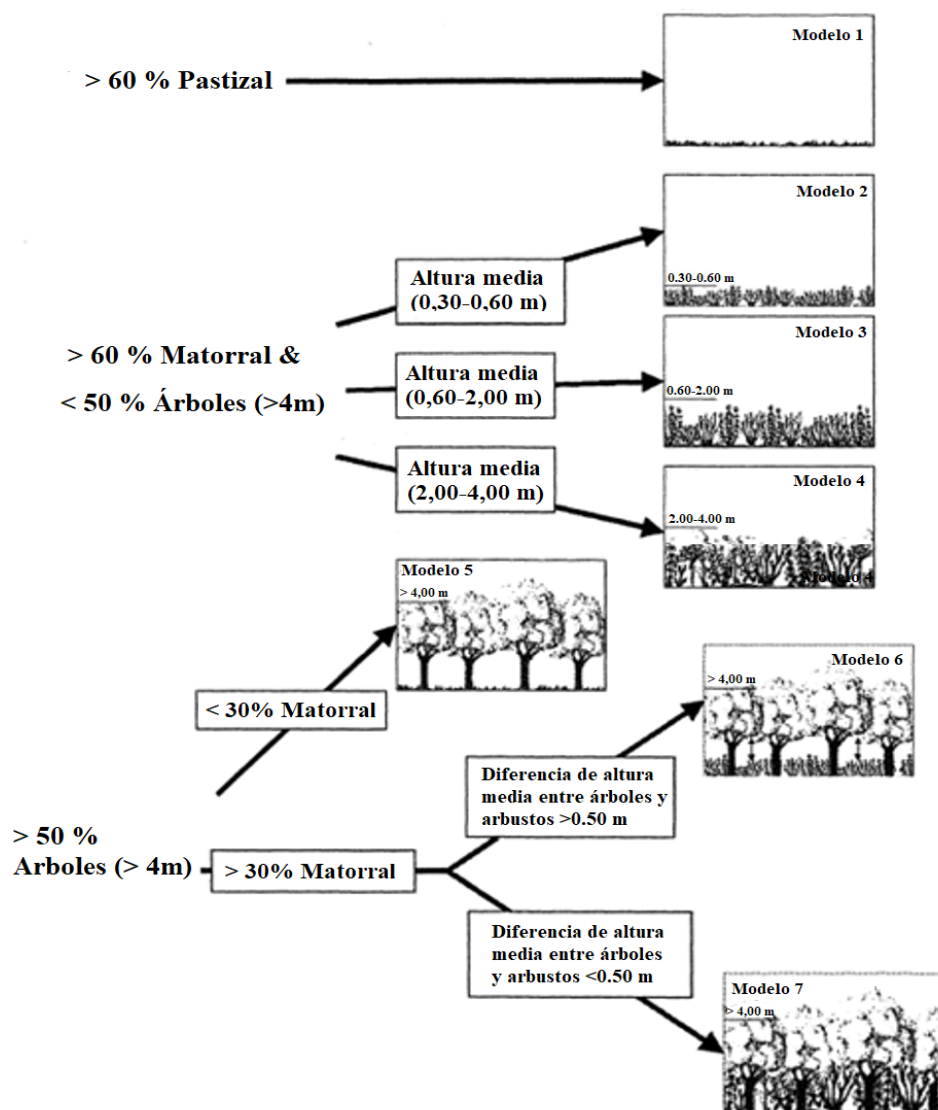
Nota: La tabla completa se muestra en la sección de anexos.

Clasificación según modelos combustibles

Para la clasificación de los modelos combustibles en campo, se verificó las características de las clasificaciones de los modelos combustible de Rothermel (tabla 2, marco teórico) y Prometheus (tabla 3, marco teórico) (figura 21).

Figura 21

Clasificación de Modelos Combustibles según Prometheus



Nota : Clasificación grafica de Prometheus para modelos combustibles. Tomada de Cartografía de modelos combustibles con teledetección (pág. 322) por Riaño,2000.

Para la toma de puntos de navegador GPS según el modelo combustible se identificó el tipo de árboles según el plan de manejo (2012) de la Reserva Geobotánica Pululahua (figura 22).

Figura 22

Toma de puntos GPS según tipo de combustible








Nota : La imagen muestra a) Identificación de especies, b) toma de coordenadas en zona de árboles, c) Identificación de matorrales.

Para clasificar los modelos combustibles de la Reserva Geobotánica Pululahua se procedió a identificar las especies encontradas durante el trabajo de campo, para los modelos combustibles de Rothermel(Tabla 9) y Promeheus (Tabla 10).

Tabla 9




Clasificación de Modelos Combustibles de Rothermel en la Reserva Geobotánica Pululahua

Modelo	Descripción	Imagen
Modelo 1	Pasto fino, seco y bajo (por debajo de la rodilla, hasta 30 cm), que recubre totalmente el suelo. El matorral o arbolado, se hay, se encuentra disperso cubriendo menos de un tercio de la superficie. Cantidad de combustible (materia seca): 1 - 2 t/ha.	
Modelo 4	Matorral o arbolado joven muy denso (de unos 2 metros de altura). Continuidad horizontal y vertical del combustible. La humedad del combustible vivo tiene gran influencia en el comportamiento del fuego. Cantidad de combustible (materia seca): 25 - 35 t/ha.	
Modelo 5	Matorral denso y joven, pero bajo (según algunos artículos hasta un metro de altura y según otros hasta 0,6m). Poca presencia de material leñoso muerto. Cantidad de combustible (materia seca): 10 - 15 t/ha.	
Modelo 6	Matorral similar al modelo 5, pero más alto (según algunos artículos más de un metro de altura y según otros de 0,6 hasta 1,2 m). Con menos combustible vivo que en el modelo 5, el conjunto es más inflamable que dicho modelo. Cantidad de combustible (materia seca): 10 - 15 t/ha.	
Modelo 7	Matorral muy inflamable, de hasta 2 metros de altura, o pinares de sotobosque. El incendio se desarrolla con mayores contenidos de humedad del combustible muerto que los otros. Cantidad de combustible (materia seca): 10 - 12 t/ha.	


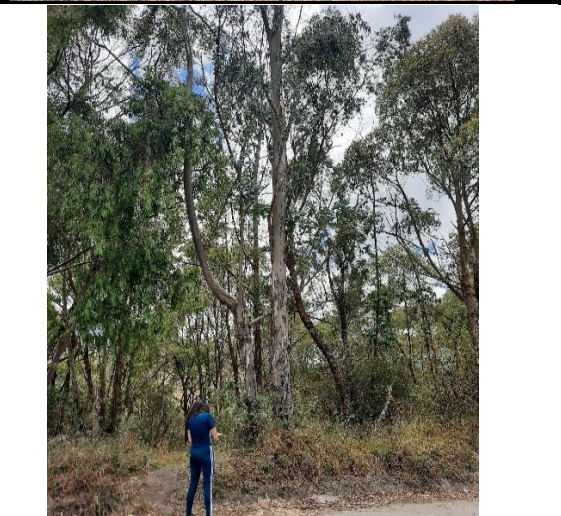
Nota: La clasificación de Rothermel adaptada de Fernández, 2011. (págs. 10-12) en la Reserva Geobotánica Pululahua.

Tabla 10

Clasificación de Modelos Combustibles Prometheus en la Reserva Geobotánica Pululahua

Modelo	Descripción	Imagen
Modelo 1	Pasto	
Modelo 2	Matorral (0.30 – 0.60 m)	
Modelo 3	Matorral (0.60 - 2.00 m)	

Continua...

Modelo	Descripción	Imagen
Modelo 4	Matorral (2.00- 4.00 m)	
Modelo 6	Bosque con combustibles de superficie. Existe diferencia de altura entre los arbustos y las copas de los árboles	

Nota: La clasificación de Prometheus en la Reserva Geobotánica Pululahua fue adaptada de Riaño, Chuvieco, 2000, (págs. 230-231)

Índices de vegetación

Para la aplicación de los índices de vegetación, se seleccionaron los cuatro índices más relevantes según sus características (tabla 11). Se muestra el modelo cartográfico descrito (figura 23), y se obtiene con ello la obtención de los índices de vegetación (figura 24).

Tabla 11

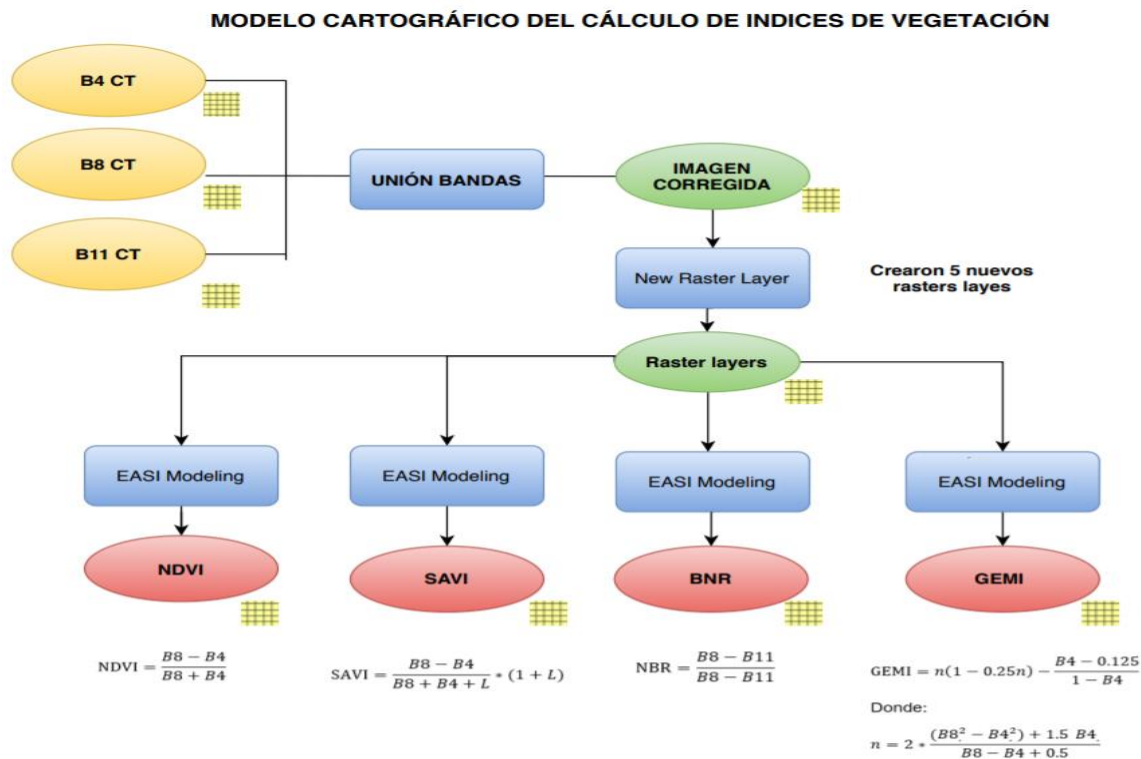
Fórmulas de Índices de Vegetación

Índice de vegetación	Fórmula
NDVI	$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}}}$
SAVI	$\text{SAVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}} + L} * (1 + L)$
NBR	$\text{NBR} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{SWIR}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{SWIR}}}$
GEMI	$\text{GEMI} = n(1 - 0.25n) - \frac{\rho_{\text{RED}} - 0.125}{1 - \rho_{\text{RED}}}$
GEMI	Donde: $n = 2 * \frac{(\rho_{\text{NIR}}^2 - \rho_{\text{RED}}^2) + 1.5 \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}} + 0.5}$

Nota: La tabla presenta las fórmulas de índices de vegetación empleados en el proyecto de investigación.

Figura 23

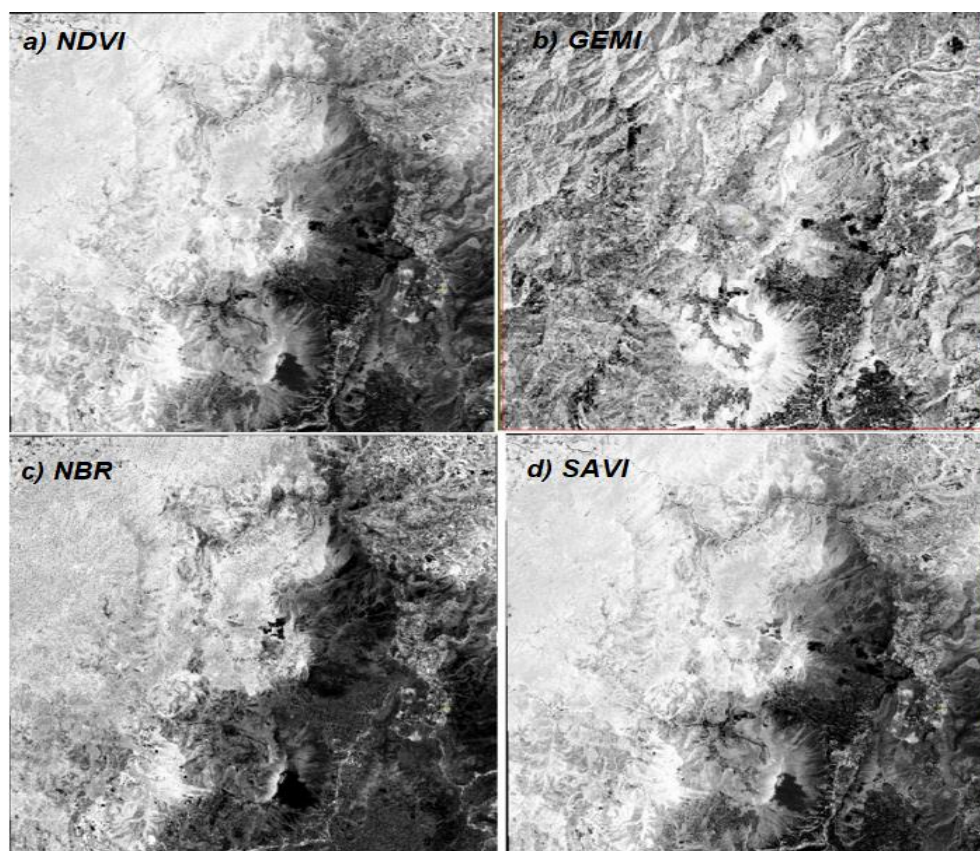
Modelo cartográfico de Índices de vegetación



Nota: El gráfico representa la metodología empleada en la estimación de índices de vegetación.

Figura 24

Índices de vegetación



Nota: El gráfico representa el cálculo de los índices de vegetación realizados en el proyecto de investigación a) NDVI b) GEMI, c) NBR, d) SAVI.

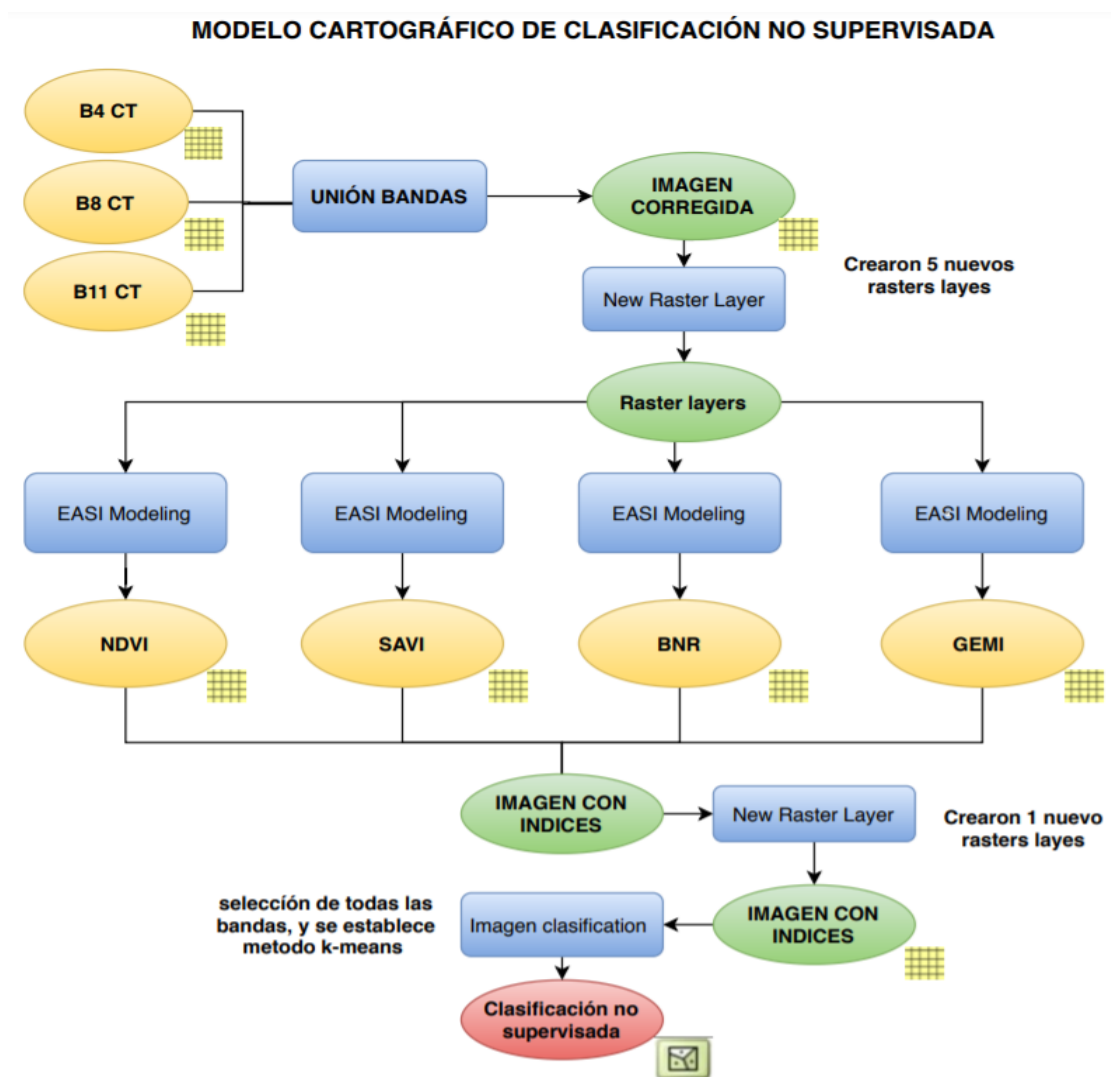
Clasificaciones

Clasificación no supervisada

Por las especificaciones presentadas de la clasificación no supervisada mediante el algoritmo k-meas descrito en el apartado 2.6.5, con el uso de las ecuaciones (5) y (6), con el uso de las capas que entran en esta clasificación, para obtener con ella un mejor resultado (figura 25).

Figura 25

Modelo cartográfico Clasificación no supervisada



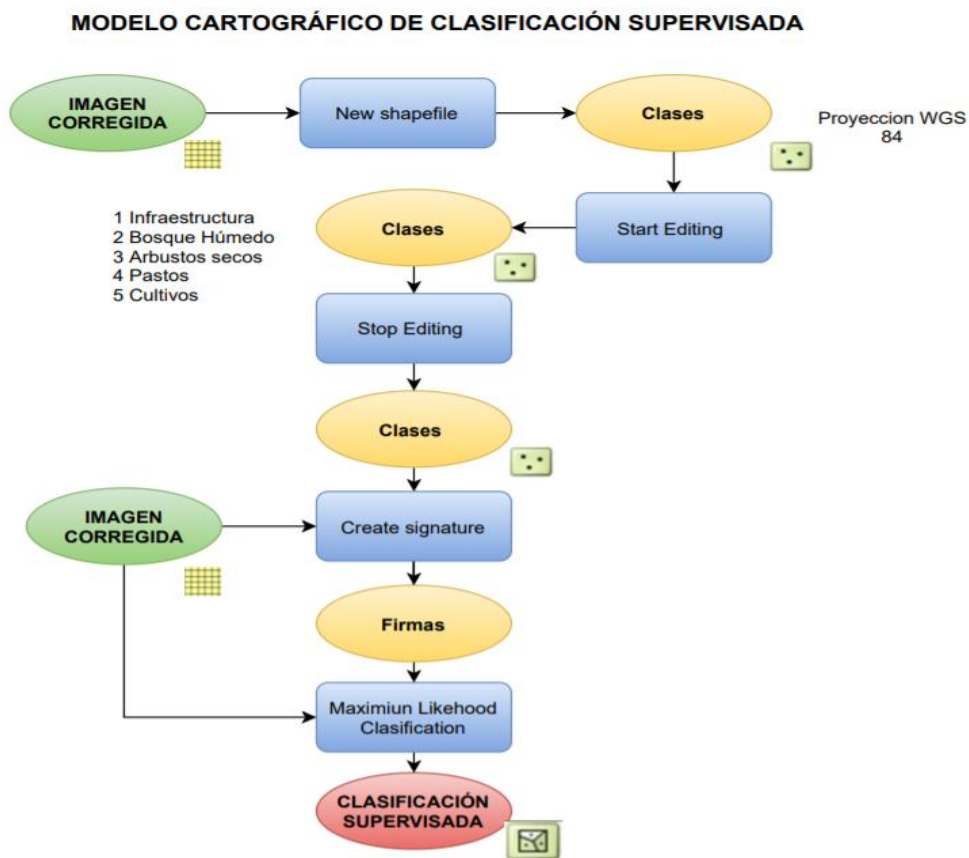
Nota: Este esquema representa la metodología para realizar la clasificación no supervisada.

Clasificación supervisada

En cuanto a la clasificación supervisada fue necesario previamente realizar la identificación de coberturas vegetales en campo, posteriormente identificar las mismas dentro de la imagen satelital como se presenta en el siguiente modelo cartográfico (figura 26).

Figura 26

Modelo cartográfico Clasificación supervisada



Nota: Este esquema representa el procedimiento de la clasificación supervisada realizada.

Estimación de Biomasa

Para la estimación de la biomasa área en la Reserva Geobotánica Pululahua se efectuaron varios procesos; el primero se trabajó con la imagen satelitales Sentinel-2 y Spot 6 para obtener los niveles digitales de valores del índice de vegetación NDVI en cada una de las coberturas vegetales encontradas; en la segunda fase se realizó el trabajo de campo para la toma de datos necesarios en la aplicación de las ecuaciones alométricas, con la finalidad de obtener la ecuación de regresión que relacione los valores de biomasa con el índice de vegetación y sus valores de niveles digitales respetivamente, tal como lo mencionan Rodríguez Cortes (2015) y Echeverría (2018).

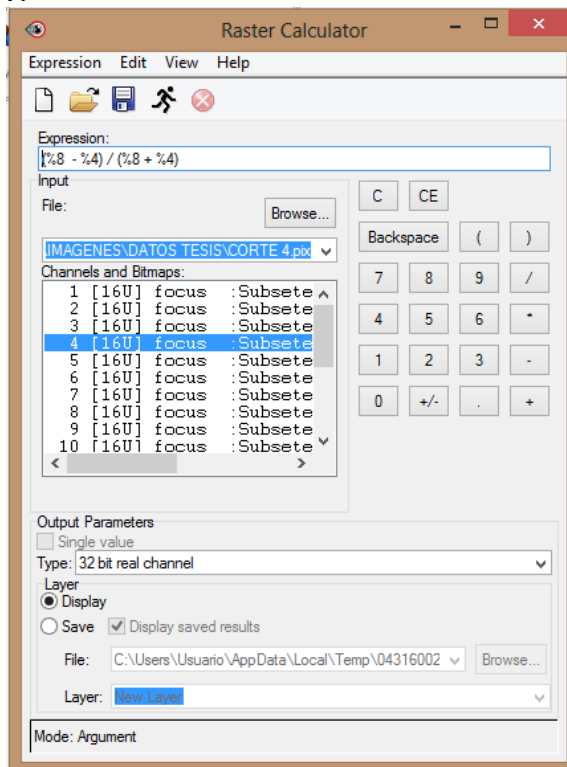
Cálculo del índice de Vegetación Normalizado para estimación de biomasa

La aplicación de los índices de vegetación como el NDVI relacionado a la estimación de biomasa, es mencionada en varios estudios de investigación realizados por Rodríguez Cortes (2015), Echeverría (2018), Astudillo (2019) entre otros, por lo mismo que se seleccionó de los índices calculados anteriormente, al NDVI para la estimación de biomasa.

En las imágenes pertenecientes al sensor Sentinel-2 para aplicar la formula (7), la banda NIR pertenece a la banda 8 y la Red a la banda 4 (tabla 4, marco teórico) de las características de esta imagen, a diferencia del sensor Spot 6 donde su banda 4 pertenece a la NIR y la banda 1 es la Red (tabla 5, marco teórico), (figura 27).

Figura 27

Cálculo del índice NDVI



Nota: Uso de la herramienta Raster Calculator de PCI Geomática.

Estimación de la biomasa aérea

Se recopiló información respecto a la Reserva Geobotánica Pululahua del Plan de Manejo del año (2012) que se encuentra vigente en la actualidad, en cuanto al tipo de especies vegetales características de esta zona, esta información sirvió de ayuda para su posterior identificación en el trabajo de campo. Esta identificación de coberturas vegetales fue proporcionada por el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) adaptadas hasta el año 2019 (tabla 12).

Tabla 12

Cobertura Vegetal

Cobertura Vegetal	Área (ha)	Porcentaje (%)
<i>BOSQUE NATIVO</i>	1757,49	44,11
<i>CULTIVO</i>	3,98	0,10
<i>ERIAL</i>	5,77	0,14
<i>INFRAESTRUCTURA</i>	1,71	0,04
<i>MOSAICO AGROPECUARIO</i>	270,77	6,80
<i>PASTIZAL</i>	187,84	4,71
<i>VEGETACION ARBUSTIVA</i>	1480,20	37,15
<i>VEGETACION HERBACEA</i>	276,15	6,93
TOTAL	3983,91	100,00

Nota: Modificada de Coberturas vegetales del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP).

Toma de datos en campo para estimación de biomasa

Para el trabajo de campo se estimó las zonas idóneas para el muestreo, en consideración a la emergencia sanitaria en la que el país se encontraba en esta época, por lo cual, al ser restringida su accesibilidad, se ubicó las zonas dentro del área de estudio que se podía visitar para la toma de datos.

La medición forestal más común que se realiza en campo como menciona Rojas (2015), es la de diámetro de altura de pecho (DAP) en los árboles, se conoce esta

medición como de convención universal, donde se mide el diámetro con corteza a una altura desde el nivel del suelo, generalmente esta se mide es a los 1,30 m de altura.

Para esta medida se utilizó una cinta métrica, flexible a los 1,30 m de altura para cada uno de los individuos (figura 28), se obtuvo el perímetro o circunferencia (CAP) que fue convertido en DAP a partir de la fórmula (14) de Villareal et al. (2004).

$$DAP = \frac{CAP}{\pi} \quad (14)$$

Figura 28

Toma de medida de diámetro de altura de pecho



Nota : En el grafico se muestra la manera en la que se tomaron datos del diámetro de altura de pecho DAP, con la ayuda de una cinta métrica a 1,30 m de altura.

Altura total: Debido a las limitaciones del estudio y a la carencia de hipsómetros, se realizó una estimación usando el fundamento trigonométrico Blum Leiss como lo menciona Domínguez (2010) con la ayuda de un clinómetro y cinta métrica para medir las distancias al árbol. Esta altura se estimó desde el suelo hasta la cima de la copa de cada individuo. (Vallejo, 2005)

Se realizaron medidas con la ayuda de estos instrumentos como clinómetro y cinta métrica para estimar la altura de las especies (figura 29). Estos datos fueron registrados en la hoja de campo (figura 19, metodología).

Figura 29

Toma de distancia y ángulo de inclinación



Nota: En el gráfico muestra la manera que se tomó los datos de altura.

Estimación de la biomasa área

Para la estimación de la biomasa área según la identificación realizada en campo, se condujo al reconocimiento de especies según el Plan de Manejo de la Reserva Geobotánica Pululahua.

Entre las especies muestreadas (tabla 13) (pagina siguiente), se puede observar los nombres de las especies encontradas, con su respectivo diámetro en centímetros y el cálculo de DAP realizado para cada una de ellas según la formula (14), al igual que su respectiva altura calculada con trigonometría.

Tabla 13*Especies de árboles analizados en la Reserva Geobotánica Pululahua*

Especies	Altura(m)	Diámetro cm (dap)	Diámetro real (dap/pi)
<i>Cascarilla</i>	4,58	41	13,05
<i>Cichona pubenses</i>	5,68	46	14,64
<i>Aguacatillo</i>	4,85	52	16,55
<i>Ficus eximio</i>	4,5	60	19,10
<i>Miconia crocea</i>	4,25	39	12,41
<i>Heperomeles heterophylla</i>	4,91	84	26,74
<i>Hedysmun luteyni</i>	4,82	43	13,69
<i>Chusquea scandens</i>	4,67	48	15,28
<i>Ficus aguaraguensis.</i>	5,25	95	30,24
<i>Surros</i>	6,78	87	27,69
<i>Higuerones</i>	4,23	40	12,73

Nota: La tabla muestra la altura en metros con su respectivo cálculo del diámetro de altura de pecho DAP.

Por las características de las especies muestreadas en campo se utilizó el modelo alométrico propuesto por Lerma & Orjuela (2014), que plantea la ecuación (15), que es apto para diámetros entre 5 a 67 centímetros de DAP y para una altura entre 4,22 a 25,5 metros, el cual especifica que no debe ser utilizado para valores superiores o inferiores a los estipulados para evitar un sesgo en los resultados.

$$\ln BT = -1.85 + 2.11 * \ln DAP \quad (15)$$

Dónde

DAP: Diámetro a la altura del pecho en cm

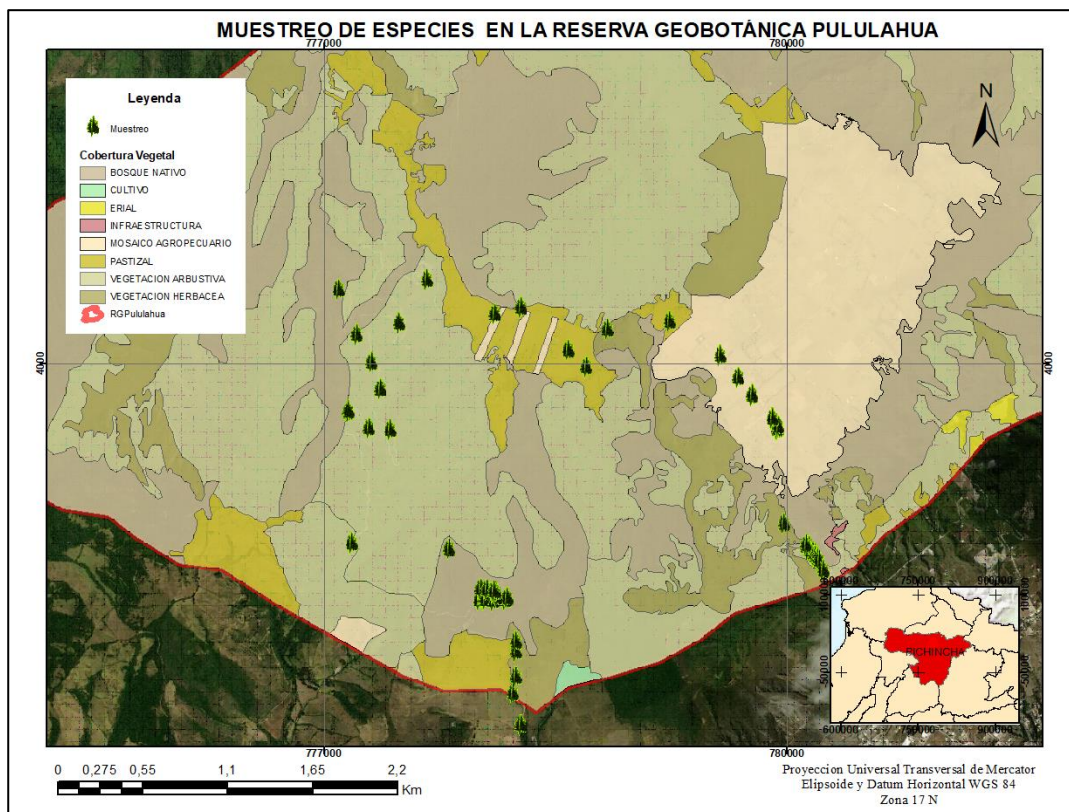
BT: Biomasa aérea total (kg/árbol)

Toma de muestras

Para la toma de datos en campo, dada la difícil accesibilidad a muchos de los senderos de la Reserva Geobotánica Pululahua, se prosiguió a la toma de datos en campo según las coberturas identificadas (figura 30).

Figura 30

Ubicación de muestras realizadas en campo.



Nota: El gráfico presenta a que cobertura pertenecen las especies identificadas en campo.

Ecuación de correlación

De la relación de la biomasa de cada una de las coberturas de la Reserva Geobotánica Pululahua con los niveles digitales del cálculo del NDVI, se genera la ecuación de regresión como explica la metodología propuesta por Rodríguez Cortes (2015) donde se relaciona la relación existente entre la variación de la biomasa arbórea con los niveles digitales del índice de NDVI. Por lo cual se hace relevante plantear la ecuación de correlación polinómica formula (16), que tenga como variable dependiente a las toneladas de biomasa por hectárea pertenecientes a cada tipo de cobertura, y como variable independiente a los niveles digitales del NDVI.

$$y = ax^2 + bx + c \quad (16)$$

Capítulo 4

Resultados

Geodatabase

La geodatabase resultante de la “Reserva Geobotánica Pululahua” agrupa por categorías las diferentes coberturas generadas y empleadas para el desarrollo de este trabajo. La base de datos posee una hoja de información que describe los siguientes aspectos: título de la base de datos, mapa representativo de la Reserva Geobotánica Pululahua, resumen, descripción del proyecto para el que se utilizaron las coberturas, créditos a las instituciones de donde se recopiló la información, autor, limitaciones de uso, y las escalas de trabajo. (figura 31).

Figura 31

Geodatabase de la Reserva Geobotánica Pululahua

GEODATABASE RESERVA GEBOTÁNICA PULULAHUA



Tags
CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS COMBUSTIBLES EN LA RGP 2017 - 2018 - 2019 - 2020

Summary
Desarrollada para el proyecto de titulación:
"Cartografía para modelos combustibles utilizando tecnologías geoespaciales para la predicción de incendios"

Description

RESUMEN DEL PROYECTO

El proyecto de investigación plantea la generación de cartografía de modelos combustibles en base a la utilización de información geoespacial para la Reserva Geobotánica Pululahua, que permita encontrar las características de los bosques correspondientes a cada zona, y con ello calcular a través de las imágenes la cantidad de biomasa y combinar las demás variables para así poder ayudar a la toma de decisiones sobre las acciones en tareas tan forestales. Se busca que esta información sea de apoyo para las instituciones encargadas y sea de aporte para las áreas afectadas con este problema.

Por lo tanto la información recolectada para la generación de esta Geodatabase se encuentra en shapefiles de fuentes de información utilizadas para las clasificaciones no supervisadas y supervisadas.

Credits
Información recopilada de distintas fuentes como:
- Geoportal del IGM
- Geoportal del DMQ
- GEOSPACIAL SOLUTIONS
- SIGTIERRAS
- IISRS GlonVis

- [-] GEODATABASE RGP.gdb
 - [-] BOSQUES
 - [+] Bosques_protectores
 - [+] Ordenamiento_forestal
 - [+] DMQ
 - [+] IMAGENES_SATELITALES
 - [-] INCENDIOS
 - [+] Cobertura_vegetal_produccion
 - [+] Recurrencia_Incendios_1
 - [+] INFORMACIÓN_BASE
 - [+] MDT
 - [+] PULULAHUA

Nota: Descripción y contenido de la geodatabase de la Reserva Geobotánica Pululahua.

De la base de datos se obtuvo, un total de 50 coberturas, entre las cuales se destacan 16 de tipo polígono, 5 de tipo línea, 2 de tipo puntos y 27 de tipo ráster (tabla 14).

Tabla 14*Coberturas de la base de datos*

Característica	Cobertura	Tipo
BOSQUES	Bosques Protectores	Polígono
	Ordenamiento forestal	Polígono
DMQ	Administración Zonal	Polígono
	DMQ_Quebradas	Polígono
	Limite DMQ	Polígono
	Manzanas DMQ	Polígono
	Red Hídrica DMQ	Línea
	Zonas Metropolitanas	Polígono
IMÁGENES SATELITALES	Sentinel-2	Raster
	Spot 6	Raster
INCENDIOS	Cobertura vegetal Productiva	Polígono
	Recurrencia Incendios 1991-2015	Polígono
INFORMACION BASE	Accidentes geográficos	Línea
	parroquias	Polígono
	poblados	Puntos
	vialidad	Línea
	vías	Línea
MDT	MDT Sigtierras	Raster
	pendientes	Raster
	sombras	Raster
PULULAHUA	cuadro incendios	Polígono
	curvas de nivel	Línea
	Puntos GPS	Puntos
	Limite RGP	Polígono
	Zona de estudio	Polígono
RESULTADOS	Índices NDVI 2017	Raster
	Índices NDVI 2018	Raster
	Índices NDVI 2019	Raster
	Índices NDVI 2020	Raster

Continua...

Característica	Cobertura	Tipo
RESULTADOS	Índices SAVI 2017	Raster
	Índices SAVI 2018	Raster
	Índices SAVI 2019	Raster
	Índices SAVI 2020	Raster
	Índices GEMI 2017	Raster
	Índices GEMI 2018	Raster
	Índices GEMI 2019	Raster
	Índices GEMI 2020	Raster
	Índices BNR 2018	Raster
	Índices BNR 2019	Raster
	Índices BNR 2020	Raster
	Clasificación K-Means 2017	Raster
	Clasificación K-Means 2018	Raster
	Clasificación K-Means 2019	Raster
	Clasificación K-Means 2020	Raster
	Modelos combustibles Prometheus	Raster
	Modelos combustibles Rothermel	Raster
	Cobertura vegetal Sierra	Polígono
	Cobertura vital 2019 MAGAP	Polígono
	BIOMASA	Polígono
Índices BNR 2018	Raster	

Nota: La tabla muestra el tipo de elemento con la que representa cada cobertura.

Identificación de coberturas vegetales

Con la información obtenida del MAGAP se identificaron las coberturas vegetales dentro de la Reserva Geobotánica Pululahua (tabla 15), mismas que se emplearon en la estimación de biomasa por cobertura. (figura 32),

Tabla 15

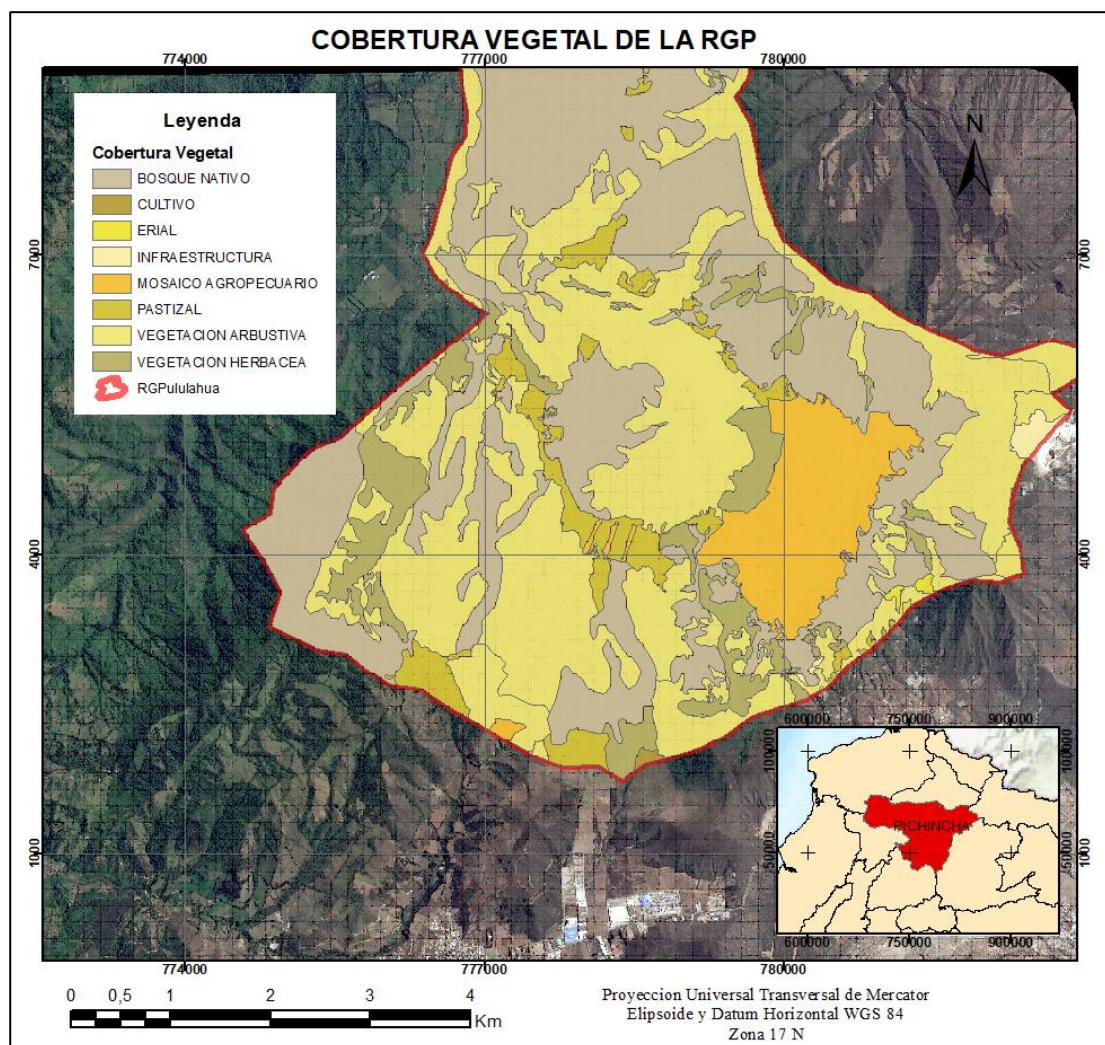
Cobertura Vegetal de la Reserva Geobotánica Pululahua

Cobertura Vegetal	Área (ha)	Porcentaje (%)
Bosque nativo	1757,49	44,11
Cultivo	3,98	0,10
Erial	5,77	0,14
Infraestructura	1,71	0,04
Mosaico Agropecuario	270,77	6,80
Pastizal	187,84	4,71
Vegetación Arbustiva	1480,20	37,15
Vegetación Herbácea	276,15	6,93
Total (Ha)	3983,91	100,00

Nota: La tabla muestra el porcentaje que representa cada área de cobertura dentro de la Reserva Geobotánica Pululahua.

Figura 32

Clasificación de Coberturas Vegetales en la Reserva Geobotánica Pululahua



Nota: Mapa representativo de la clasificación de coberturas vegetales hasta el año 2019 referenciadas por el MAGAP.

La clasificación recopilada del Plan de Manejo de la Reserva Geobotánica Pululahua hasta el año 2012 según Sierra, (tabla 16), se sustituye en porcentaje el área perteneciente a cada ecosistema que se encuentra dentro de la reserva (figura 33).

Tabla 16

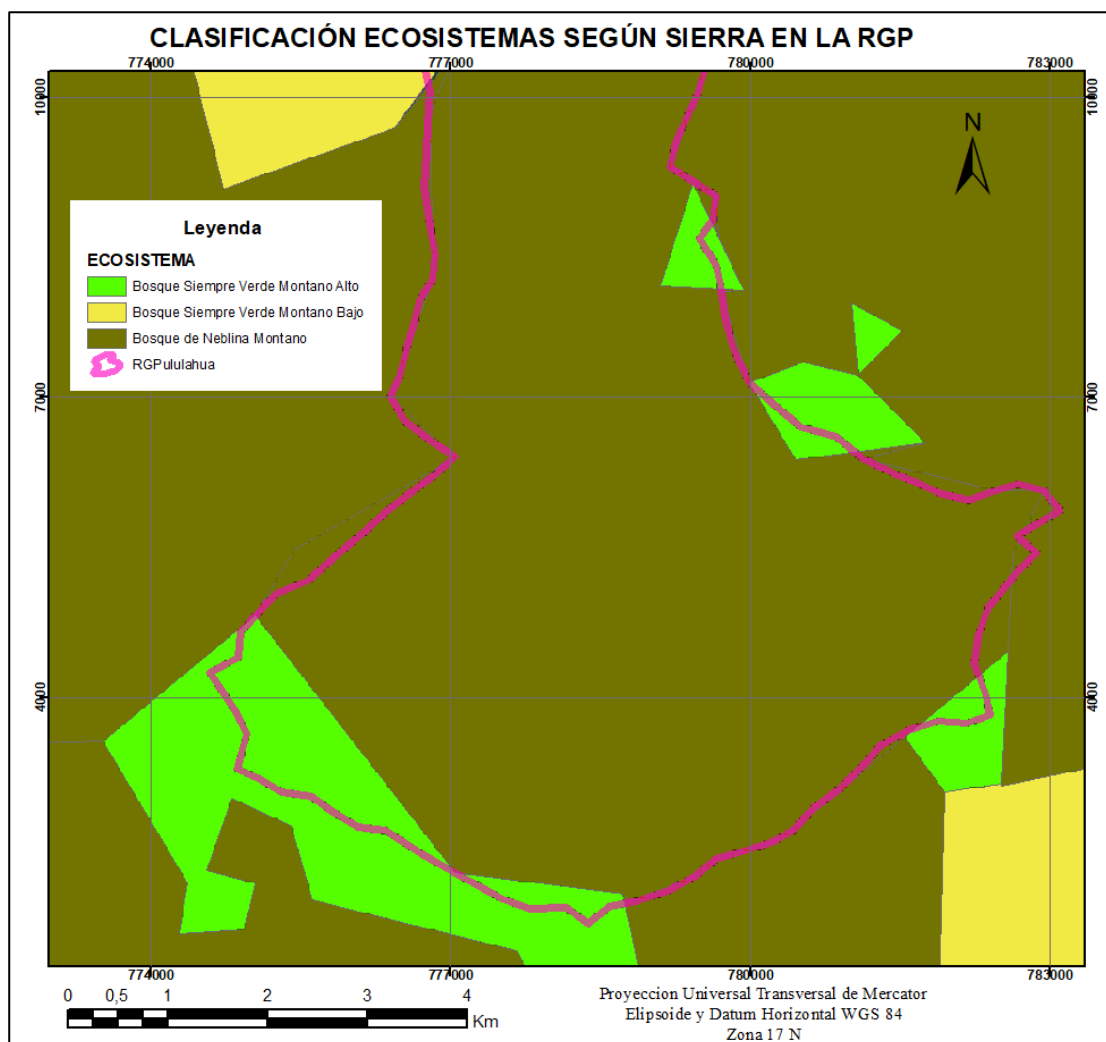
Clasificación de Ecosistemas según Sierra

Ecosistema	Área (ha)	Porcentaje (%)
Bosque de Neblina Montano	3698,45	92,83
Bosque Siempre Verde Montano Alto	272,37	6,84
Bosque Siempre Verde Montano Bajo	13,09	0,33
Total (ha)	3983,91	100,00

Nota: Porcentaje al que equivale el ecosistema según su área dentro de la RGP.

Figura 33

Clasificación de Ecosistemas en la Reserva Geobotánica Pululahua



Nota: Mapa representativo de la clasificación de ecosistema por Sierra, 1999, (pág. 75) obtenida del Plan de Manejo (2012).

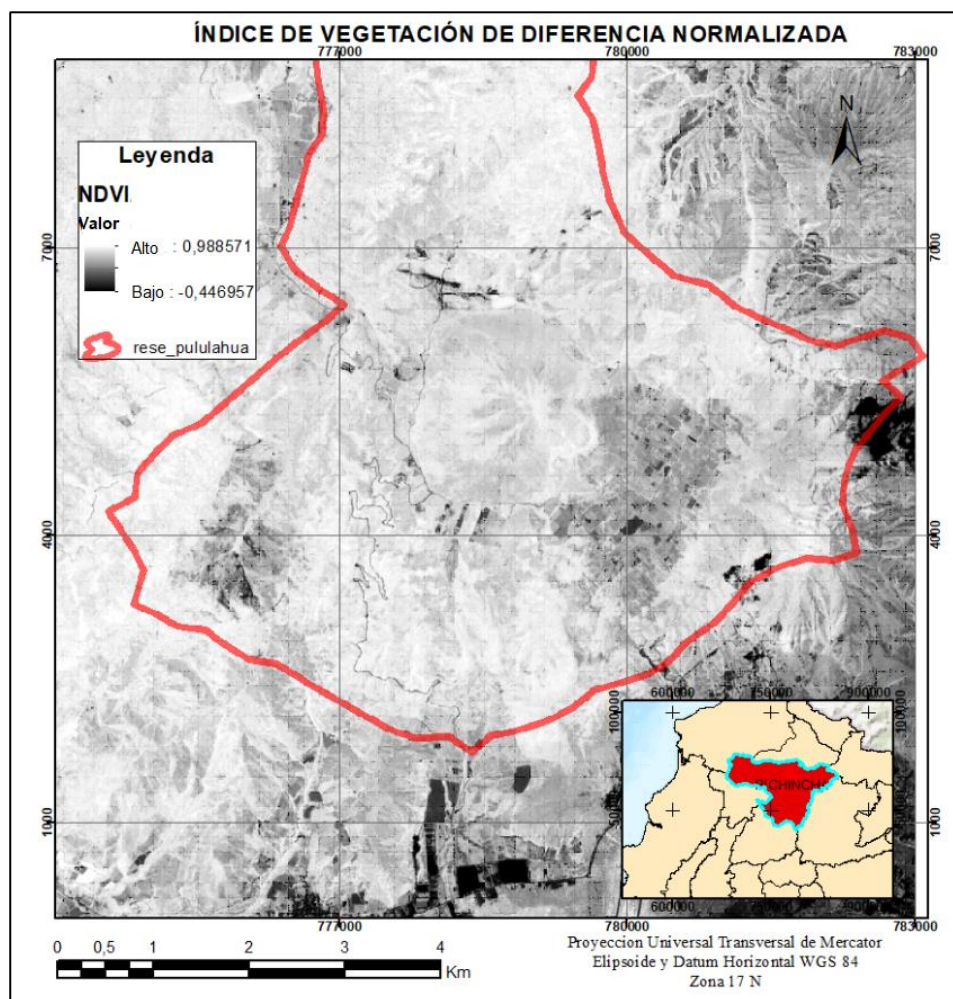
Índices de vegetación

Índice de vegetación Normalizado (NDVI)

Aplicando la metodología descrita en el numeral 3.9.1, se representa una escala de rangos en los que se encuentra el índice de vegetación normalizado NDVI, perteneciente a la zona de estudio dentro de la Reserva Geobotánica Pululahua (figura 34).

Figura 34

Índice de Vegetación Normalizada



Nota: Mapa de escala del valor del índice de vegetación Normalizada en la Reserva Geobotánica Pululahua.

Los valores de NDVI obtenidos en el mapa se encuentran en la escala de -0.44 a 0.99, y para su interpretación están dentro del rango establecido por este índice NDVI, esto representa que valores de -1 a 0.16 pertenecen a coberturas de agua,

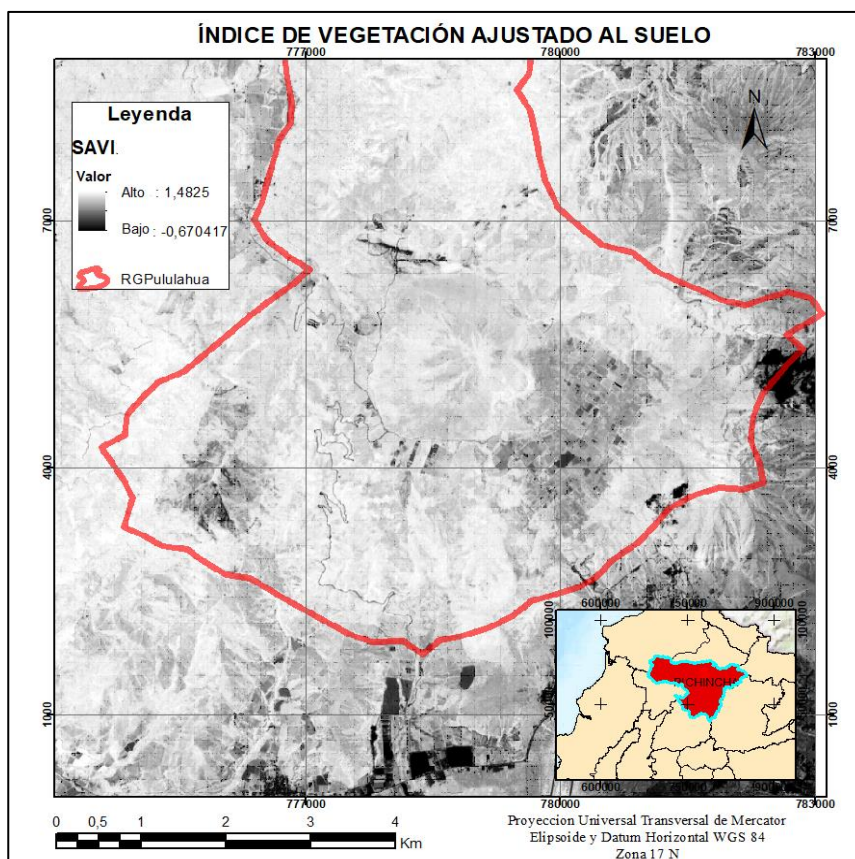
construcciones y suelo desnudo, mientras que valores entre 0.16 a 1 muestra la vegetación. Se conoce que mientras más se aproximen a 1 se tiene una vegetación más densa y con mayor vigor.

Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)

En cuanto al índice de vegetación ajustado al suelo SAVI, tras aplicar la ecuación (8) metodología, se expresan relaciones a los valores del NDVI, en un mismo rango de colores, lo que no necesariamente significa que estos se encuentran en la misma escala, dado que esta se ve afectada al proponer el valor de L (diferencia en la transmisividad) con 0.5, (figura 35).

Figura 35

Índice de vegetación ajustado al suelo



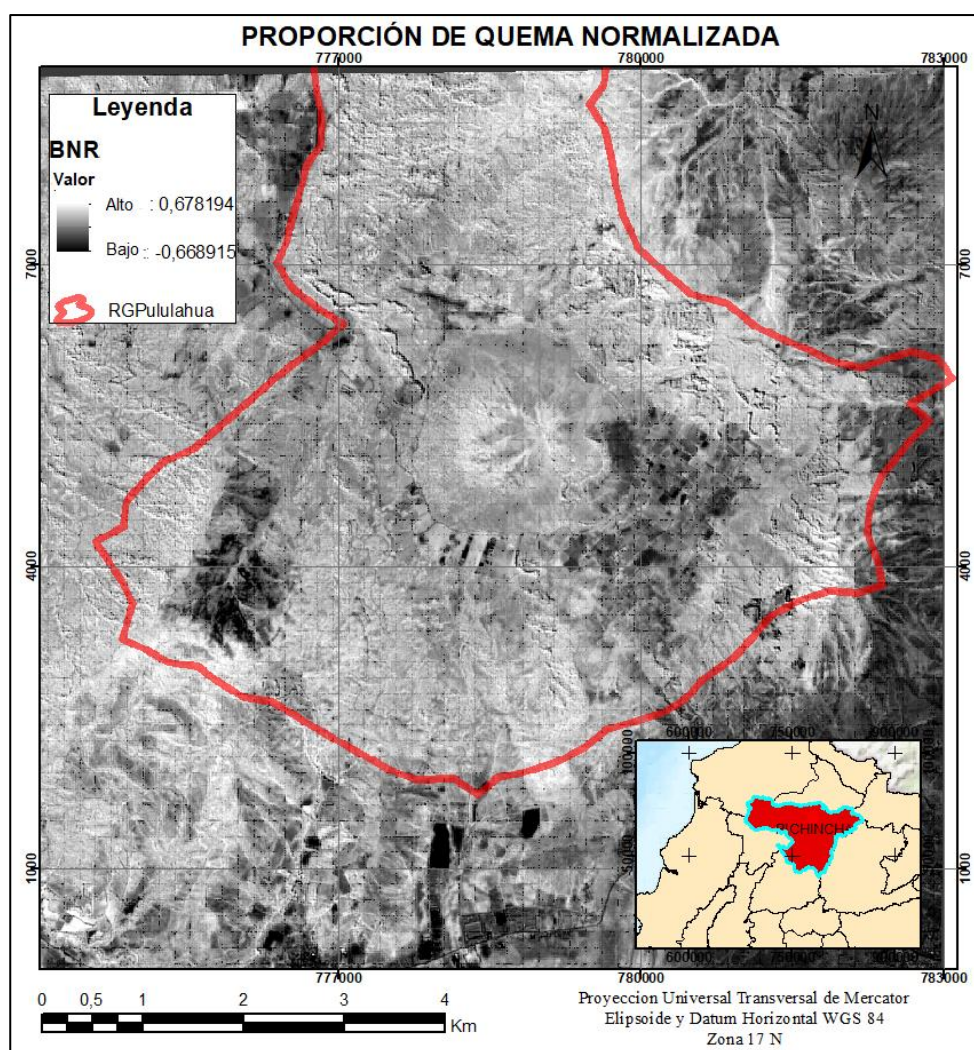
Nota: Mapa de escala del valor del índice de vegetación ajustado al suelo SAVI en la Reserva Geobotánica Pulumahua.

Proporción de quema normalizada (BNR)

El índice BNR posterior aplicar la ecuación (11) del apartado 2.7 se identifica los valores en el rango de -0,7 a 0,7; lo que nos da indicios en valores bajos en zonas de vegetación a áreas quemadas después de un incendio, sin embargo, no es relevante utilizar este índice en las clasificaciones no supervisada al ser de uso exclusivo para determinar áreas quemadas (figura 36).

Figura 36

Proporción de quema Normalizada



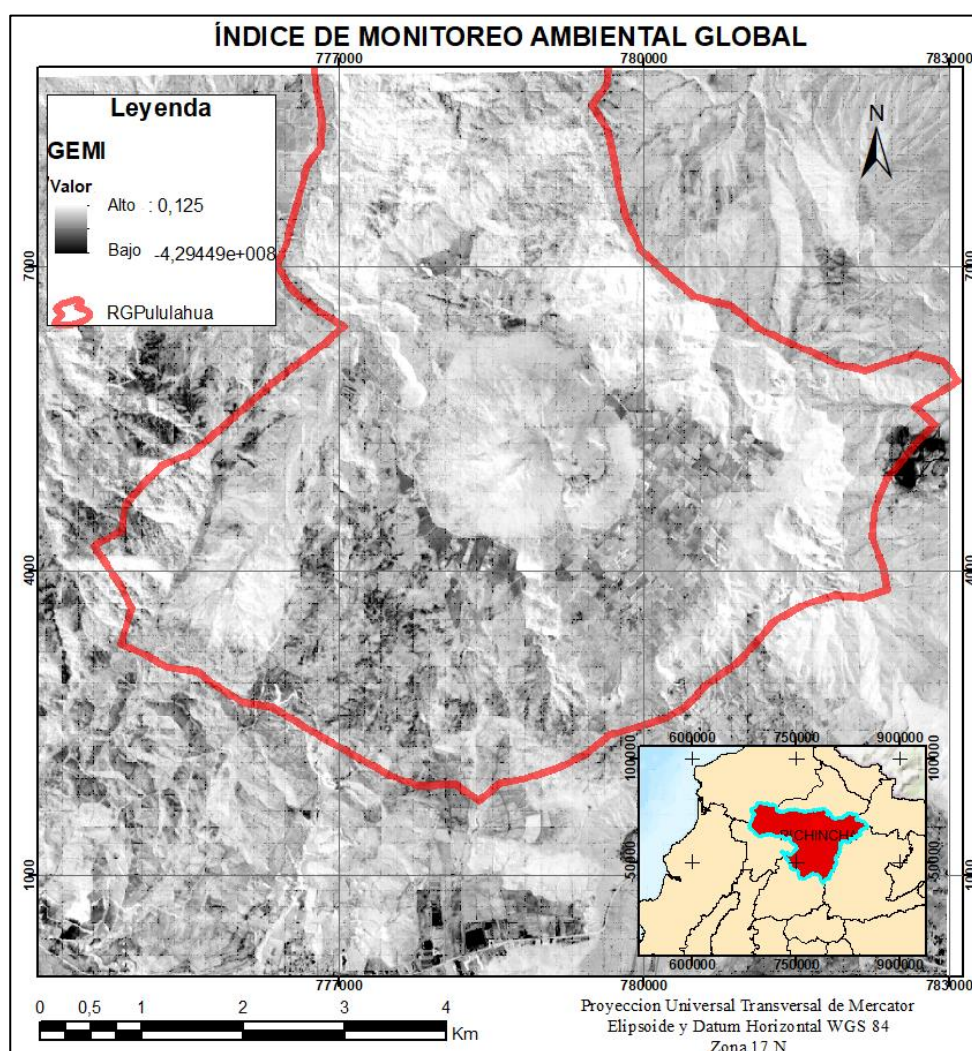
Nota: Mapa de escala del valor de la porción de quema normalizada BNR en la Reserva Geobotánica Pululahua.

Índice de monitoreo ambiental global (GEMI)

El índice GEMI, en efecto de la utilización de la ecuación (10) y (11) del apartado 2.7, resulta un rango de valores de -0,4 a 0,125, siendo este un rango de difícil interpretación visual para la aplicación en las clasificaciones no supervisadas por lo cual se descartó posteriormente para las mismas clasificaciones, (figura 37).

Figura 37

Índice de monitoreo ambiental global



Nota: Mapa de escala del valor del índice de monitoreo ambiental GEMI en la Reserva Geobotánica Pululahua.

Cálculo de biomasa

Biomasa aérea de las coberturas vegetales

En consecuencia, de realizar el trabajo de campo, se obtuvo el DAP y cálculo de alturas, tras identificar las especies pertenecientes a cada cobertura vegetal muestreada; en el caso de la Reserva Geobotánica Pululahua, se logró identificar y muestrear en cuatro de estas coberturas vegetales que son: Bosque nativo, vegetación arbustiva, vegetación herbácea y mosaico agropecuario. Con la información recolectada se calculó la biomasa aérea por cobertura (tabla 17; tabla18; tabla19 y tabla 20).

Tabla 17

Especies de Bosque Nativo

N°	Especie	Altura (m)	Diámetro (cm) dap	Diámetro real (Dap / pi)
1	cascarilla	4,58	41	13,05
2	cascarilla	4,75	47	14,96
3	cascarilla	4,65	44	14,01
4	cichona pubenses	5,68	46	14,64
5	cichona pubenses	4,52	41	13,05
6	Chusquea scandens	4,67	48	15,28
7	miconia crocea	4,25	39	12,41
8	miconia crocea	4,33	43	13,69
9	Chusquea scandens	4,59	45	14,32
10	Chusquea scandens	4,62	47	14,96
11	Ficus eximio	4,45	44	14,01
12	Ficus eximio	4,58	50	15,92
13	aguacatillo	4,7	52	16,55
14	aguacatillo	4,69	44	14,01
15	heperomeles heterophylla	4,98	75	23,87
16	heperomeles heterophylla	4,87	73	23,24
17	heperomeles heterophylla	5,05	77	24,51
18	Bryachotum ledifolium	5,12	52	16,55
19	Bryachotum ledifolium	4,95	49	15,60
20	Bryachotum ledifolium	4,95	49	15,60
Promedio				16,23

Nota: Número de especies recopiladas es la cobertura de bosque nativo.

Aplicando la fórmula (15) que se encuentra en el apartado 3.9.4 se tuvo la biomasa aérea de la cobertura de bosque nativo es de 56,30 kg/árbol equivalente a 5,6 tn/ha.

Tabla 18

Especies de Vegetación Arbustiva

N°	Especie	Altura (m)	Diámetro (cm) dap	Diámetro real (Dap / pi)
1	cichona pubenses	5,27	46	14,64
2	cichona pubenses	5,16	45	14,32
3	aguacatillo	4,85	52	16,55
4	aguacatillo	4,75	49	15,60
5	Chusquea scandens	4,67	41	13,05
6	hedysmun luteyni	4,82	43	13,69
7	hedysmun luteyni	4,62	43	13,69
8	Chusquea scandens	4,35	45	14,32
9	Ficus aguaraguensis	5,25	95	30,24
10	Ficus aguaraguensis	5,48	97	30,88
11	Ficus eximio	4,42	45	14,32
12	Ficus eximio	5,15	53	16,87
13	ficus eximio	4,51	60	19,10
14	surros	6,78	87	27,69
15	surros	7,22	95	30,24
16	surros	6,96	91	28,97
17	higuerones	4,78	65	20,69
18	higuerones	4,96	72	22,92
Promedio				19,88

Nota: Número de especies recopiladas en la cobertura de vegetación arbustiva.

Tabla 19

Especies de Vegetación Herbácea

N°	Especie	Altura (m)	Diámetro (cm) dap	Diámetro real (Dap / pi)
1	aguacatillo	4,72	45	14,32
2	Chusquea scandens	4,55	44	14,01
3	Chusquea scandens	4,67	48	15,28
4	Bryachotum ledifolium	5,12	52	16,55
5	hedysmun luteyni	4,82	43	13,69
6	hedysmun luteyni	4,62	43	13,69
7	chusquea scandens	4,23	40	12,73
8	chusquea scandens	4,31	45	14,32
Promedio				14,32

Nota: Número de especies recopiladas en la cobertura de vegetación herbácea.

Tabla 20*Especies de Mosaico Agropecuario*

N°	Especie	Altura (m)	Diámetro (cm) dap	Diámetro real (Dap / pi)
1	heperomeles heterophylla	4,56	58	18,46
2	heperomeles heterophylla	4,63	55	17,51
3	Chusquea scandens	4,67	41	13,05
4	aguacatillo	4,72	44	14,01
5	aguacatillo	4,69	44	14,01
6	pino	4,58	51	16,23
7	pino	4,35	47	14,96
8	pino	4,71	53	16,87
Promedio				15,64

Nota: Número de especies recopiladas en la cobertura de mosaico agropecuario.

Con la adquisición de datos en cada cobertura vegetal, se calculó el promedio de DAP/pi, y se ejecutó la valoración de la biomasa aérea, mediante el uso de la ecuación (15) descrita en la metodología, para conseguir los siguientes resultados por cobertura vegetal (tabla 21).

Tabla 21*Biomasa por cobertura vegetal en la Reserva Geobotánica Pululahua*

Cobertura Vegetal	biomasa (kg/árbol)	biomasa (tn/ha)
Bosque Nativo	56,31	5,63
Mosaico Agropecuario	52,25	5,22
Vegetación Arbustiva	86,31	8,63
Vegetación Herbácea	43,24	4,32

Nota: La tabla contiene las coberturas de RGP y el cálculo de biomasa en unidades de kilogramo por árbol y toneladas por hectárea.

En la Tabla 22 se presentan los resultados de toneladas de biomasa por hectárea, obtenido por cobertura vegetal de las zonas muestreadas en la Reserva Geobotánica Pululahua, así como los niveles digitales promedio de NDVI pertenecientes a cada cobertura identificada.

Tabla 22

Datos de Biomasa por cobertura vegetal de la Reserva Geobotánica Pululahua

Cobertura Vegetal	Biomasa (tn/ha)	NDVI
Bosque Nativo	5,63	0,78
Mosaico Agropecuario	5,22	0,77
Vegetación Arbustiva	8,63	0,83
Vegetación Herbácea	4,32	0,62

Nota: La tabla presenta valores promedio de NDVI y biomasa calculada por cobertura.

Ecuación de regresión

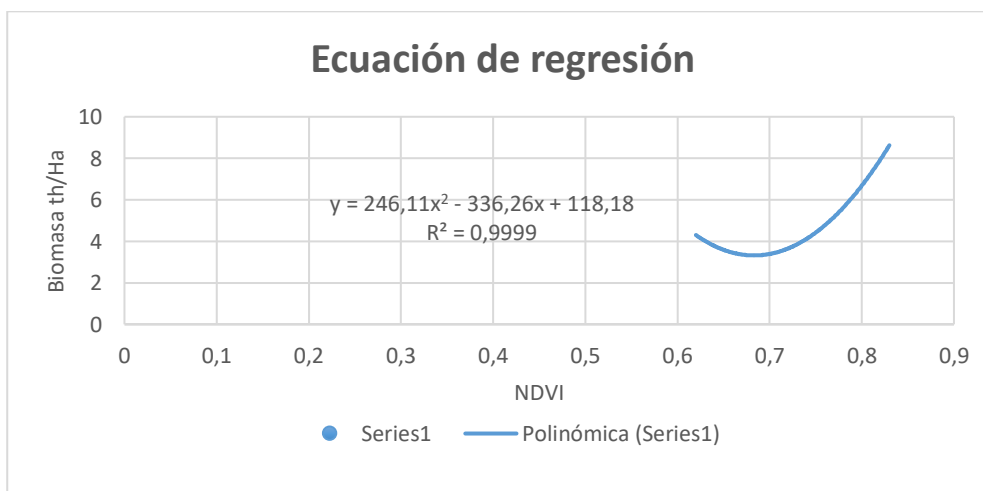
La ecuación de regresión generada se presenta a continuación con los datos adquiridos en el numeral 3.9.6, se generó la ecuación polinómica (17), al ser el mejor coeficiente de ajuste, con un $R^2 = 0,9999$, como se presenta a continuación:

$$y = 246,11x^2 - 336,26x + 118,18 \quad (17)$$

La gráfica establecida de esta relación entre la biomasa (variable dependiente) por cobertura y los índices de vegetación (variable independiente), (tabla 22), donde se aplicó la ecuación (17), para el cálculo de valores de biomasa de las coberturas vegetales faltantes pertenecientes a la reserva. (figura 38)

Figura 38

Grafica de la ecuación de regresión para estimación de biomasa



Nota: La gráfica de la ecuación representa a la variable dependiente a las toneladas de biomasa por hectárea, y variable independiente a los ND del índice NDVI.

Biomasa aérea total

Proporcionada la ecuación de regresión polinómica, se aplicó para el cálculo de biomasa para el resto de niveles digitales en las diferentes coberturas, sin olvidar descartar de este cálculo a la cobertura de infraestructura al no poseer por sus condiciones biomasa (tabla 23).

Tabla 23

Cálculo de biomasa por cobertura vegetal

Cobertura Vegetal	NDVI	Biomasa (tn/ha)	Área (Ha)	Biomasa (tn)
Bosque nativo	0,77	5,37	1757,49	9432,78
Cultivo	0,74	4,20	3,98	16,70
Erial	0,35	29,95	5,77	172,75
Infraestructura	0,15	0,00	1,71	0,00
Mosaico Agropecuario	0,77	5,18	270,77	1402,17
Pastizal	0,76	4,61	187,84	866,73
Vegetación Arbustiva	0,83	8,71	1480,20	12893,00
Vegetación Herbácea	0,62	4,30	276,15	1188,41
Total				25972,54

Nota: La tabla presenta los valores obtenidos por cobertura, calculados con la regresión lineal, y el cálculo de biomasa de toda la RGP.

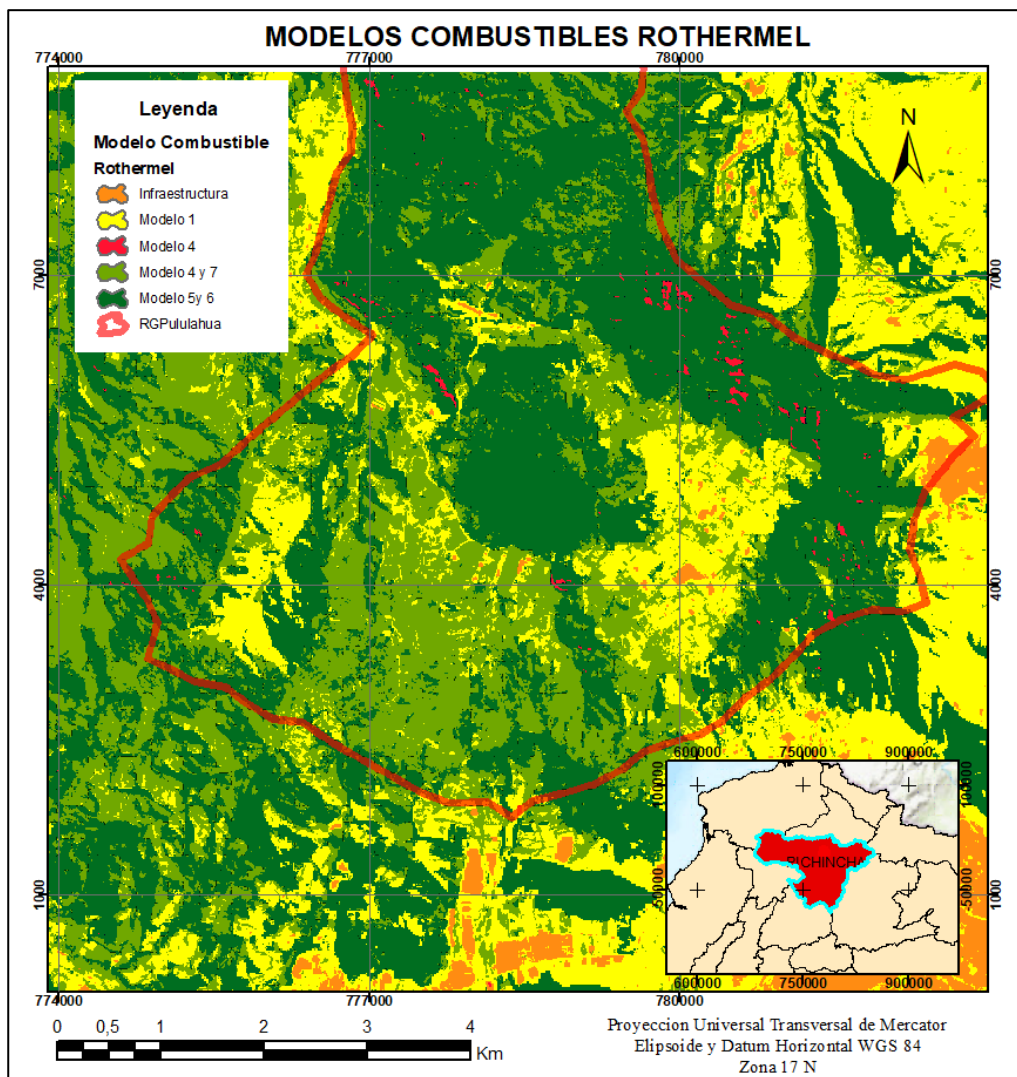
Se obtiene un total de biomasa por bosque nativo de 5,37 (ton/ha) y 9432,78 toneladas, de la cobertura de cultivo de 4,2 (ton/ha) y 16,70 toneladas, de erial de 29,95 (ton/ha) y 172,75 toneladas, en la cobertura de mosaico agropecuario de 5,18 (ton/ha) y 1402,17 toneladas, en pastizal de 4,61 (ton/ha) y 866,73 toneladas, vegetación arbustiva de 8,71 (ton/ha) y 12983,01 toneladas y en la cobertura de vegetación herbácea de 4,30(ton/ha) y 1188,41 toneladas, dando así un total de biomasa área en la Reserva Geobotánica Pululahua de 25972,54 toneladas.

Clasificación no supervisada

Con la clasificación no supervisada k-means (figura 25, metodología) se procede a clasificar los modelos combustibles según las características de la vegetación véase tabla 9, correspondiente a la clasificación de modelos según Rothermel (figura 39).

Figura 39

Modelos combustibles Rothermel



Nota: Mapa de modelos resultantes de la clasificación no supervisada del modelo combustible de Rothermel en la Reserva Geobotánica Pululahua.

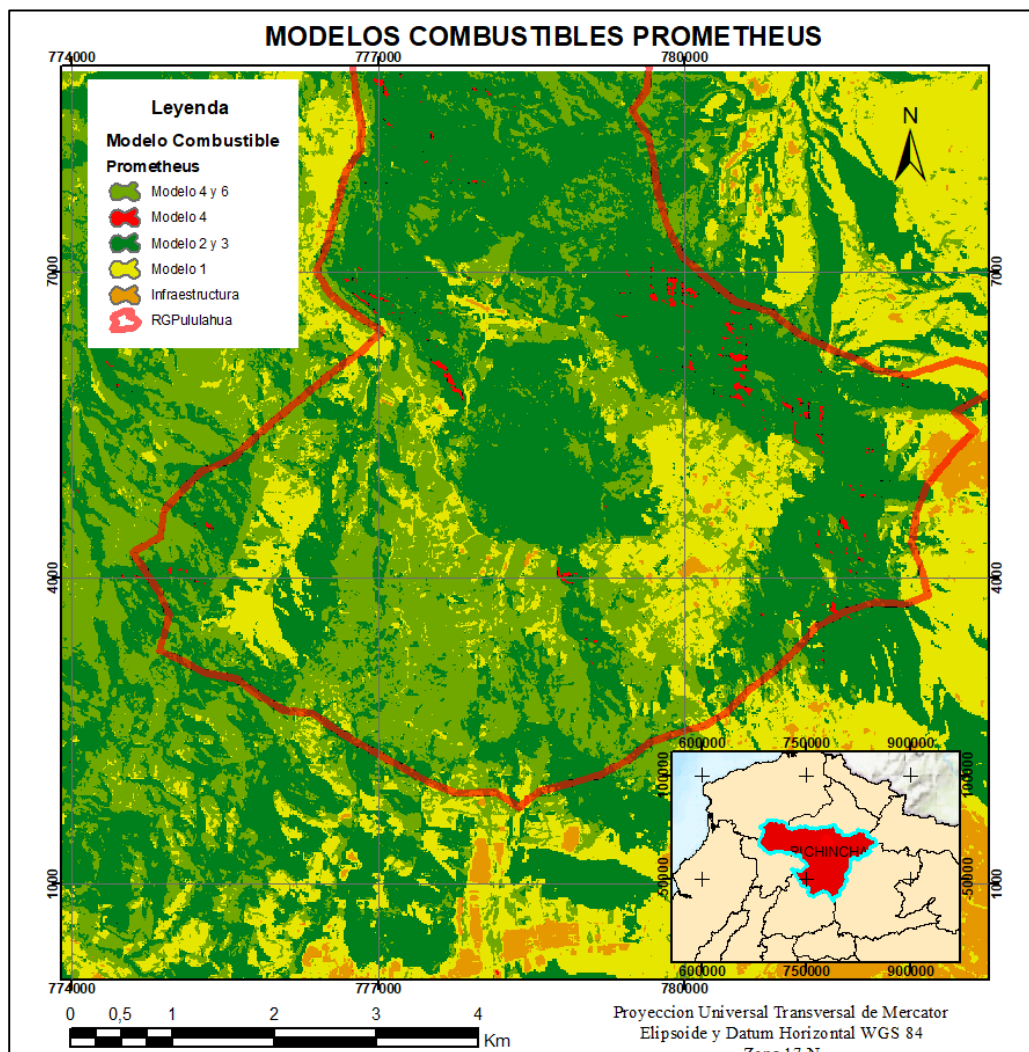
En cuanto lo obtenido en el mapa, se interpretan 5 de los 13 modelos de la clasificación de Rothermel en la Reserva Geobotánica Pululahua, correspondientes a: el modelo 1 a pastos, el modelo 4 a matorral joven, el modelo 5 y 6 a matorral denso y joven y el modelo 7 a matorral muy inflamable.

Análogamente mediante la clasificación no supervisada k-means de tallada en (figura 25, metodología); se realiza la clasificación de los modelos combustibles de Prometheus

según las características de la vegetación dentro de la Reserva Geobotánica Pululahua (tabla 100, metodología), (figura 40).

Figura 40

Modelos combustibles Prometheus



Nota: Mapa de modelos resultantes de la clasificación no supervisada del modelo combustible de Prometheus en la Reserva Geobotánica Pululahua.

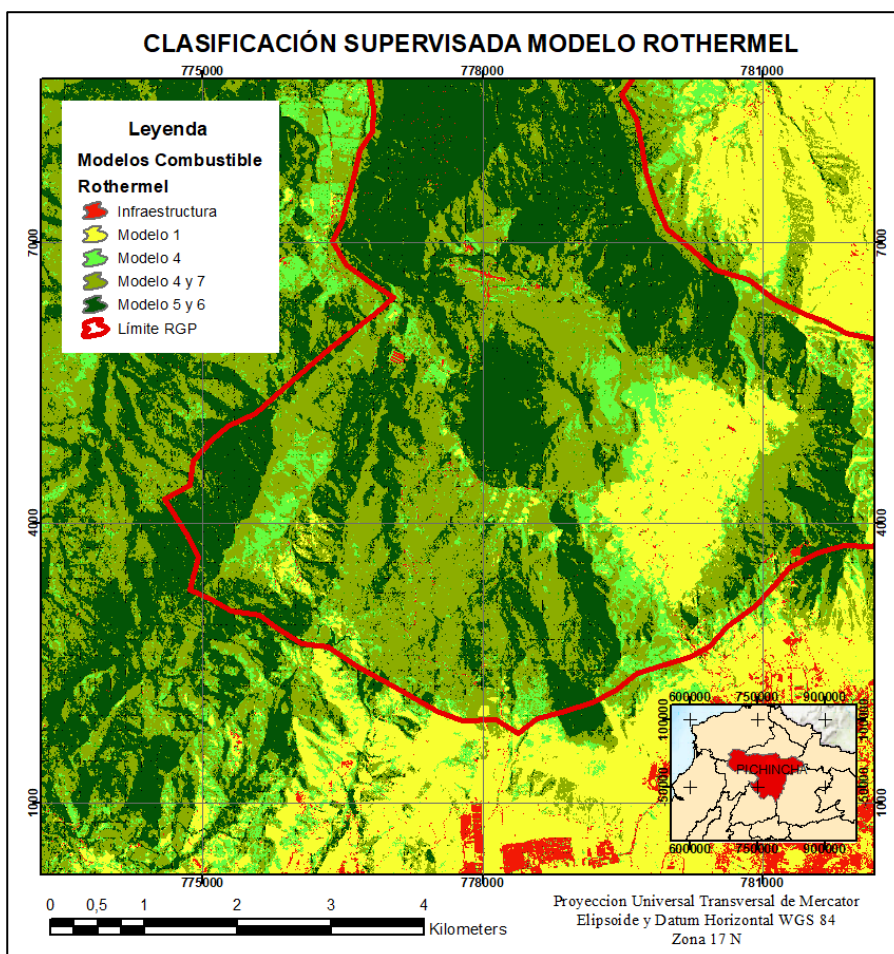
A partir de este mapa, se caracterizan 5 de los 7 modelos de Prometheus en la Reserva Geobotánica Pululahua correspondientes a: el modelo 1 a pastos, modelo 2 y 3 a matorral joven, modelo 4 a matorral de entre 2 a 4 metros y para el modelo 6 a Bosque con combustibles de superficie.

Clasificación supervisada

Con la clasificación supervisada descrita en (figura 26, metodología), se asignan sus respectivos modelos combustibles de Rothermel según las características de la vegetación como se observa en la (tabla 9, metodología),(figura 25).

Figura 41

Modelos combustibles Rothermel



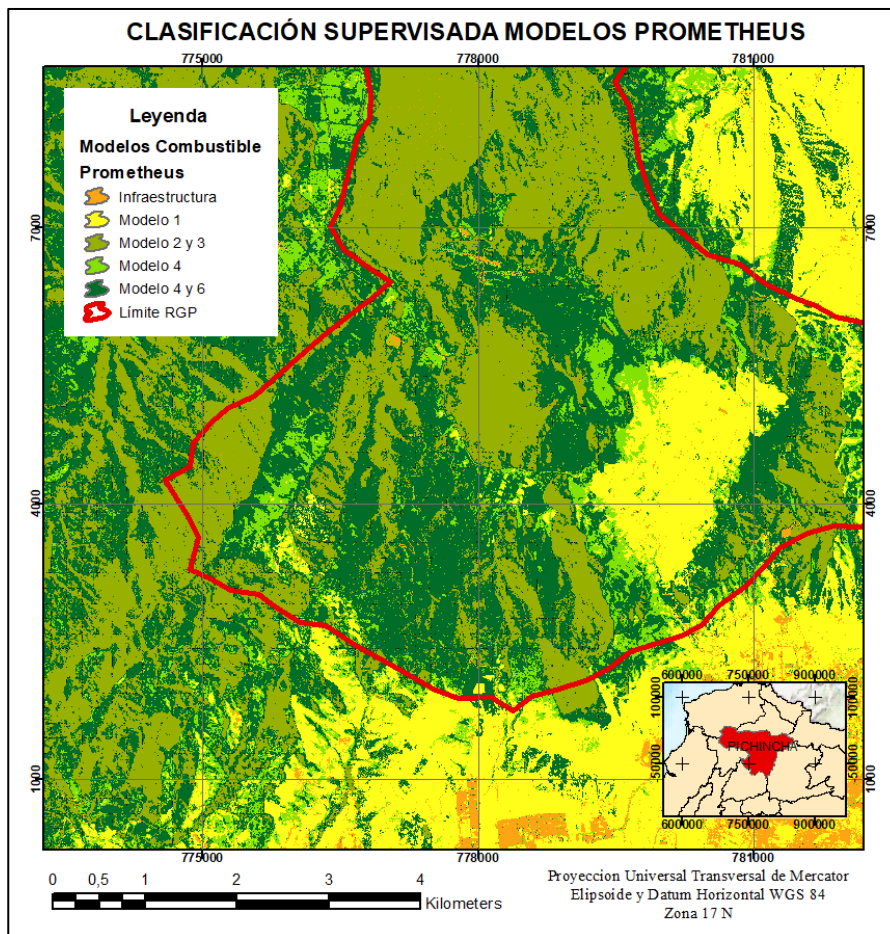
Nota: Mapa de modelos resultantes de la clasificación supervisada del modelo combustible de Rothermel en la Reserva Geobotánica Pululahua

Se percibe la representación de 5 de los 13 modelos en la reserva correspondientes: modelo 1 a pastos, modelo 4 a matorral joven, modelo 5 y 6 a matorral denso y joven y para el modelo 7 a matorral muy inflamable.

De modo similar, mediante la clasificación supervisada detallada en (figura 26, metodología) se ejecuta la clasificación de los modelos combustibles de Prometheus según las características de la vegetación (tabla 10, metodología), (figura 42).

Figura 42

Modelos combustibles Prometheus



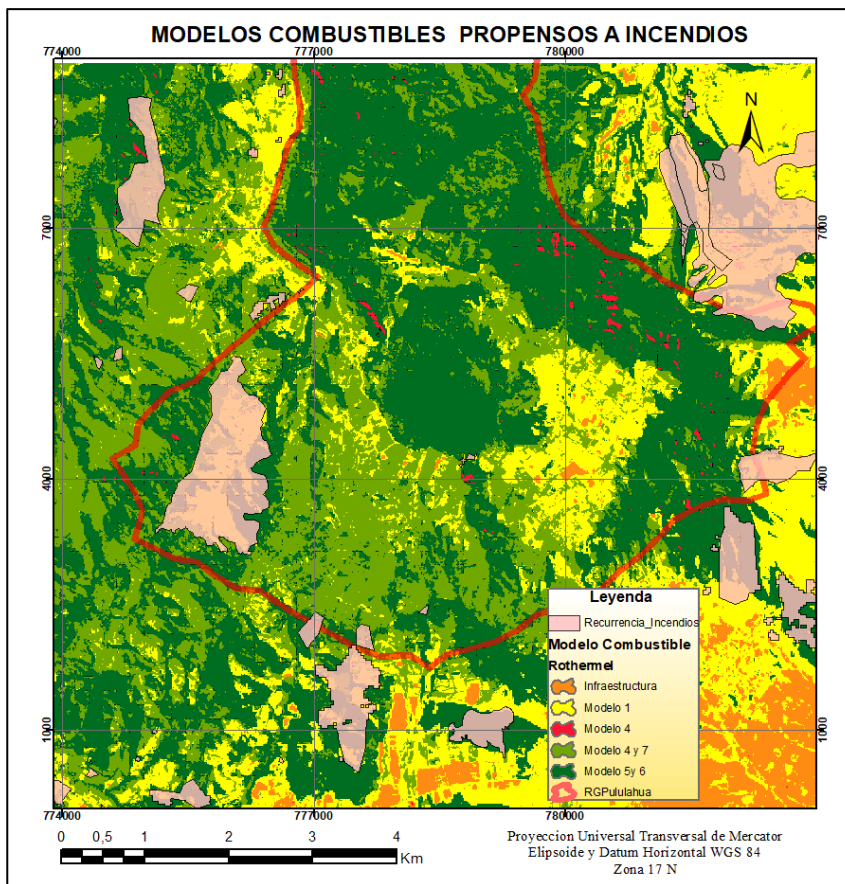
Nota: Mapa de los cinco modelos resultantes de la clasificación supervisada del modelo combustible de Prometheus en la Reserva Geobotánica Pululahua.

De igual manera que la clasificación no supervisada, se obtienen 5 de los 7 modelos de Prometheus en la Reserva Geobotánica Pululahua correspondientes a: el modelo 1 pastos, modelo 2 y 3 matorral joven, modelo 4 matorral de entre 2 - 4 metros y para el modelo 6 de bosque con combustibles de superficie.

Con la finalidad de conocer el tipo de modelos combustibles relacionados a incendios forestales dados en años anteriores, se asocia al tipo de combustible característico de una zona en los incendios con las áreas cartografiadas pertenecientes a estos incendios (figura 43).

Figura 43

Zonas propensas a incendios



Nota: Mapa de áreas de recurrencia de incendios según el tipo de material combustible al que pertenecen dentro de la Reserva Geobotánica Pululahua.

La predicción e interpretación de los resultados adquiridos de tipos de modelos combustibles, se obtiene que la información representa a zonas de pasto correspondientes al modelo 1; estas se encuentran como las más propensas a arder, y se ubican a la par en áreas cercanas a modelos 5 y 6 correspondientes a matorrales denso y joven, que en épocas de sequía se convierten en material combustible seco que son de riesgo para la Reserva Geobotánica Pululahua.

CAPITULO 5

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- De la recopilación de 25 coberturas se obtuvo la base de datos que dio como resultado la información que se empleó para la generación de la cartografía de modelos combustibles, conformada por tres imágenes Sentinel-2 y una imagen Spot 6, comprendidas entre los meses de junio a agosto (épocas secas) pertenecientes a los años 2017,2018,2019 y 2020.
- Las correcciones atmosféricas y topográficas realizadas en las imágenes satelitales, brindaron una mayor fiabilidad en los resultados, tanto en los índices de vegetación como en la clasificación supervisada y no supervisada, que permitieron una mejor interpretación de los modelos combustibles.
- Las características del material combustible de la Reserva Geobotánica Pululahua identificadas en el trabajo de campo y de gabinete, evidencian que las zonas de pastos y matorrales secos son los más propensos a provocar un incendio forestal debido a su alta inflamabilidad.
- Las clasificaciones supervisadas y no supervisadas del modelo combustible de Rothermel en la Reserva Geobotánica Pululahua obtuvieron como modelos característicos al 1, 4,5,6 y 7 que pertenecen al grupo de pastos y matorral.
- Las clasificaciones supervisadas y no supervisadas del modelo combustible de Prometheus se obtuvieron como modelos característicos al 1, 2,3,4 y 6 que pertenecen al grupo de pastos, matorral y bosques.
- El modelo 1, correspondiente a pasto, presenta de las clasificaciones de los modelos combustibles de Rothermel y Prometheus para incendios forestales, presentan una concordancia en las áreas más propensas a incendiarse , ya que

el fuego se propaga principalmente por el pasto, y la velocidad de propagación esperada en este modelo se encuentra en un rango de moderada a alta.

- En el modelo 4, correspondiente a matorral en la clasificación de Rothermel, se puede evidenciar pesadas cargas de combustible muerto (leñoso). En este modelo se esperan fuegos intensos, con altas velocidades de propagación, similar a la formación vegetal del modelo 7, donde el tipo de matorral también es inflamable.
- La estimación de biomasa forestal en la Reserva Geobotánica Pululahua fue de 25972.54 toneladas, obtenida por cobertura vegetal; así: en la cobertura de bosque nativo se registró 56,31 kg/árbol equivalente a 5,63 toneladas por hectárea de biomasa, en la cobertura de mosaico agropecuario de 52,25 kg/árbol equivalente a 5,22 toneladas por hectárea de biomasa, en la cobertura de vegetación arbustiva 86,31 kg/árbol equivalente a 8.63 toneladas por hectárea de biomasa y en la vegetación herbácea 43,24 kg/árbol equivalente a 4,32 toneladas por hectárea de biomasa.
- El índice de vegetación normalizado NDVI junto a la aplicación de las ecuaciones alométricas, permitieron realizar el cálculo de las zonas a las que no se logró tener acceso por la emergencia sanitaria, por lo cual, mediante la ecuación de regresión lineal se remplazaron estos valores, obteniendo así los cálculos de biomasa de tres coberturas: la de pastizal con un valor de 4,61 toneladas por hectárea, la de cultivos con un valor de 4,20 toneladas por hectárea y la de erial con un valor 2,95 toneladas por hectárea.

Recomendaciones

- Para un subsecuente estudio sería importante que instituciones encargadas en el desarrollo de planes de manejo de incendios forestales, como el cuerpo de

bomberos y el programa de “Amazonia sin Fuego”, puedan obtener un muestreo más completo de las especies características por cobertura vegetal. También se pueden integrar otras tecnologías geoespaciales que permitan una mejor estimación de la biomasa forestal en la Reserva Geobotánica Pululahua, misma que debe ser conservada, dado que alberga un número importante de orquídeas de gran valor para el país. Esta información permitiría conocer el grado de afectación que la reserva podría presentar ante un posible incendio forestal, ayudando así a la prevención de futuras pérdidas y fomentando la realización de estrategias para combatir el fuego en zonas de alta inflamabilidad.

- La réplica de estudios en instituciones encargadas del monitoreo, prevención y extinción de incendios forestales, podrían integrarse al cuerpo de bomberos, siendo de gran aporte para evitar la recurrencia de estos sucesos, que en la mayoría de los casos tiene graves consecuencias, dando causa a la pérdida de la biodiversidad, así como también áreas protegidas y afectación de los espacios públicos y privados de diversos usos, causando un malestar, no solo a las zonas afectadas sino también al bienestar de las personas que se encuentran a sus alrededores.
- Al integrar estudios como este en el plan de manejo o planes de intervención oportuna para incendios, se vuelve aplicativo la realización de las clasificaciones de modelos combustibles, con el fin de promover respuestas oportunas y evitar de esta manera incendios como el causado en agosto del 2019, donde la Reserva Geobotánica Pululahua sufrió la pérdida de 91 hectáreas de bosque. La incorporación de estos estudios permitirá mejorar la información base que posee el cuerpo de bomberos y el programa “Amazonia sin fuego”, a su cartográfica para combatir la propagación de incendios.

Referencias Bibliográficas

- Aeroterra. (2020). *What is a GIS?* . Obtenido de <https://www.aeroterra.com/es-ar/que-es-gis/introduccion>
- Alvarez, G. (2008). *Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del tópic de Cochamba, Bolivia Biomasa forestal*. Turalba, Bolivia: Centro Agronomico tropical de investigación y enseñanza .
- Andreae, O. (1991). *Biomass burning: Its History ,use and distribution and its impact on enviroment quality and global climate*. MIT Press Cambridge. Boston: Levine.
- Arcgeek. (01 de 04 de 2020). *Clasificación supervisada y no supervisada en ArcGIS*. Obtenido de <https://acolita.com/clasificacion-supervisada-no-supervisada-en-arcgis/>
- ASTRIUM. (2019). Spot 6 y Spot 7: Ficha Tecnica. 3-4.
- Astudillo, P. (2019). *VALORACIÓN ECONÓMICA DEL PARQUE PERLA UBICADO EN LA CIUDAD DE LAGO AGRIO*. Sangolquí: ESPE.
- Baker, T., Kerski, J., Huynh, N., Viehring, k., & Bednan. (2012). Call for an agenda and Center for GIS education research. En *Review of Internacional Geographical Education Online* (págs. 254-28).
- Bastarrika, A. (2009). Cartografía automática de área quemada a nivel local-regional mediante algoritmos de contexto espacial. *Universidad de Alcalá*, 293.
- BBC. (2020). *Departamento de Agricultura de Australia y servicios de control de incendios*. Australia: BBC.
- Bomberos, C. d. (2019). *Incendios afectan a más de 13 000 hectáreas de vegetación en Ecuador*. Quito: El Comercio.
- Bosque-Sendra. (1997). *Sistemas de Información Geográfica*. Rialp.
- Bravo Morales, N. F. (2017). Teledetección espacial Landsat, Sentinel-2, ASTER L1T y MODIS. *GEOMATICA AMBIENTAL SRL*, 27-28.
- Brown , S., & Lugo, A. (1997). Tropical secondary forest . En *Journal of Tropical Ecology*, 6,. Canalla, Rome, Italy: Food and Agriculture Organization .
- CADENA, G. J. (2016). *ESTUDIO DE CAPACIDAD DE CARGA DE LOS SENDEROS TURÍSTICOS*. Quito: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL.
- Chavero, P. (2013). *Cartografía de Modelos de Combustible del Monte N°118 del C.U.P (Término Municipal de Cuenca) Basasda en datos de Sensores Remotos*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Chávez, P. (1996). Image-based atmospheric corrections. Revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62 .
- Chéret, V. &. (2007). *Mapping wildfire danger at regional scale with an index*.

- Chuvieco , E., & Martín. (2004). *Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Chuvieco , E., & Martín, M. (2004). *Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales*. Madrid: Bouncopy S.A.
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid: Rialp.
- Chuvieco, E. (2000). *Fundamentos de la Teledetección*. En *Espacial, 3º edición revisada*. . Madrid: Ediciones RIALP S.A.
- Chuvieco, E., & Martín , M. (1998). Cartografía de grandes incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR. *Serie Geográfica*, 7:109-128.
- Chuvieco, E; Salas, J. (1995). Aplicación de imágenes Landsat-TM a la cartografía de modelos combustibles. *Revista de Teledetección*, 3-5.
- Climate-data.org. (2013). *QUITO CLIMA (ECUADOR)*. Obtenido de <https://es.climate-data.org/america-del-sur/ecuador/provincia-de-pichincha/quito-1012/>
- COMERCIO, E. (08 de 29 de 2019). *Incendio Forestal en Quito -Pululahua-Bomberos*. Obtenido de <https://www.elcomercio.com/actualidad/quito-pululahua-incendio-bomberos-hectareas.html>.
- Comercio, E. (2019). *Incendio Pululahua 80 hectareas afectadas*. Quito: Primicias.
- CONACYT. (19 de 03 de 2020). *Tecnologías Geoespaciales*. Obtenido de Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial: https://www.centrogeo.org.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=46&Itemid=248
- CONAE. (2017). *Guía única de productos SPOT*. 5-8.
- Cortes, Á. N. (2015). *ESTIMACIÓN DE BIOMASA ARBOREA POR MEDIO DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA EL PARQUE NACIONAL NATURAL LA PAYA*. . Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- David, R. (2000). Corrección Atmosférica y Topográfica, Información Multitemporal y Auxiliar Aplicadas a la Cartografía de Modelos de Combustibles con Imágenes Landsat-TM . En *Departamento de Geografía* (págs. 222-239). Alcalá de Henares y Guadalajara: Universidad de Alcalá.
- Domínguez, E. (2010). *Instrumentos para la medición de variables dasométricas. Fundamentos y elaboración con el alumno del ciclo formativo “Técnico Superior en Gestión y Organización de Recursos Naturales Paisajísticos”*. Córdoba-Argentina: Innovación y Experiencias Educativas. No. 28.
- E.L., L. M. (2014). *Alométricos para la estimación de la Biomasa Aérea total en el páramo de Anaimé*. Tolima,Colombia: Departamento de Tolima.

- Echeverría, A., Pachacama, R., Villaverde, Y., & Proaño, N. (2018). CÁLCULO DE BIOMASA AÉREA Y CARBONO CAPTURADO DE LA RESERVA YANACOCCHA A TRAVÉS DE IMÁGENES SATELITALES. *Resvista Geoespacial*, 36-43.
- Ecuventure. (2020). *Pululahua*. Obtenido de <https://ecuventure.com/es/Mountains/pululahua/>
- Escobar, R. (2016). *Estimación de Biomasa Forestal de la Sierra San Miguelito por medio de Imágenes Satelitales*. México: Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica.
- ESRI. (2010). *What is a GIS?* <http://www.esri.com/>. Obtenido de <http://www.esri.com/>
- Estacio, J., & Narváez, N. (2011). *Incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito(DMQ): Conocimiento e intervención pública del riesgo*. Francia: Universidad de Savoie.
- FAO. (2008). *Manejo de Fuego: Directrices de carácter voluntario para el manejo de fuego*. Departamento Forestal. Roma: FAO.
- Fernandez, V. (2011). Geotecnologías y modelos de combustibles en la prevención de Incendios Forestales en Uruguay. 10-12.
- Fing.edu. (2011). Archivo de corrección de imágenes y clases de sensores. *PROCIMAGEN*, 97.
- Fonseca, W., Ruiz, L., & Rojas, M. (2013). Modelos alométricos para la estimación de biomasa y carbono en *Alnus acuminata*. Costa Rica: Universidad Nacional Costa Rica.
- Foody, G., Boyd, D., & Cutler, M. (2003). Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their between regions. En *Remote Sensing Environment* (págs. 85:463-474).
- Forestal, C. N. (2010). *Incendios forestales. Guía práctica para comunicadores*. Zapopan : Comisión Nacional Forestal.
- Fuccaraccio, F., & Staffieri, G. (1999). *Desarrollo y uso de ecuaciones de volumen y tablas de volumen en la República Argentina*. Obtenido de <http://ceres.agro.unlp.edu.ar/~dasometria/Informe%20Final%20Staffieri%20y%20otro.pdf>
- García, M., & Chuvieco, E. (2004). *Assesmentes od potential in os SACC/MMRS imagery for mapping burned areas in Spain*. 92:414-416: Remote Sensing Environment.
- Garrido, R. (2016). *Defensa y prevención de incendios forestales*. España: SINTESIS S.A.
- GEOCENTO. (16 de 07 de 2020). *Satélite de imágenes SPOT-6*. Obtenido de <http://geocento.es/galeria-de-satelites-para-buscar-y-adquirir-imagenes/satelite-imagenes-spot-6/>
- GEODIM, S. (2018). Sentinel 2A. 1-2.

- Geograf. (2000). El Modelo Digital de Terreno (MDT). 17-22.
- Geograf. (s,f). Correcciones de Imágenes de satélite. 10p.
- Gilabert, M., Gonzàles , P., & Garcia Haro, J. (1997). *Acercas de los indices de vegetacion*. Burjassot Valencia : Universidad de Valencia.
- Gonzaga, C. (2014). *Aplicación de Indices de Vegetación de Imágenes Satelitales Landsat ETM+y ASTER para la caracterización de la cobertura vegetal en la zona centro de la provincia de Loja,Ecuador*. Ecuador: Universidad de La Plata.
- Hanes, J. (2014). *Biophysical Applications of Satellite Remote Sensing*. Berlin, Heidelberg: Springer Remote Sensing/Photogrammetry.
- Herrera, G. (2016). ESTUDIO DE CAPACIDAD DE CARGA DE LOS SENDEROS TURÍSTICOS DE LA RESERVA GEBOTÁNICA PULULAHUA. Quito-Ecuador: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL.
- Huete, A. (1998). Asoil -adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Enviroment* , 25:295-309.
- Huete, A. R. (1988). Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) . *Remote Sensing of Enviroment*.
- IGN. (2015). *Bases Geográficas*. Madrid- España: Instituto Geográfico Nacional.
- Inegi. (s,f). Imágenes de satélite.
- Jàtiva, A. (2013). *El presente trabajo no aplica a ningún programa de investigación de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE*. Sangolquí : Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Jimenez, A. (2014). Integración de las Tecnologías Geoespaciales como herramientas docentes de Ciencias de la Tierra para Educación Secundaria. *Researchgate*, 4-6.
- Key, C., & Benson . (2005). *Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and Remote sensing of severity , the Normalized Burn Ratio, en FIREMON:Fire Efeccts Monitoring and Inventory System*. Orgen UT,USDA : Forest Service .
- Loestch, F., & Haller, K. (1973). *Forest inventory*. Volume II. English by K.F panzer. Germany : BLV Verlagsgsellschae Munsen Bren Wrien.
- MAE. (2012). *PLAN DE MANEJO DE LA RGP*. Quito: MAE.
- MAE. (2020). *Prevención y control de incendios una prioridad nacional*. Quito: MAE.
- MAE, E. (2010). *PLAN DE CONTROL Y VIGILANCIA DE LA RESERVA GEBOTÁNICA PULULAHUA*. Quito : MAE.
- MagsterGis. (01 de 01 de 2019). *Características de los satélites Sentinel*. Obtenido de <https://www.mastergis.com/caracteristicas-sentinel/>

- Martin , M., & Chuvieco , E. (2005). *Performance of a burned-area index (BAIM) for mapping Mediterranean burned scars from MODIS data.* In *Proceeding of the 5th International Workshop on Remote Sensing and GIS applications to Forest Fire Management*. Paris: Universidad de Zaragoza.
- Martin, M., Gómez, & Chuvieco, E. (2005). *Performance of a burned area index (baim) for mapping Mediterranean burned scars from MODIS data*, en *Proceedings of the 5th International Workshop on Remote Sensing and GIS applications to Forest Fire Management: Fire Effects Assessment*. 193-198: Universidad de Zaragoza, GOFC-GOLD.
- Maxouris, C. (2020). *La devastación de los incendios en Australia*, en números. Australia: CNN.
- Mieza, M., Kovac, F., & Martinez, D. (2012). *Imágenes satelitales y aéreas en aplicaciones sitio específicas*. La Pampa: INTA.
- Muñoz, P. (2013). Apuntes de Teledetección: Índices de Vegetación . *Researchgate*, 2-7.
- Oliva, P., & Verdu , F. (2008). Revisión de la utilización de diferentes índices espectrales y técnicas para la cartografía de área quemada en imágenes MODIS. *Uned. Espacio, Tiempo y Forma*, 129-139.
- Pereira, J. (1999). A Comparative Evaluation of NOAA/AVHRR Vegetation Indices for Burned Surface Detection and Mapping Transactions in Geoscience and Remote Sensing.
- Person. (2005). Sourcebook for land use, land- use change and forestry projects. Winrock International and the Biocarbon fund of the World Bank. Obtenido de W.
- Pinty , B., & Vestrete, M. (1992). GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. 101:15-20.
- Plana, E., Font, M., & Serra, M. (2016). *Los Incendios Forestales*. Proyecto eFIRECOM Ediciones CTFC. 32pp.
- PROMIF. (2015). *METODOLOGIA DE INVESTIGACIÓN DE CAUSAS DE INCENDIOS FORESTALES*. Panama: ITTO.
- Ramos, X. (2019). *62.000 hectáreas de bosque afectadas por incendios desde 2012 en Ecuador*. Quito: El Universo.
- Reinoso, N. (2016). Índices espectrales para detección de áreas quemadas. *Universidad Federal de Tocantins*, 2-5.
- REMER, V. (20 de 03 de 2020). *Incendios*. Obtenido de <http://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpeta02/carpeta24/vademecum17/vdm010.htm>
- Ressl, R., & Cruz, I. (2012). Detección y monitoreo de incendios forestales mediante imágenes de satélite. *CONABIO, Biodiversitas*, 100:12-13.

- Riano, D. (2000). *Corrección Atmosférica y Topográfica, Información Multitemporal y Auxiliar Aplicadas a la Cartografía de Modelos de Combustibles con Imágenes Landsat-TM*. Madrid: Universidad de Alacala .
- Riaño, D., Salas, J., & Chuvieco, E. (2000). *Corrección Atmosférica y Topográfica, Información Multitemporal y Auxiliar Aplicadas a la Cartografía de Modelos de Combustibles con Imágenes Landsat-TM*. Madrid: Universidad de Alcalá.
- Richardson, A., & Everit. (1992). Using spectral vegetation indices to stimate rangeland productivity. En *Compared several different vegetation indices (including SAVI) to see wich ones performed best for predicting biomass in rangeland , SAVI permormed about as well as other vegetation indices*. (págs. 7 (1):63-69). Geocarto International.
- Riesgos, S. d. (2019). *Informe de Situación - Incendios Forestales a nivel nacional 2019*. Quito : Dirección de Monitoreo de Eventos Adversos.
- Rogan, J., & Franklin, J. (2001). Mapping wildfire burn severity in Southern California Forest and shrublands using enhanced Thematic Mapper Imagery. *Geocarto International* , 16:89-99.
- Rojas, S. (2015). *ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES RADAR*”. Madrid- España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía Universidad Politécnica de Madrid.
- Rouse, J. (1974). *Monitpring the vernal advancement andretrogadation (Greenwave effect) of natural vegetation*. Greenbelt,USA: NASA/GSFCT.
- Sanchez, E., Torres , M., Palacios, A., & Pino, S. (2000). *Comparaciòn del NDVI con el PVI y el SAVI como Indicadores para la Asignaciòn de Modelos de Combustistible para la Estimaciòn del Rlesgo de Incendios en ANdaluca. Tegnologias Geogràficas para el Desarrollo Sostenible*. España: Univrsaidad de Alcalà.
- Segura , M., & Kanninen , M. (2005). Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. *Biotropica*, 2-8.
- Serra, M. (2016). *Los Incendios Forestales*. Cataluña: Comisión europea.eFIREcom.
- SIERRA, R. (. (1999). *Propuesta Preliminar de un Sistema de Clasificación de Vegetación para el Ecuador Continenta*. Quito, Ecuador: Proyecto INEFAN/GEF-BIRF y Ecociencia.
- SIGTIERRAS. (2016). *Metadatos de sigtierras*. Obtenido de http://metadatos.sigtierras.gob.ec:8080/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/MDT_SIGTIERRAS_16092016
- Sit, V., & Poulin-Costello, M. (1994). *Catalogue of curves for fitting. biometricis information*. Columbia: Ministry of Forest Research Program.

- SNI. (2019). *Informe de Situación - Incendios Forestales a nivel nacional 2019*. Quito: Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias.
- SUIA. (2011). *Plan de Manejo del Pululahua*. Quito: MAE.
- Teillet, P. G. (1982). On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 86-102.
- Uniovido. (10 de 08 de 2020). *El algoritmo k-means aplicado a clasificación y procesamiento de imágenes*. Obtenido de https://www.unioviedo.es/compnum/laboratorios_py/kmeans/kmeans.html
- Vallejo, J. L. (2005). *Establecimiento de parcelas permanentes en bosques de Colombia*. Bogotá D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. .
- Velazco. (2013). *INCENDIOS EN EL BOSQUE LA PRIMAVERA:(JALISCO, MÉXICO): UN ACERCAMIENTO A SUS POSIBLES CAUSAS Y CONSECUENCIAS*. México: CIENCIA UAT.
- Ventrua, Martin , M., & Chuvieco, E. (2002). *Burned land mapping using NOAA-AVHRR and TERRA-MODIS,IV international conference on Forest Fire Research*. Luso, Coiumbra, Portugal, Millpress: Wild land safety summit.
- Villareal, H. Á. (2004). *Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad*. Bogotá : D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Zheng, D. (2004). Estimating abovegroup biomass using Landsat ETM+ data across a managed landscapein northern Wisconsin. USA: Remote Sens Environ .

Anexos

Anexo 1

Puntos GPS

PUNTO	ESTE	NORTE	ALTURA(m)	NOTA
1	779847	10003039	2833	ENTRADA
2	779818	10003086	2836	Sin Vegetación
3	779818	10003088	2837	
4	779788	10003136	2833	Especie 1
5	779783	10003117	2843	Especie 2
6	779773	10003139	2834	Especie 3
7	779769	10003137	2835	
8	779771	10003145	2835	
9	779829	10003082	2838	Especie 4
10	779824	10003073	2837	Especie 5
11	779836	10003070	2835	LETRERO
12	779845	10003056	2835	PUERTA
13	779854	10003048	2838	Especie 6
14	779878	10002982	2828	
15	779880	10002983	2828	
16	777754	10001219	2918	Especie 8
17	777919	10001979	2987	
18	777869	10002186	3009	
19	776801	10004010	2863	especie 10
20	776803	10004014	2859	Especie 11
21	777315	10004860	2476	especie12
22	779586	10003901	2538	
23	779585	10003896	2536	especie 13
24	779585	10003900	2542	Especie 14
25	779589	10003918	2532	Especie 15
26	779551	10003966	2534	Especie 16
27	779420	10004117	2530	Especie 17
28	779330	10004226	2526	Especie 18
29	779212	10004370	2526	SENDERO CHIVO
30	777920	10004685	2452	especie 19
31	777134	10004584	2462	especie 20
32	776740	10004797	2693	especie 21
33	776858	10004509	2723	especie 22
34	776937	10003906	2842	especie 23
35	776825	10003161	2955	
36	776856	10003119	2961	
37	777654	10002786	3070	ENTRADA 2
38	777681	10002795	3067	SENDERO VIENTO
39	777686	10002793	3069	ARBOL

Continua...

PUNTO	ESTE	NORTE	ALTURA(m)	NOTA
40	777686	10002796	3065	especie 24
41	777741	10002781	3063	especie 25
42	777822	10002785	3064	
43	777832	10002802	3042	Especie 26
44	777767	10002811	3039	Especie 27
45	777724	10002831	3030	Especie 28
46	777663	10002861	3028	Especie 29
47	777700	10002859	3018	Camino
48	777741	10002844	3013	Sendero
49	777756	10002842	3014	
50	777749	10002844	3018	Salida

Nota: La tabla muestra la toma de puntos GPS