



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES
ESCUELA DE INGENIERÍA EN ECOTURISMO

**IDENTIFICACIÓN DE LA ESPECIE *Polylepis reticulata* MEDIANTE
TELEDETECCIÓN EN LAS ZONAS ALTO ANDINAS DEL
ECUADOR**

TRABAJO DE TITULACIÓN
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA TITULACIÓN DE GRADO

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL TÍTULO DE INGENIERO EN ECOTURISMO**

OSCAR NELSON CONTRERAS ARÉVALO

RIOBAMBA- ECUADOR

2019

©2019, Oscar Nelsinio Contreras Arévalo

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

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES****ESCUELA DE INGENIERÍA EN ECOTURISMO**

El Tribunal del Trabajo de Titulación, certifica que: la memoria de Tesis titulada IDENTIFICACIÓN DE LA ESPECIE *Polylepis reticulata* MEDIANTE TELEDETECCIÓN EN LAS ZONAS ALTO ANDINAS DEL ECUADOR, de responsabilidad de la señor egresado Oscar Nelsinio Contreras Arévalo, ha sido prolijamente revisada por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, quedando autorizada la presentación y defensa

CARLOS ARTURO JARA SANTILLÁN
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



ANDREA DAMARIS HERNÁNDEZ ALLAUCA
ASESORA DEL TRIBUNAL



Yo, Oscar Nelsinio Contreras Arévalo soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta Tesis elaborada en su totalidad con fines académicos y el patrimonio intelectual del Trabajo de Titulación de Grado pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



Oscar Nelsinio Contreras Arévalo

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Oscar Nelsinio Contreras Arévalo, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes y el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Riobamba, Marzo del 2018



Oscar Nelsinio Contreras Arévalo

Cédula de Ciudadanía: 060398247-1

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación está dedicado

A toda la planta docente y equipo de investigadores de la Facultad de Recursos Naturales que confiaron en mis capacidades, poniendo a prueba la formación académica adquirida en las aulas y campo.

Además, dedico este trabajo a mis padres Dalila Arévalo y Nelson Contreras quienes son pilar fundamental para este logro y confiaron todos estos años dedicándome su apoyo y consejos para poder culminar mi formación académica.

A mis hermanos y cuñados Lilian, Gabriela, Juan, Aberoes, Carmen, Omar, Marilú, Vyron, Ney, Nathalia, Cecibel, que de una u otra forma estuvieron en momentos difíciles de mi vida. Mi amada novia Daniela Villagómez que ha sido mi fortaleza en estos últimos años y siempre hemos salido adelante pese a las adversidades y las pruebas que la vida nos impone.

Finalmente, a todas mis sobrinas y sobrinos mostrándoles que los sueños se cumplen si se lucha por aquellos, día a día sin dejarnos vencer.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios y a la virgen del de Guadalupe por cuidar a mi madre que es mi vida entera y tenerla conmigo al final de esta etapa.

A mi familia por brindarme la confianza, comprensión y ayuda en cada instante de este proceso.

A mis profesores Ing. Carlos Ricaurte por la confianza brindada en su proyecto, Ing. Carlos Jara, Lic. Andrea Hernández que me brindaron su tiempo y me guiaron a través de mi investigación.

Sin tampoco olvidar a mis amigos que compartimos momentos de alegría, tristeza, presentes en mi vida formando un mundo de alegría en esta vida universitaria, gracias por su apoyo y amistad sincera.

A todas gracias...

Contenido

<i>I. IDENTIFICACIÓN DE LA ESPECIE <i>Polylepis reticulata</i> MEDIANTE TELEDETECCIÓN EN LAS ZONAS ALTO ANDINAS DEL ECUADOR</i>	<i>1</i>
<i>II. INTRODUCCIÓN</i>	<i>1</i>
A. IMPORTANCIA	1
B. PROBLEMA	2
C. JUSTIFICACIÓN	2
<i>III. OBJETIVOS</i>	<i>3</i>
A. GENERAL	3
B. ESPECÍFICOS	3
<i>IV. HIPÓTESIS</i>	<i>4</i>
A. ALTERNANTE	4
B. NULA	4
<i>V. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</i>	<i>5</i>
A. TELEDETECCIÓN Y SIG	5
1. Sensores remotos	5
2. Sistemas de información cartográfica	6
B. VEGETACIÓN ANDINA	8
1. Marco legal forestal	8
2. Reserva de Producción de Flora y Fauna	9
C. RANDOM FOREST	11
1. Algoritmo Random Forest	11
<i>VI. MATERIALES Y MÉTODOS</i>	<i>12</i>
A. CARACTERIZACIÓN DEL LUGAR	12
1. Localización	12
2. Ubicación Geográfica	12
3. Límites	12
4. Características climáticas	13
5. Clasificación ecológica	13
6. Materiales y equipos	15
B. METODOLOGÍA	16
1. Calcular los índices de vegetación de la especie <i>Polylepis reticulata</i> Hieron	16

2. Identificar la distribución de la especie <i>Polylepis reticulata</i> Hieron en las zonas alto andinas del Ecuador	19
3. Evaluar la precisión del clasificador Random Forest para identificar la especie <i>Polylepis reticulata</i> Hieron en las zonas alto andinas del Ecuador	21
VII. RESULTADOS	26
A. CÁLCULO DE ÍNDICES ESPECTRALES	26
1. Análisis de la ortofotografía e imagen satelital	26
2. Georreferenciación de zona de estudio	34
3. Corrección y procesamiento de información satelital	36
4. Cálculos de índices espectrales de vegetación del Bosque de <i>Polylepis</i>	38
5. Limitaciones del área de cobertura en Imágenes satelitales Sentinel 2A	50
B. IDENTIFICACIÓN DE LA ESPECIE <i>Polylepis reticulata</i> Hieron	51
1. Aplicación del algoritmo de clasificación Random Forest primer entrenamiento en la Ortofotografía	51
2. Aplicación del algoritmo de clasificación Random Forest segundo entrenamiento en la Ortofotografía	53
3. Aplicación del algoritmo de clasificación Random Forest tercer entrenamiento en la Ortofotografía	56
4. Aplicación del algoritmo de clasificación Random Forest cuarto entrenamiento en la imagen satelital Sentinel usando índices espectrales calculados en Qgis	58
5. Aplicación del algoritmo de clasificación Random Forest, quinto entrenamiento en la imagen satelital Sentinel con índices espectrales calculados en SNAP	60
C. EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN DE LOS CLASIFICADORES EN LA IDENTIFICACIÓN DE <i>Polylepis reticulata</i> Hieron	62
1. Clasificación supervisada para la identificación de <i>Polylepis</i> mediante ArcGis 10.5	62
2. Clasificación supervisada para la identificación de <i>Polylepis</i> mediante ENVI 5.1	64
3. Identificación Algoritmo Random Forest	66
4. Comparación de información de datos vectoriales (Polígonos)	68
VIII. CONCLUSIONES	71
IX. RECOMENDACIONES	72
X. RESUMEN	73
XI. ABSTRACT	74
XII. BIBLIOGRAFÍA	75
XIII. ANEXOS	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 7. 1. Características estructurales de la ortofotografía	26
Tabla 7. 2. Características estructurales de imágenes Sentinel	28
Tabla 7. 3. Corrección Radiométrica y Atmosférica de las imágenes Satelitales	37
Tabla 7. 4. Clasificación estadística los índices espectrales de vegetación de la Ortofotografía	41
Tabla 7. 5. Clasificación estadística de los índices de vegetación Qgis.....	45
Tabla 7. 7. Clasificación estadística de los índices de vegetación SNAP	49
Tabla 7. 8. Matriz de confusión primer entrenamiento en la Ortofotografía	51
Tabla 7. 9. Calculo de áreas a partir software <i>ArcGis 10.5</i>	53
Tabla 7. 10. Matriz de confusión segundo entrenamiento en la Ortofotografía.....	54
Tabla 7. 11. Cálculo de áreas a partir software <i>ArcGis 10.5</i>	55
Tabla 7. 12. Matriz de confusión entrenamiento Ortofotografía.....	56
Tabla 7. 13. Cálculo de áreas a partir del software <i>ArcGis 10.5</i>	57
Tabla 7. 14. Matriz de confusión entrenamiento Sentinel 2A, índices <i>Qgis</i>	58
Tabla 7. 15. Matriz de confusión, entrenamiento Sentinel 2A, índices <i>SNAP</i>	60
Tabla 7. 16. Extracción de datos cartográficos <i>ArcMap 10.5</i>	63
Tabla 7. 17. Extracción de datos cartográficos <i>ENVI</i>	65
Tabla 7. 18. Identificación de especie <i>Polylepis reticulata</i> Hieron aplicando <i>RF</i>	68
Tabla 7. 19. Ficha de comparación porcentual de extensiones	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 6. 1. Ubicación Geográfica del Bosque de <i>Polylepis</i>	12
Figura 6. 2. Ventana para crear la firma espectral	21
Figura 6. 3. Aplicación de la Clasificación Supervisada <i>ArcMap 10.5</i>	21
Figura 6. 4. Ventana de Clasificación	22
Figura 6. 5. Selección de Clasificación Supervisada	22
Figura 6. 6. Selección de Clases	23
Figura 6. 7. Barrido de Extensiones Pequeñas	23
Figura 7. 8. Extracción de pixel de la ortofotografía	27
Figura 7. 9. Georreferenciación de la zona alto andina ecuatoriana norte	35
Figura 7. 10. Georreferenciación de la zona alto andina ecuatoriana centro	35
Figura 7. 11. Georreferenciación de la zona alto andina ecuatoriana sur.....	36
Figura 7. 12. Índice de Vegetación de Ortofotografía (NDVI)	38
Figura 7. 13. Índice de Vegetación de Ortofotografía (Savi5).....	39
Figura 7. 14. Índice de Vegetación de Ortofotografía (Savi15).....	40
Figura 7. 15. Índice de Vegetación de Ortofotografía (NDWI)	41
Figura 7. 16. Cálculo del Índice de Vegetación (NDVI) mediante QGIS en Sentinel 2 A	42
Figura 7. 17. Cálculo del Índice de Vegetación (SAVI 5) mediante <i>QGIS</i> en Sentinel 2 A	43
Figura 7. 18. Cálculo del Índice de Vegetación (SAVI 15) mediante <i>QGIS</i> en Sentinel 2 A	44
Figura 7. 19. Cálculo del Índice de Vegetación (NDWI) mediante <i>QGIS</i> en Sentinel 2 A	45
Figura 7. 20. Cálculo del Índice de Vegetación (NDVI) mediante SNAP en Sentinel 2 A	46
Figura 21. Cálculo del Índice de Vegetación (SAVI5) mediante SNAP en Sentinel 2 A	47
Figura 22. Cálculo del Índice de Vegetación (NDWI) mediante SNAP en Sentinel 2 A	48
Figura 23. Cálculo del Índice de Vegetación (NDWI) mediante <i>SNAP</i> en Sentinel 2 A.....	49
Figura 7. 24. Importancia de las variables en términos de la disminución promedio en la precisión usando el subconjunto de datos OOB (primer entrenamiento).....	52
Figura 7. 25. Mapa de categorización en la identificación de la especie <i>Polylepis reticulata</i> Hieron en base a la discriminación de valores de la categoría Bosque del $NDVI \leq 0,01$ (Primer Entrenamiento).	52
Figura 7. 26. Porcentaje de cobertura de <i>Polylepis reticulata</i> en las 8 hectáreas (primer entrenamiento) ..	53
Figura 7. 27. Importancia de las variables en términos de la disminución promedio en la precisión usando el subconjunto de datos OOB (segundo entrenamiento).....	54
Figura 7. 28. Mapa de categorización en la identificación de la especie <i>Polylepis reticulata</i> Hieron en base la discriminación valores de la categoría Bosque del $NDVI \leq 0,04$ (Segundo Entrenamiento).....	55
Figura 7. 29. Porcentaje de cobertura de <i>Polylepis reticulata</i> en las 8 hectáreas (segundo entrenamiento) 55	
Figura 7. 30. Importancia de las variables en términos de la disminución promedio en la precisión usando el subconjunto de datos OOB (tercer entrenamiento)	56
Figura 7. 31. Mapa de categorización en la identificación de la especie <i>Polylepis reticulata</i> Hieron en base a la discriminación de valores de la categoría Bosque del $NDVI \leq 0,07$ (Tercer Entrenamiento).....	57
Figura 7. 32. Porcentaje de cobertura de <i>Polylepis reticulata</i> Hieron en 8 hectáreas (tercer entrenamiento)	58

Figura 7. 33. Importancia de las variables en términos de la disminución promedio en la precisión usando el subconjunto de datos OOB (índices <i>Qgis</i>)	59
Figura 7. 34. Mapa de categorización en la identificación de la especie <i>Polylepis reticulata</i> Hieron	59
Figura 7. 35. Importancia de las variables en términos de la disminución promedio en la precisión usando el subconjunto de datos OOB (Índices SNAP)	60
Figura 7. 36. Mapa de categorización en la identificación de la especie <i>Polylepis reticulata</i> Hieron índices <i>SNAP</i>	61
Figura 7. 37. IDENTIFICACIÓN DE LA ESPECIE <i>Polylepis reticulata</i> Hieron APLICANDO <i>ArcMap 10.5</i>	62
Figura 7. 38. Zoom de la Primera Área Interés <i>ArcMap 10.5</i>	63
Figura 7. 39. Zoom de la Segunda Área Interés <i>ArcMap 10.5</i>	63
Figura 7. 40. Porcentaje de cobertura de <i>Polylepis reticulata</i> Hieron <i>ArcMap 10.5</i>	64
Figura 7. 41. IDENTIFICACIÓN DE LA ESPECIE <i>Polylepis reticulata</i> APLICANDO <i>ENVI 5.1</i>	64
Figura 7. 42. Zoom de la Primera Área Interés <i>ENVI 5.1</i>	65
Figura 43. Zoom de la Segunda Área Interés <i>ENVI 5.1</i>	65
Figura 7. 44. Porcentaje de cobertura de <i>Polylepis reticulata</i> Hieron <i>ENVI 5.1</i>	66
Figura 7. 45. IDENTIFICACIÓN DE LA ESPECIE <i>Polylepis reticulata</i> Hieron APLICANDO ALGORITMO <i>RF</i>	66
Figura 7. 46. . Zoom de la Primera Área Interés <i>RF</i>	67
Figura 7. 47. Zoom de la Segunda Área Interés <i>RF</i>	67
Figura 7. 48. Porcentaje de cobertura de <i>Polylepis reticulata</i> Hieron <i>RF</i>	68
Figura 11. 49. Corrección atmosférica imágenes satelitales	78
Figura 11. 50. Aplicación <i>SEN2COR</i> Sentinel L1C	78
Figura 11. 51. Extracción de Valores de Índices Espectrales	79
Figura 11. 52. Error de clasificación (tercer entrenamiento NDVI > 0,01)	79
Figura 11. 53. Error de clasificación (segundo entrenamiento NDVI > 0,04)	79
Figura 11. 54. Error de clasificación (tercer entrenamiento NDVI > 0,07)	79
Figura 11.55. Error de clasificación (cuarto entrenamiento índices <i>Qgis</i>).....	79
Figura 11. 56. Error de clasificación (quinto entrenamiento índices <i>SNAP</i>).....	80

GLOSARIO

NASA	National Aeronautics and Space Administration
ESA	European Spatial Agency
RPFCH	Reserva de Producción de Fauna Chimborazo
RF	Random Forest
NDVI	Índice Normalizado Diferencial de Vegetación
SAVI	Índice de Vegetación ajustado con el suelo
NDWI	El índice de Agua de Diferencia Normalizada
SIG	Sistema de Información Geográfica
IGM	Instituto Geográfico Militar
UTM	Universal Transversal Mercator
MAE	Ministerio del Ambiente
GLOVIS	Global Visualization Viewer
SNAP_ESA	Sentinel Application Platform
ENVI	Environment for Visualizing Images
IDL	Interactive Data Languag

I. IDENTIFICACIÓN DE LA ESPECIE *Polylepis reticulata* MEDIANTE TELEDETECCIÓN EN LAS ZONAS ALTO ANDINAS DEL ECUADOR

II. INTRODUCCIÓN

A. IMPORTANCIA

El registro de la tierra desde el espacio adquiere un novedoso protagonismo en la segmentación del territorio (Chuvienco Salinero, 1996), fortaleciendo así la teledetección como un campo fundamental en estudios de suelo, para ello es necesario remontarnos hasta sus inicios en el año 1859 en donde se realizaron las primeras capturas de fotografías aéreas (aviones, globos aéreos) hasta agencias internacionales (ESA, NASA) que actualmente usan sus satélites espaciales para registrar y monitorear información global del planeta (Martínez Vega & Martín Isabel, 2010). Ubicando en órbita proyectos espaciales que poseen diversos sensores (RBV, MSS TM, ETM+ OLI, MSI), para la captura de imágenes satelitales que proporcionan información a mayor resolución espectral y comparativa (Picone, 2017) y diversos procesos metodológicos que permiten extraer información de datos meteorológicos, procesos atmosféricos, usos de suelos, condiciones medioambientales y predicción del tiempo a nivel global (Chuvienco, 2010).

Estos avances tecnológicos posibilitan diversos estudios de recursos naturales por la respuesta espectral (Spectral signature) que posee cada elemento en la tierra (Sacristán Romero, 2006), despertando así el interés de ecólogos que procesan información mediante la combinación de bandas espectrales (R,G,B,IR) e identifican el comportamiento radiométrico de la vegetación (Índices de Vegetación), potenciando investigaciones relacionadas al funcionamiento en ecosistemas (Cabello & Paruelo, 2008) tanto a nivel regional, nacional, y global: logrando así que ésta información sea monitoreada y evaluada a través del tiempo en distintos entornos (Muños Aguayo, 2013).

En Sur América la diversidad vegetal está definida por la Cordillera de los Andes que atraviesa Argentina, Chile, Bolivia, Perú, Colombia, parte de Venezuela y Ecuador, el mismo que constituye un territorio con gran diversidad de ecosistemas en las cuatro regiones naturales del país (Costa, Sierra, Amazonía y Galápagos), los mismos que se encuentran distribuidos en diversos pisos altitudinales por las cadenas montañosas del continente, generando así una topografía heterogénea del territorio ecuatoriano (Estrella, Manosalvas, Mariaca, & Ribadeneira, 2005).

En este contexto, los bosques del género *Polylepis* (15 y 28 especies) a una altura media de 4000 msnm son propensos a diversas fluctuaciones desde intensos soles hasta noches extremadamente frías (Kessler, 2006). Pese a esto en zonas de alta montaña persisten remanentes de vegetación endémica como *Polylepis reticulata* Hieron con una categoría de conservación vulnerable (VU) identificados en las áreas protegidas de la región sierra (RE Ilinizas, RPF Chimborazo y RE Pasochoa (León Yáñez, Valencia, Pitmam, Endara, & Ulloa Ulloa, 2011).

Por otro lado, estudios demuestran la disminución apresurada de estos ecosistemas, alcanzando una pérdida del 70 al 90% a nivel regional, lo que los convierte en un hábitat muy intervenido y fragmentado desde su cobertura original (Arellano, 2007). La Reserva de Producción de Fauna Chimborazo (RPFCH), conserva una muestra representativa de la especie *Polylepis reticulata* Hieron, Por ello el

objetivo de este trabajo es lograr mediante la teledetección un seguimiento de la evolución y de la transformación de esta cobertura vegetal (Jordi, 2005), empleando una técnica que nos permite evaluar el estado de la distribución en zonas de alta montaña (Zutta et al., 2012), e incluso cubriendo territorios en condiciones adversas, como es el caso del presente estudio.

B. PROBLEMA

La distribución de los Bosques de *Polylepis* está determinada en zonas de alta montaña y limitándose a pequeños rodales con áreas de expansión demasiado restringidas, laderas rocosas, quebradas y áreas de difícil acceso para el humano, lo que dificulta contar con un mapeo de la cobertura, y provoca un desconocimiento de la distribución vegetal de la especie *Polylepis reticulata* Hieron, y a su vez hace imposible tomar acciones para su protección y recuperación.

C. JUSTIFICACIÓN

La naturaleza cumple ciclos vitales y procesos evolutivos que deben ser respetados íntegramente: su existencia, sus funciones y estructura tal como se menciona en la Constitución del Ecuador, de la misma forma con derecho a la restauración, es así que las especies que forman parte de los bosques naturales en la región alto andina del Ecuador son más propensas a cambios en el territorio.

Las condiciones climáticas y geografías accidentadas en la región interandina provocan la distribución de especies a alturas superiores a los 3000 msnm, desde vegetación herbácea, arbustiva y arbórea. Según menciona (Kessler, 2006), las especies del género *Polylepis* poseen una distribución muy local, en territorio escabroso o difícil acceso para el hombre guardando ecosistemas negados de alguna protección, perdiendo importancia local, regional y nacional.

Considerando ser partícipes en procesos de planificación y protección de la especie *Polylepis reticulata* Hieron, a través del uso de herramientas de innovación tecnológicas (Teledetección), se pretende aportar a la intervención en diversos territorios, recopilando información de máquinas de aprendizaje (*Random Forest*) que procesen mapas confiables de distribución en orto fotografías de 0,0938 m e imágenes satelitales (Sentinel 2) de 10 m de resolución para identificar áreas de bosques naturales mayores o iguales a cien metros cuadrados en las zonas de alta montaña. Por tal motivo es necesario realizar éste tipo de estudios que promuevan la protección y el desarrollo sostenible de toda cobertura vegetal asociada a los andes ecuatorianos.

III. OBJETIVOS

A. GENERAL

Identificar la especie *Polylepis reticulata* Hieron mediante la teledetección en las zonas alto andinas del Ecuador.

B. ESPECÍFICOS

1. Calcular los índices de vegetación de la especie *Polylepis reticulata* Hieron del Bosque de Polylepis de la RPFCH.
2. Identificar la distribución de la especie *Polylepis reticulata* Hieron en las zonas alto andinas del Ecuador.
3. Evaluar la precisión del clasificador Random Forest en la identificación de la especie *Polylepis reticulata* Hieron en las zonas alto andinas del Ecuador.

IV. HIPÓTESIS

A. ALTERNANTE

El clasificador Random Forest tiene una alta identificación de la distribución de la especie *Polylepis reticulata* Hieron en las zonas alto andinas del Ecuador.

B. NULA

El clasificador Random Forest tiene una baja identificación de la distribución de especie *Polylepis reticulata* Hieron en las zonas alto andinas del Ecuador.

V. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A. **TELEDETECCIÓN Y SIG**

Teledetección según considera “tiene por finalidad identificar y caracterizar los materiales de la superficie terrestre y los procesos que ocurren a partir de la radiación electromagnética por la propia superficie terrestre como la reflejada del sol” (Gilbert, González Piqueras, & García Haro, 1997). El conjunto de información capturados a partir de Teledetección se captura partir de diversa naturaleza geográfica, física y radiométrica, recogidas por diversos métodos como la información repetitiva, global y sintética, tomando en consideración de forma simultánea elevado almacenado diversas variables relativas al medio ambiente (Sacristán, 2006).

1. **Sensores remotos**

a. **Índices de vegetación**

La vegetación posee actividad fotosintética que se muestra a través de los índices espectrales de vegetación mediante su comportamiento radiométrico una vegetación sana muestra un alto contraste de bandas visibles “banda roja (0.6-0.7 mm) y la del infrarrojo cercano (0.7-1.1 mm)” que permite discriminar vegetales con cobertura extensa (Soria & Granados, 2005).

b. **Índices de baja resolución espectral**

El plano de Reflectividad entre el IRC-R, en diversos puntos de superficies desnudas con mayor o menor dispersión utilizan valores de reflectividad en “bandas anchas” en función de la variación experimentada por los parámetros que determinan la reflectividad de los suelos que se procesan (color, brillo, humedad, rugosidad...) a lo largo de una línea recta reciben este nombre porque utilizan valores de reflectividad (Gilbert, González Piqueras, & García Haro, 1997).

c. **Rango de reflectancia**

El rango de valores de las reflexiones espectrales se encuentra entre el -1 y 1, ya que, tanto la reflectividad del infrarrojo cercano como la del rojo, son cocientes de la radiación reflejada sobre la radiación entrante en cada banda espectral (Sánchez, 2012).

d. **Imágenes Satelitales**

La información registrada por los sensores puede tener distintas resoluciones espaciales (unidad mínima de superficie para la que se integra la información espectral), espectral (número y ancho de las bandas), radiométrica (número de posibles valores que puede tomar cada dato), temporal (frecuencia con la que un sensor toma información de un mismo punto de la superficie) y geométrica (ángulo de observación) (Borràs et al., 2017).

e. **Resolución satelital**

El número de píxeles que integran un sensor de satélite o de cámara digital, definen su poder de resolución. Es decir, la capacidad de discernir objetos o detalles de un determinado tamaño en las imágenes captadas. A mayor número de píxeles por unidad de superficie, mayor resolución del fotosensor, pero también mayor es el volumen del archivo informático generado (Sánchez, 2012).

f. Resolución espacial

La resolución espacial hace referencia a una imagen satelital y al objeto más pequeño que se puede distinguir en la imagen hasta su máxima resolución respecto a la tierra, el ángulo de visión, la velocidad de escaneado distinguiendo cada elemento más fino (píxel) (Lencinas & Siebert, 2009).

g. Resolución espectral

Estos instrumentos pueden ser usados a nivel terrestre, en campo o en laboratorio, o montados en plataformas aéreas o satelitales, la resolución espectral determina el número de canales espectrales y su ancho de banda que es capaz de captar un sensor, con las que se puede medir la energía reflejada por los objetos es decir los seres humanos somos capaces de percibir a ojo desnudo el patrón de respuesta espectral en el rango visible del EE ($\lambda = 0,4 - 0,7 \mu\text{m}$) (Hernández & Montaner, s.f.).

2. Sistemas de información cartográfica

Los SIG son muy útiles por su capacidad de analizar los datos geográficos que definen el problema a tratar y a resolver con la planificación territorial y ambiental. Facilitan la Cartografía de los diferentes aspectos que inciden en la cuestión a conocer; permiten, mediante la superposición y otras formas de manipulación de la información, combinar datos y observar algunas de sus interrelaciones (Bosque & Sedra, 2000).

a. Elementos de los SIG

Los SIG están integrados por cuatro elementos: el módulo de entrada de datos (selección y captura), el módulo de manejo de datos (almacenamiento, recuperación, base de datos geográficos), el módulo de análisis de datos (modelamiento, reglas o normas de análisis, monitoreo) y el módulo de salida de la información (productos generados, inter-medios o finales) (Rosete & Bocco, 2003).

b. Información para SIG

Los problemas de coste del software y la gestión de grandes datos GIS almacenados en diversos archivos de datos espaciales. Los avances tecnológicos de computación permiten almacenar información desde imágenes satelitales, mapas de GPS, datos de encuestas y otros instrumentos para datos de atributos, des mismo modo extraer información usando escáner, digitalizador, disquete, Cd, internet, intranet, teclado o nube de Internet. La "nube" se refiere a una red virtual que ofrece a los usuarios acceso a archivos, servicios y aplicaciones (Milson, 2011).

c. Tipos de SIG

La diversidad de información geográfica viene representando geoméricamente en (puntos, líneas o polígonos, esto es, vectores) mediante información raster son formas de ilustrar el espacio intuitivo y versátil de la naturaleza determinando la información del área u objeto en estudio (Quintana, Valentin Criado, Martín Ramos, & Martín Fernández, 2008).

d. ArcMap

ArcMap ayuda a crear y editar características geográficas de forma rápida y fácil al incluir muchas de las funciones de edición gráfica populares con los últimos paquetes de edición de diseño asistido por computadora (CAD) (Jeff & Wrightsell, 1987).

e. ArcToolBox

Es una herramienta de *ArcMap*; *ArcToolBox* tiene las herramientas que se necesita para crear y editar sus bases de datos espaciales. Es fácil de aprender y garantiza una transición simple, rápida y natural (Jeff & Wrightsell, 1987).

f. ArcCatalog

ArcCatalog es principalmente un sistema operativo para datos geográficos, *ArcCatalog* le permite configurar accesos directos para llegar a archivos o datos particulares de forma rápida y sencilla, y examina esos archivos de forma visual y textual. Puede usar *ArcCatalog* para cambiar el nombre y copiar conjuntos de datos espaciales. Puede usar una parte de *ArcCatalog* llamada árbol de catálogo para colocar datos en *ArcMap* (Kennedy, 2013).

g. Quantum gis

QGIS es un Sistema de Información Geográfica de código abierto. El proyecto nació en mayo de 2002 y se estableció como un proyecto en SourceForge en junio del mismo año. Hemos trabajado duro para hacer que el software SIG (tradicionalmente software propietario caro) esté al alcance de cualquiera con acceso básico a un ordenador personal. *QGIS* actualmente funciona en la mayoría de plataformas Unix, Windows y Mac. *QGIS* se desarrolla usando el kit de herramientas Qt (<https://www.qt.io>) y C++. Esto significa que es ligero y tiene una interfaz gráfica de usuario (GUI) agradable y fácil de usar (QGIS, 2019).

El navegador *QGIS* es un panel en *QGIS* que le permite navegar fácilmente en su base de datos. Puedes tener acceso a archivos vectoriales comunes (por ejemplo, archivos de forma ESRI o archivos *MapInfo*), bases de datos (por ejemplo, PostGIS, Oracle, Spatialite o MSSQL Spatial) y conexiones WMS / WFS. También puede ver sus datos de GRASS (Project Qgis, 2019).

h. SNAP

SNAP es uno de los programas de teledetección que podemos emplear, de manera gratuita, para realizar análisis de imágenes aéreas, imágenes radar, realizar combinaciones de bandas multiespectrales o elaborar índices de humedad, vegetación, radiación o cualquier otro indicador descriptivo de carácter territorial. Aunque ESA cuenta con múltiples herramientas similares, *SNAP* tiene la ventaja de tener un repertorio de opciones analíticas bastante amplio, aunque es algo más lento en los análisis y el renderizado de imágenes si lo comparamos con otras aplicaciones similares (Agency European Spatial, 2019).

i. ENVI

ENVI (Environment for Visualizing Images) es el software ideal para la visualización, análisis y presentación de todo tipo de imágenes digitales. El paquete completo de procesamiento de imágenes de *ENVI* incluye herramientas avanzadas, pero fáciles de usar, herramientas espectrales, corrección

geométrica, análisis de terreno, análisis de radar, raster y vector *GIS*, soporte extenso para imágenes de una amplia variedad de fuentes y mucho más (ENVI, 2008).

El software de análisis de imágenes *ENVI* es utilizado por profesionales de SIG, científicos de detección remota y analistas de imágenes para extraer información significativa de las imágenes para tomar mejores decisiones. *ENVI* se puede implementar y acceder desde el escritorio, en la nube y en dispositivos móviles, y se puede personalizar a través de una API para cumplir con los requisitos específicos del proyecto (Harris, 2019).

j. ENVI + IDL

ENVI está escrito en IDL (lenguaje de datos interactivo), un potente lenguaje de programación estructurado que ofrece procesamiento de imágenes integrado. La flexibilidad de ENVI se debe en gran medida a las capacidades de IDL (ENVI, 2008).

Hay dos tipos de licencias ENVI:

- *ENVI + IDL*: *ENVI* más una versión completa de *IDL*
- *ENVI*: *ENVI* más una versión en tiempo de ejecución de *IDL*

Los usuarios de *ENVI + IDL* pueden usar *IDL* para personalizar sus propias funciones de línea de comandos.

Los usuarios avanzados de *ENVI + IDL* deben encontrar la flexibilidad que ofrecen las funciones interactivas de *IDL* útiles para sus análisis dinámicos de imágenes.

B. VEGETACIÓN ANDINA

1. Marco legal forestal

Según descrito en el Texto Unificado de Legislación Secundaria MAE (2003) Libro III Del Régimen Forestal menciona:

Título I De los Objetivos de Prioridad Nacional Emergente de la Actividad Forestal

Art. 3.- Elabórese un programa de ordenamiento territorial que permita al sector definir las zonas de uso forestal productivo como aquellas de conservación. Esta clasificación deberá observar motivos de interés social, económico y ambiental.

Título II Del Régimen Forestal

Art. 7.- El Ministerio del Ambiente o la dependencia correspondiente de éste, en coordinación con los organismos pertinentes, efectuará la zonificación de las tierras forestales del país, con el objeto de asegurar su racional utilización.

Art. 3.- El Ministerio del Ambiente previos los estudios técnicos correspondientes determinará los límites del patrimonio forestal del Estado con sujeción a lo dispuesto en la presente Ley. Los límites de este patrimonio se darán a conocer al país mediante mapas y otros medios de divulgación.

Art. 4.- La administración del patrimonio forestal del Estado estará a cargo del Ministerio del Ambiente, a cuyo efecto, en el respectivo reglamento se darán las normas para la ordenación, conservación, manejo y aprovechamiento de los recursos forestales, y los demás que se estime necesarios.

2. Reserva de Producción de Flora y Fauna

a) Definición

Reserva de Producción de Flora y Fauna. Área de tamaño medio (entre 5.000 y 10.000 ha) cuyo objeto prioritario son los ecosistemas y especies susceptibles de manejo, los cuales deberán estar poco alterados pero que tienen un nivel medio de presencia humana (dependen de los recursos biológicos locales). Las acciones prioritarias están relacionadas con el manejo sustentable de la vida silvestre, la educación ambiental, la restauración de ecosistemas y el turismo orientado a la naturaleza. El nivel de restricción de uso será bajo (poco restringido) (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2007).

b) Chimborazo

El Chimborazo, volcán que da el nombre a la Reserva, tiene una altitud de 6.310 m.s.n.m. Su base tiene un diámetro aproximado de 20 Kilómetros y regularmente se ofrece al observador, el lado sur del nevado, en tanto que el lado norte se oculta casi siempre detrás de las nieblas y nubes. El acceso a los flancos septentrionales se dificulta por la falta de caminos reconocibles y la dureza del clima (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2010).

c) Reserva de Fauna Chimborazo

Esta área fue creada con el propósito de mantener las aptitudes del ecosistema de páramo y su productividad; precautelar y desarrollar, con parámetros ecológicos, el hábitat de los camélidos nativos de los Andes como la vicuña, llama y alpaca, para fomentar la crianza de estas especies valiosas, ligadas con nuestra identidad cultural. Asimismo, establecer la infraestructura y servicios necesarios para la investigación del ecosistema del páramo, en especial sobre los camélidos nativos, con énfasis a la obtención de conocimiento y aplicación de tecnología para la cría de las especies de este grupo zoológico. Como último punto, se quiere desarrollar en esta área protegida, la recreación y el turismo como alternativas de uso apropiado de la zona; y mejorar el nivel de vida del campesino asentado en dicha área, brindándole asistencia técnica sobre la cría y manejo de estas especies (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2010).

d) Hidrología

En la provincia de Tungurahua se encuentran los ríos Blanco, Colorado, Yatso y Mocha, que desembocan en el río Ambato; en la provincia de Bolívar, los ríos Guaranda, Culebrillas, Ganquis y Salinas que son afluentes del río Chimbo; y en la provincia de Chimborazo los ríos Guano, Chimborazo y Chibunga, afluentes del Chambo (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2010).

e) Fauna

El grupo más importante dentro de la reserva es los camélidos con las siguientes especies: llamas (*Lama glama*) y vicuñas (*Vicugna vicugna*). Actualmente, mediante gracias al censo de la vicuña realizado en 2004 se sabe que la población de vicuñas en la RPFCH es de 2.331 animales, distribuidos en el área.

Se pueden encontrar otras especies importantes desde el punto de vista de conservación como el venado (*Odocoileus virginianus*), lobo (*Dusicyon culpaeus*) y conejos (*Sylvilagus brasiliensis*) como las más típicas de este hábitat (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2010).

f) Usos de la tierra

De las 58.560 hectáreas determinadas por el Estado como área protegida y que constituye el territorio destinado a la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo, el 80 % de esta extensión de tierra, está en poder de 38 organizaciones campesinas, comunas, cooperativas y asociaciones, y de unos pocos propietarios particulares. Las organizaciones campesinas realizan cultivos de subsistencia, en las partes bajas, en donde la altura les permite cultivar papas, habas, cebada, mellocos, ocas y otros productos agrícolas que, dependiendo de la ubicación de la organización, pueden hacerlo; en las partes bajas, siembras pequeñas parcelas de pastos artificiales, con el único propósito de alimentar a sus cuyes y bovinos cuando los poseen (Ministerio de Ambiente del Ecuador, 2010).

g) Flora

Se encontró en total 20 familias, 36 géneros y 46 especies distribuidas en las 9 zonas de muestreo de la RPF Chimborazo. Las familias con mayor número de especies son Asteraceae (9), Poaceae y Geraniaceae con 5; la mayoría de géneros corresponden a una sola especie a excepción de *Geranium* y *Lachemilla*. *Calamagrostis intermedia* tiene presencia en las 8 de las 9 zonas de muestreo y sus coberturas en 38 zonas superan la mitad de la cobertura total, *Phyllactis rigida* y *Eryngium humile* tienen presencia en 5 de las 9 zonas, sin embargo, *Phyllactis rigida* tiene mayor cobertura. *Hypochaeris sessiliflora* se encuentra en 4 de las 9 zonas de muestreo, pero en menor cobertura. El resto de especies tienen presencias y coberturas que son de menor representatividad (Caranqui, Lozano, & Reyes, 2016).

h) *Polylepis reticulata* Hieron

Los bosques de *Polylepis* representan la vegetación natural de una gran parte de los Andes centrales a altitudes entre 3.500 m y 4.400(-5.000) m. Las aproximadamente 28 especies del género ocupan una gran variedad de hábitats, desde el límite superior de los bosques de neblina hasta los volcanes áridos del Altiplano (Kessler, 2006).

Polylepis reticulata Hieron son arbustos o árboles que miden hasta 12 m de alto; los troncos son retorcidos y tienen la corteza de color café-anaranjado, que se desprende en láminas delgadas como papel. Las hojas y las flores a menudo están cubiertas de pelos. Las hojas son alternas y crecen amontonadas en las puntas de las ramas, están conformadas por 3 hojuelas que miden hasta 2,5 cm de largo, tienen denso vello en la cara inferior, la cara superior lisa. Las inflorescencias son racimos colgantes poco llamativos, de hasta 8 cm de largo. Las flores miden alrededor de 5 mm y son de color verdoso (Caranqui, 2010).

i) Atractivos de la reserva

Es el principal atractivo de la reserva. El nevado es macizo, amplio y gigante. Se puede ascender a él desde Riobamba y Guaranda. Varios naturalistas lo visitaron en los siglos XVIII y XIX, incluido Alexander von Humboldt, quien nos dejó dibujos donde compara la vegetación que observó en los distintos pisos altitudinales del Chimborazo y del Cotopaxi. Ese estudio hoy es considerado la base para la biogeografía, ciencia que estudia la distribución de las plantas sobre la Tierra.

Las manadas de vicuñas se observan en las comunidades de Pulingui, San Pablo y Chorrera Mirador. Los camélidos sudamericanos (vicuñas, llamas, alpacas y guanacos) son animales perfectamente adaptados al páramo. Sus patas tienen almohadillas, por lo que al pisar el frágil y esponjoso suelo del páramo no lo compactan, como sí lo hacen las vacas y caballos con sus duros cascos; y al alimentarse no destruyen la vegetación del páramo, a diferencia de las ovejas (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2014).

C. RANDOM FOREST

De acuerdo a Scornet, Erwan (2015) Random Forest El algoritmo de bosque aleatorio, propuesto por L. Breiman en 2001, ha sido extremadamente exitoso como método de clasificación y regresión de propósito generales una combinación de árboles predictores tal que cada árbol depende de los valores de un vector aleatorio probado independientemente y con la misma distribución para cada uno de estos. Del mismo modo que es un algoritmo para clasificación y regresión de amplio uso en la comunidad que tiene un rendimiento especialmente bueno para datos de alta dimensionalidad. Random Forest es un software que selecciona aleatoriamente atributos o variables para la construcción de árboles de decisión con variación controlada; a la vez trabaja con algoritmos de entrenamiento y es muy simple de ajustar. Como consecuencia Random Forest nos permitirá saber información precisa de lugares de difícil acceso y que son inaccesibles o están conservados por instituciones estatales presentará resultados futuros como modelos precisos de las áreas de estudio.

1. Algoritmo Random Forest

El algoritmo Random Forest, es uno de los mejores algoritmos de clasificación, que puede organizar grandes cantidades de datos con exactitud, este algoritmo tiene una precisión en la clasificación mediante la incorporación de aleatoriedad en la construcción de cada clasificador individual o variables de importancia. Esta aleatorización puede introducirse en la partición del espacio (construcción del árbol), así como en la muestra de entrenamiento. Random Forest comienza con una técnica de aprendizaje automático estándar llamada “árbol de decisiones”, evaluando cerca de 300 árboles, corresponde a un aprendizaje. En un árbol de decisión, una entrada se introduce en la parte superior y hacia abajo a medida que atraviesa el árbol de los datos, los cuales se acumulan en conjuntos más pequeños (García, Sarría, & Castillo, 2016).

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

A. CARACTERIZACIÓN DEL LUGAR

1. Localización

El estudio se realizó en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo, localizada en las provincias de Chimborazo, Bolívar, y Tungurahua, exactamente en el Bosque de Polylepis y su alrededor considerada las zonas alto andinas del Ecuador.

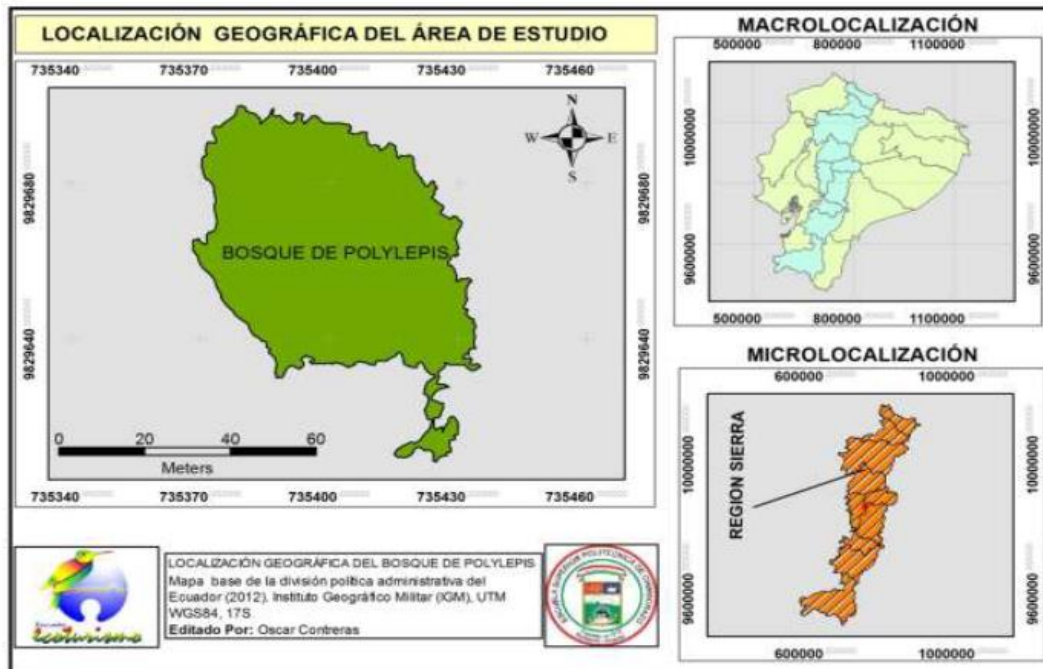


Figura 6. 1. Ubicación Geográfica del Bosque de Polylepis

Elaborado por: Oscar Contreras

2. Ubicación Geográfica

Coordenadas proyectadas UTM, Zona 17 S

DATUM WGS 84

x= 735373

y = 9829665

Fuente: (GIARN, 2017)

3. Límites

Los límites de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo son los siguientes:

Norte: Provincias de Bolívar y Tungurahua

Sur: Provincias de Bolívar y Chimborazo

Este: Provincias de Tungurahua y Chimborazo

Oeste: Provincia de Bolívar

4. Características climáticas

Según Ministerio del Ambiente del Ecuador (2018), las características climáticas de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo son:

En la zona es frecuente en los días más fríos y húmedos que ocurra precipitación en forma de nieve o escarcha en las zonas más altas. Se registra una precipitación promedio anual de 761 mm que varía entre 626 mm en las zonas menos lluviosas y los 896 mm en las zonas más húmedas.

La temperatura promedio del área es de 7 °C, en la zona este la temperatura promedio es de 9, 7 °C, mientras que en la zona oeste la temperatura promedio es de 4,3 °C. Diciembre es considerado el mes más ecológicamente seco, a diferencia de marzo y abril que son los meses más lluviosos. El Bosque Polylepis tiene un clima Frío Andino con variación de templado permanente húmedo a templado periódicamente seco, con una temperatura de 0° a 10° C

5. Clasificación ecológica

Según el Ministerio del Ambiente del Ecuador (2010), la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo presenta formaciones vegetales ubicadas en la Subregión Centro y Sector Centro de la Cordillera Occidental.

1) Herbazal del Páramo

Variación altitudinal: (3400 – 4300 msnm)

Herbazal denso dominado por gramíneas amacolladas mayores a 50 cm de altura; este ecosistema abarca la mayor extensión de los ecosistemas de montaña en el Ecuador; se extiende a lo largo de los Andes desde el Carchi hasta Loja. Es característico del piso montano alto superior y se localiza generalmente en los valles glaciares, laderas de vertientes disectadas y llanuras subglaciares sobre los 3400 msnm.

2) Herbazal y Arbustal siempre verde subnival del Páramo

Variación altitudinal: (4100 – 4500 msnm)

Son arbustales bajos y matorrales alto andinos paramunos. Herbazal mezclado con arbustos esclerófilos semipostrados con una altura entre 0,5 a 1,5, ocurre en morrenas, circo glaciar, escarpamentos rocosos, depósitos de rocas glaciares y pendientes pronunciadas de arena o quebradas estrechas. Este ecosistema se caracteriza por tener una vegetación fragmentada, los parches de vegetación que se localiza en las cumbres más altas de la cordillera formando un sistema insular restringido al norte del Ecuador.

3) Arbustal siempre verde y Herbazal del Páramo

Variación altitudinal: (3300 - 3900 msnm)

Incluye al páramo de almohadillas, sector norte y centro de la cordillera oriental, subregión norte y centro. Pajonales arbustivos alto montano paramunos. Arbustales frecuentemente dispuestos en parches de hasta 3 m de altura, mezclados con pajonales amacollados de alrededor de 1,20 m. Consideran un ecosistema diferente localizado sobre la línea de bosque; sin embargo, otros autores consideraron a éste como franja del ecosistema de bosque montano alto.

4) Herbazal inundable del Páramo

Variación altitudinal: (3300 - 4500 msnm)

Son herbazales inundables en los que existen especies que forman cojines o parches aislados de vegetación flotante; este ecosistema es azonal, en el que las condiciones edáficas o micro climáticas locales tienen una mayor influencia sobre la vegetación que los factores climáticos asociados al gradiente altitudinal.

5) Herbazal húmedo subnival de páramo

Variación altitudinal: 4200 (Occidente del Chimborazo) - 4400 hasta 4500 - 4900msnm

Este ecosistema las hierbas amacolladas y los arbustos esclerófilos están prácticamente ausentes, las formas de vida predominantes en este ecosistema son los pastos de tallo corto, arbustos postrados, rosetas acaulescentes y hierbas en cojín. La vegetación no es continua, crece en parches y puede haber predominancia del suelo desnudo de hasta el 90 % como en el arenal de la vertiente occidental del Chimborazo

Generalmente se ubica en laderas periglaciares en suelos clasificados como entisoles poco profundos, con un desarrollo exiguo, caracterizados por un contenido de materia orgánica extremadamente bajo con capacidad de retención de agua y regulación muy pobre.

6) Herbazal ultrahúmedo subnival de páramo

Variación altitudinal: 4400/4500 - 4900 m

Este ecosistema es similar en estructura, fisonomía y cobertura vegetal restringida por efectos del clima extremo al herbazal húmedo subnival; no obstante, la vegetación ocupa un área mayor. La diferencia está dada por los patrones de humedad local y una mayor precipitación mensual, producto a que se encuentra presente en las montañas con orientación hacia las zonas de formación de precipitación de la Amazonía

Estas variaciones ambientales se ven reflejadas en su composición florística diferenciada, en una importante presencia de briofitas y una mayor diversidad de especies.

7) Herbazal húmedo montano alto superior de páramo

Variación altitudinal: 3500 hasta 4100-4200 m

Este ecosistema está conformado por una vegetación menos densa que el herbazal montano alto y montano alto superior de páramo y se encuentra dominado por especies de *Stipa*, *Senecio tertifolius* y *Plantago* spp. Ocurre en enclaves volcánicos y montañas asociados a efectos de la sombra de lluvia, generalmente en la cordillera occidental en las provincias de la sierra central del Ecuador, como ocurre en el flanco exterior occidental del volcán Chimborazo.

8) Bosque siempre verde del Páramo

Variación altitudinal: (3200 - 4100 msnm)

Son bosques densos siempre verdes, con alturas entre 5 y 7 m, que por efectos de las condiciones climáticas crecen de forma torcida y ramificada, confiriéndoles un aspecto muy particular. Este tipo de

ecosistema se encuentra en formas de parches aislados en una matriz de vegetación herbácea o arbustiva. Estos parches tienden a ocurrir en sitios menos expuestos al viento y la desecación como laderas abruptas, fondo de los valles glaciares o en la base de grandes bloques de rocas de los circos glaciares.

6. Materiales y equipos

Para el cumplimiento de los objetivos propuestos se utilizaron los siguientes materiales y equipos:

a. Materiales

Resmas de papel bond

Libreta de apuntes

Carpetas

Esferográficos

Lapicero

Borrador.

b. Equipos

Computador

GPS

Internet

Pen drive

Cámara fotográfica

Programa Informático *Random Forest*

Programa informático *ArcGis 10.5*

Programa informático *Qgis 3.4*

Programa informático *ENVI 5.1*

Programa procesamiento satelital *SNAP + SEN2COR*

B. METODOLOGÍA

El trabajo es una investigación de tipo exploratoria, puesto que se realizó a través de revisiones bibliográficas de diversas metodologías y complementada con niveles descriptivos, analíticos y estadísticos.

La base fundamental del estudio fue una ortofotografía multiespectral, mediante el uso de drone en un área de 8 hectáreas que representa la cobertura vegetal y no vegetal cercana al bosque y 100 hectáreas que comprende una expansión del territorio dentro de la Reserva, a la vez se utilizaron imágenes satelitales Sentinel en nivel 2A elaborando un mosaico de escenas de toda la zonas alto andinas del Ecuador, para su posterior corrección y procesamiento que permitió identificar la especie *Polylepis reticulata* Hieron mediante el siguiente proceso:

1. Para el cumplimiento del primer objetivo. - Calcular los índices de vegetación de la especie *Polylepis reticulata* se procede utilizando el siguiente proceso:

a) **Adquisición y procesamiento de información**

En primera instancia se obtuvo una ortofotografía multiespectral captada mediante el uso de drone, tipo de avión de ala fija UAV (E384 de event38), equipado con dos cámaras de alta resolución (NX1100 Samsung RGB, 21.3 MP) y (Canon PowerShot SX260 HS equipada con un sensor NGB de 12 MP) y un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) marca SOKKIA modelo GRX2 integrando un objetivo de calibración radiométrica de gris al 18%, un anemómetro y un altímetro.

Posteriormente, se utilizó el software *ENVI 5.1* a través de la herramienta “*File spectral subset*” donde se realizó la selección de la banda 1 de la imagen NGB (infrarroja), y posteriormente las bandas 1, 2,3 de la imagen RGB (roja, verde, azul), la cual se procede ajustarlo a un sistema de coordenadas creando así la imagen que posea 4 bandas multiespectral de formato *.tiff, a un tamaño de pixel al 0.0938 metros tanto en (X, Y):

NUMERO DE BANDA	NOMBRE BANDA	RESOLUCIÓN ESPACIAL
B1	Roja	0,0938 m
B2	Verde	0,0938 m
B3	Azul	0,0938 m
B4	Infrarroja	0,0938 m

En cuanto a las imágenes satelitales se descargó escenas seleccionadas en el *Global Visualization Viewer (USGS-GLOVIS)*, en formato comprimido *.rar, a nivel Sentinel L1C considerando la menor cobertura de nubes en el área de estudio, para lo cual se sometió cada imagen satelital a un proceso de corrección radiométrica y atmosférica en *Sentinel Application Platform (SNAP)*, aplicación de escritorio con procesador *Sen2Cor* (European Space Agency, 2018), para lo cual se crea imágenes de reflectancia corregidas en el terreno y en el acirro, grosos ópticos de aerosol adicionales, vapor de agua, mapas de clasificación de escena e indicadores de calidad para las probabilidades de nubes y nieve.

Su formato de producto de salida es equivalente al producto de usuario de nivel L1C: imágenes JPEG 2000, tres resoluciones diferentes, 60, 20 y 10 metros. Este proceso permitió segmentar las diversas bandas espectrales que posee Sentinel y trabajar las bandas a una misma resolución:

Las características de las bandas espectrales de las imágenes Sentinel 2A son (Saini & Ghosh, 2018):

NÚMERO DE BANDA	NOMBRE BANDA	RESOLUCIÓN ESPACIAL
B1	Coastal/aerosols	60 m
B2	visible blue	10 m
B3	Visible green	10 m
B4	Visible red	10 m
B5	Red edge 1	20 m
B6	Red edge 2	20 m
B7	Red edge 3	20 m
B8	NIR	10 m
B8a	Narrow NIR	20 m
B9	Water vapour	60 m
B10	Swir Cirrus	60 m
B11	SWIR 1	20 m
B12	SWIR 2	20 m

b) Cálculo de índices espectrales de vegetación en la ortofotografía

Se realizó una revisión de los índices de vegetación utilizados y basados en el uso de bandas espectrales similares y a una misma resolución espectral en la ortofotografía e imagen satelital (rojo, verde y el infrarrojo), se calculó los índices (Oliva & Verdú, 2008): NDVI, SAVI, NDWI, considerados como importantes para zonas de alta montaña.

Además, se considera estos índices luego de la corrección en las diversas plataformas de la ortofotografía e imágenes satelitales Sentinel 2A, para lo cual se utiliza una resolución de 10 metros y así poder tomarlas como variables de predicción.

(NDVI) Índice Normalizado Diferencial de Vegetación. - Índice muy frecuente y bien estudiado. Rango de -1 a +1. Los valores positivos indican áreas con vegetación (Rouse, Haas, Schell, & Deering, 1973).

Para el cálculo de este índice se empleó la siguiente fórmula $NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$ (Rouse, J W; Haas, R.H.; Schell, J. A.; Deering, 1973).

Dónde:

NIR= reflectancia corregida atmosférica correspondiente al infrarrojo cercano.

R= reflectancia corregida atmosférica correspondiente al rojo.

Dónde:

IR= corresponde al infrarrojo cercano.

R= corresponde al rojo.

En la ortofotografía representa la banda 4 el **IR** y la banda 3 el **R**

En imágenes satelitales Sentinel 2A representa la banda 8 el **IR** y la banda 4 es el **R**

(SAVI) Índice de Vegetación ajustado con el suelo. - Este índice se calcula como la diferencia normalizada entre la banda roja (R) y la banda del infrarrojo cercano (NIR) ajustado con un factor "L", que es la componente de brillo del suelo que se define con un valor de 0.5 y 0.15, ya que se ajusta mejor a todo tipo de cobertura y diseñado para minimizar los efectos del fondo del suelo.

El Índice de vegetación ajustado al suelo se realizó mediante la siguiente expresión, $SAVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R + L) * (1 + L)}$ (Huete, 1988).

Dónde:

NIR = corresponde al infrarrojo cercano

R = corresponde al rojo

L = varía según la densidad de la vegetación, como en el caso de las imágenes de satélite, se toma 0,5 o 0.15

En la ortofotografía representa la banda 4 el **IR** y la banda 3 el **R**

En imágenes satelitales Sentinel 2A representa la banda 8 el **IR** y la banda 4 es el **R**

(NDWI) El índice de Agua de Diferencia Normalizada. - Este índice se utiliza para medir la cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo. Los valores que se obtienen oscilan entre -1 y 1, para las zonas con menos humedad.

Para el cálculo de este índice se empleó la siguiente fórmula $NDWI = \frac{(G - NIR)}{(G + NIR)}$ (McFEETERS, 1996).

Dónde:

G= reflectancia corregida atmosférica correspondiente al verde.

NIR= reflectancia corregida atmosférica correspondiente al infrarrojo cercano.

Dónde:

IR= corresponde al infrarrojo cercano.

G= corresponde al Verde

En la ortofotografía representa la banda 4 el **IR** y la banda 2 el **G**

En imágenes satelitales Sentinel 2^a representa la banda 8 es el **IR** y la banda 3 es el **G**

Principales índices para el análisis de vegetación en cuanto a la revisión bibliográfica que permita manipular las bandas espectrales que determine valores relevantes de cada pixel en el estudio de *Polylepis reticulata* Hieron y su identificación.

2. **Para el cumplimiento del segundo objetivo. - Identificar la distribución de la especie *Polylepis reticulata* Hieron en las zonas alto andinas del Ecuador se procedió al cumplimiento de las siguientes fases:**

a) **Procesamiento de información**

Una vez calculados los índices espectrales de vegetación en la ortofotografía y la imagen satelital Sentinel 2A se utilizó el software *ArcGis 10.5* y se procedió a la extracción de los valores de cada pixel, utilizando la metodología empleada por (Flores, 2017) en la cobertura de la especie *Polylepis reticulata* Hieron, teniendo como referencia principal el Bosque de *Polylepis* en la RPFCH con una extensión de 0,34 hectáreas.



Realizado por: Oscar Contreras

b) Aplicación del Algoritmo Random Forest

El uso del algoritmo RF, consiste en una colección de clasificadores estructurados en árbol $\{h(x, k), k = 1, \dots\}$ donde $\{k\}$ son vectores aleatorios distribuidos de forma idéntica e independiente. Cada árbol emite un voto unitario para la clase más popular en la entrada x (Breiman, 2001), por lo cual se tomó como variables cuantitativas los valores de los índices espectrales de vegetación (NDVI, SAVI, NDWI), posteriormente se realizó cinco entrenamientos a través de la ortofotografía e imagen satelital Sentinel 2A definida con una resolución de 10 metros, mediante tablas de valores de cada shapefile (puntos).

En el primer entrenamiento se evaluó: 345.002 puntos, de los cuales 216.283 de la ortofotografía, pertenecen a la categoría de uso (1) POLYLEPIS y 128.719 puntos pertenecen la categoría de uso (2) NO POLYLEPIS. De acuerdo a la información obtenida, se realizó una discriminación de los índices del ($NDVI < 0,01$), dentro del bosque no se consideran la vegetación en estudio por ende permitió realizar entrenamientos de 8 hectáreas alrededor del área de estudio.

En el segundo entrenamiento se evaluó: 345.823 puntos, de los cuales 244.568 de la ortofotografía pertenecen a la categoría de uso (1) POLYLEPIS y 101.225 puntos pertenecen la categoría de uso (2) NO POLYLEPIS. De acuerdo a la información obtenida, se realizó una discriminación de los índices del ($NDVI < 0,04$), dentro del bosque no se consideran como la vegetación en estudio por ende permitió realizar entrenamientos de 8 hectáreas alrededor del área de estudio.

En el tercer entrenamiento se evalúa: 344.560 puntos de los cuales 198.711 de la ortofotografía pertenecen a la categoría de uso (1) POLYLEPIS y 145.849 puntos pertenecen la categoría de uso (2) NO POLYLEPIS. De acuerdo a la información obtenida, se realizó una discriminación de los índices del ($NDVI < 0,04$), dentro del bosque no se consideran como la vegetación en estudio por ende permitió realizar entrenamientos de 8 hectáreas alrededor del área de estudio.


En el cuarto entrenamiento se procesó los datos de la imagen satelital que cubren la zona de planificación 3 (Chimborazo, Tungurahua, Bolívar, Pastaza) (SENPLADES, 2012) del Ecuador, en la cual se tomó la información vectorial, y se identifica la especie Polylepis dentro de la zona, obteniendo así puntos de control sobre la imagen satelital con mayor cobertura de territorio. En este caso se evaluó un total de 10.533 puntos de los cuales 70 pertenecen a la categoría de uso (1) POLYLEPIS y 10.463 puntos pertenecen a la categoría de uso (2) NO POLYLEPIS, y por consiguiente se realizó una evaluación de 8.261 hectáreas incluyendo áreas de bosque identificadas en el campo.


En el quinto entrenamiento se procesa los datos de la imagen satelital que cubre la zona de planificación 3 (Chimborazo, Tungurahua, Bolívar, Pastaza) (SENPLADES, 2012) del Ecuador, en la cual se tomó la información vectorial para de la identificación como Polylepis, y así obtener tener puntos de control. A partir de ello se evaluó un total de 10.533 puntos de los cuales 70 puntos pertenecen a la categoría de uso (1) POLYLEPIS y 10.463 pertenecen a la categoría de uso (2) NO POLYLEPIS, una evaluación de 8.261 hectáreas incluyendo áreas que ocupan bosque identificadas en el campo y búsqueda de los mismos dentro la RPFCH.

3. Para el cumplimiento del tercer objetivo. - Evaluar la precisión del clasificador Random Forest para identificar la especie *Polylepis reticulata* Hieron en las zonas alto andinas del Ecuador se efectuó mediante el siguiente proceso:

Se realizó una comparación mediante el uso de tres softwares *ArcGis 10.5*, *ENVI 5.1* y *RF* en la ortofotografía, los primeros se utilizaron en la clasificación supervisada, mientras que el tercero utilizó árboles de decisión en 100 hectáreas alrededor del Bosque de *Polylepis*, a la par de ello se elaboró el modelamiento de mapas temáticos y extracción de información cartográfica para conocer las propiedades mostradas por cada metodología.

1) Clasificación supervisada *ArcGis 10.5*

El primer software empleado es *ArcGis 10.5* para la identificación de la especie *Polylepis reticulata* Hieron, el mismo que permitió realizar la ortofotografía mediante el método de clasificación supervisada, ocupando la imagen multiespectral 4 bandas (color verdadero), mediante la cual se crea una capa vectorial (puntos) con 863 puntos de control y a partir de la herramienta  *Field Calculator* se estableció las categorías de uso de suelo:

Las categorías que se distingue son: 339 puntos con un valor de (1) *Polylepis* y 523 puntos con un valor de (2) *No Polylepis*. Posterior  *ArcToolbox* en la selección: *Spatial Analyst Tools / Multivariate / Create Signature*:

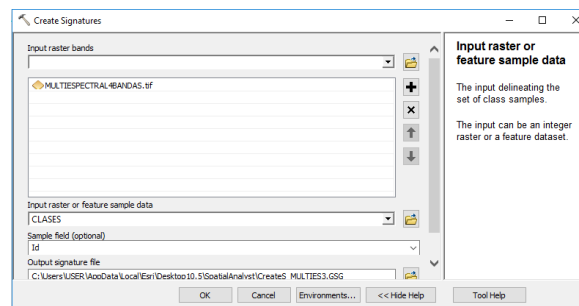


Figura 6. 2. Ventana para crear la firma espectral

Para realizar la clasificación supervisada se empleó las herramientas de la misma caja y con la firma espectral antes creada usamos: *Spatial Analyst Tools / Multivariate / Maximum Likelihood Classification*:

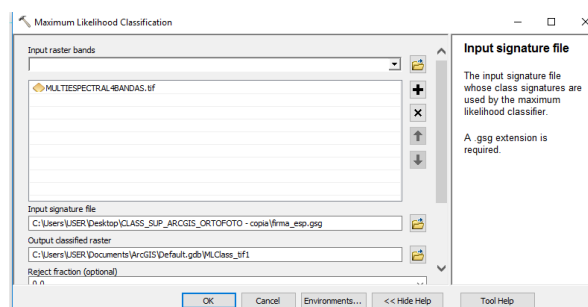



Figura 6. 3. Aplicación de la Clasificación Supervisada *ArcMap 10.5*

El proceso final de la ortofotografía nos muestra 2 categorías de uso de suelo en formato raster que se pueden observar en mapas temáticos de distribución.

1. Clasificación supervisada *ENVI 5.1*

Para la clasificación supervisada en *ENVI 5.1*, se empleó la imagen multiespectral 4 bandas (color verdadero), posteriormente se utilizó la herramienta  *Classification Workflow* para iniciar el proceso de la clasificación en la ortofotografía.

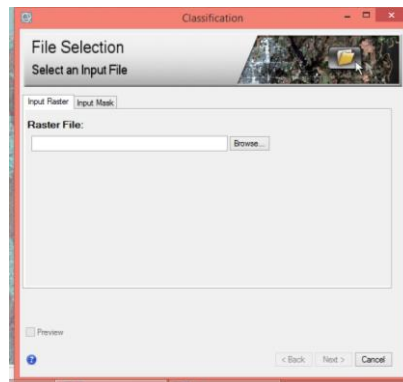


Figura 6. 4. Ventana de Clasificación

Posteriormente, ésta ventana permitió ingresar la imagen raster que fue clasificada y por consiguiente se muestra una ventana donde permite seleccionar una Clasificación Supervisada o No Supervisada.

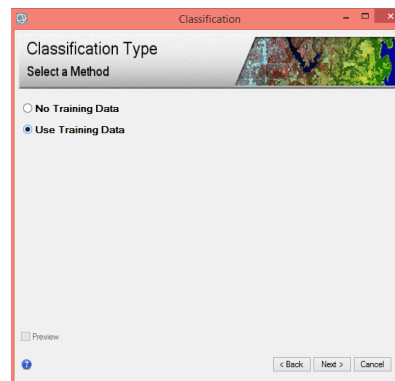


Figura 6. 5. Selección de Clasificación Supervisada

Inmediatamente aparece una ventana para iniciar con la selección de las clases, las mismas que nos permitieron realizar 25 polígonos por cada clase de cobertura del uso de suelo que vamos a identificar.

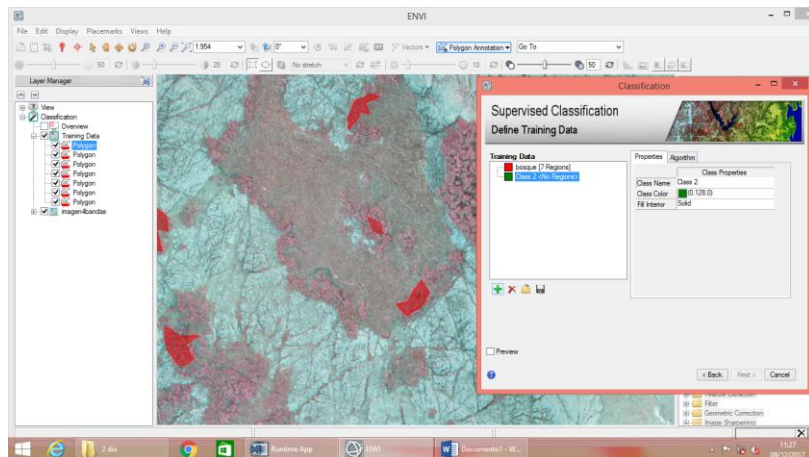


Figura 6. 6. Selección de Clases

Finalmente se aplica un barrido para eliminar cobertura de bosques demasiado pequeñas y poder tener un análisis de coberturas verdaderas.

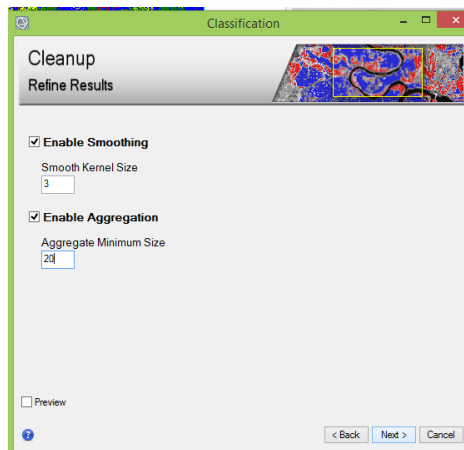


Figura 6. 7. Barrido de Extensiones Pequeñas

Posteriormente se realizó la exportación de los resultados en formatos (*tif, *TIFF, *ENVI, Vectorial) adecuados para procesar en otro software, que permiten elaborar mapas temáticos o extracción de información Cartográfica.

2. Aplicación Algoritmo RF

En cuanto a la aplicación del último software, se empleó el *RF* con el tercer entrenamiento en las 100 hectáreas de la ortofotografía, puesto que fue el más preciso en la identificación dentro las 8 hectáreas alrededor del bosque.

Posteriormente se evalúa un total de 344.560 puntos de los cuales 198.711 pertenecen a la categoría (1) POLYLEPIS y 145.849 a la categoría de uso (2) NO POLYLEPIS. De acuerdo a la información obtenida se realiza una discriminación, la misma que nos indica que los valores: en el $NDVI > 0,07$ son considerados en la categoría de uso (1) POLYLEPIS.

El mapa temático se realiza de acuerdo a la identificación de la especie *Polylepis reticulata* Hieron, información obtenida a partir de los entrenamientos del software *Random Forest* en las 100 hectáreas.

3. Extracción de información geográfica y comparación de extensión

La información obtenida de las ortofotografía, a través de los diferentes métodos permiten extraer información vectorial como:

Ficha resumen de Información Vectorial

Software	Área (m^2)	Área (ha)
(2) No Polylepis		
(1) Polylepis		
Total de Cobertura		

Ficha de comparación de extensiones

(2) No Polylepis	Área Total (m^2)	Área Total (ha)
<i>ArcGis</i>		
<i>ENVI</i>		
<i>RF</i>		

Comprobación metodológica de la Hipótesis

Para la comprobación de Hipótesis se desarrollará el siguiente proceso:

- 1. Formular las Hipótesis**
- 2. Seleccionar el nivel de significación**
- 3. Determinar la técnica y la prueba estadística**
- 4. Determinar los valores críticos y sus regiones de rechazo**
- 5. Aplica el estadístico**
- 6. Decisión**

VII. RESULTADOS

A. CÁLCULO DE ÍNDICES ESPECTRALES

En este capítulo se presenta los resultados del análisis de información: ortofotografía e imágenes satelitales, georreferenciación de la zona de estudio, corrección y procesamiento de información satelital y cálculos de índices espectrales de vegetación del Bosque de Polylepis y la zona alto andina del Ecuador.

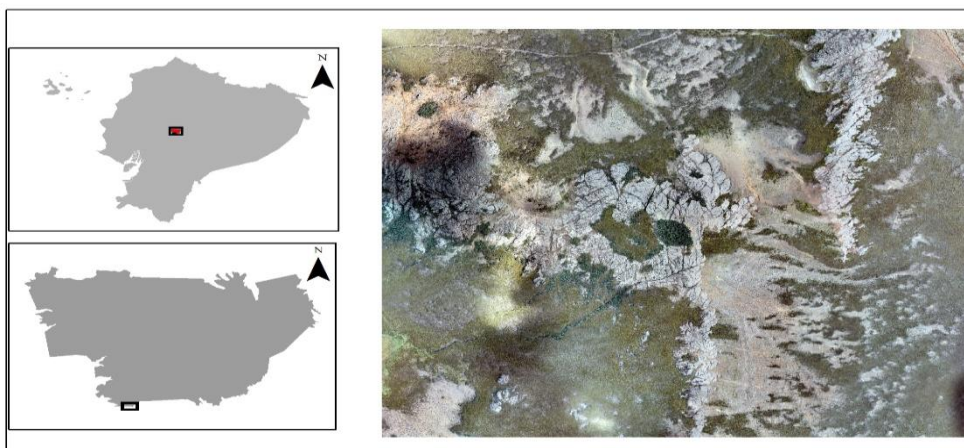
1. Análisis de la ortofotografía e imagen satelital

a. Características estructurales de la ortofotografía

Las ortofotografía fue capturadas a partir de vuelos en un polígono previamente planificados en el software Mission Planner, marcando determinados puntos de control sobre la superficie de interés y considerando las mejores condiciones meteorológicas con dos vuelos (uno para la cámara RGB y otro para la cámara NGB) a una altura de 200 metros y una velocidad de vuelo de 15 m/s determinados en un tiempo de 16 minutos 36 segundos.

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV), también conocidos como drones, pueden volar de forma autónoma o pilotarse de forma remota, grabar video en tiempo real y obtener imágenes de superficie en altitudes específicas. Los drones varían de acuerdo con sus tipos, grados de autonomía, tamaños y pesos, y fuentes de energía (Morales, et.al., 2018). Adaptando cámaras de alta calidad permitió capturar escenas de tipo RGB y NGB. El procesamiento de estas escenas se obtiene una imagen multispectral de cuatro bandas.

Tabla 7. 1. Características estructurales de la ortofotografía



Nombre: Multispectral4bandas

Tamaño de celda (X,Y): 0,0938; 0,0938

Numero de bandas: 4

Formato: TIFF

Sistema de coordenadas X,Y: UTM_Zone_17S

DATUM: D_WGS_1984

Elaborado por: Oscar Contreras

Fuente: ortofotografía drone, 2017

b. Composición de bandas espectrales

La composición de las bandas espectrales en la ortofotografía, es importante para la detección remota y en éste caso, para el estudio de la vegetación se procesó bandas espectrales en el siguiente orden:

1 Banda: Roja

2 Banda: Verde

3 Banda: Azul

4 Banda: Infrarroja

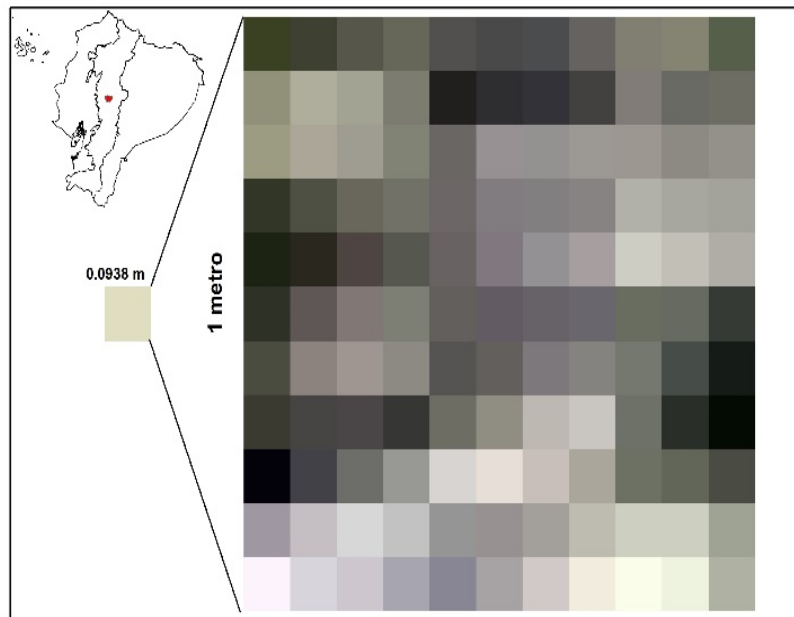





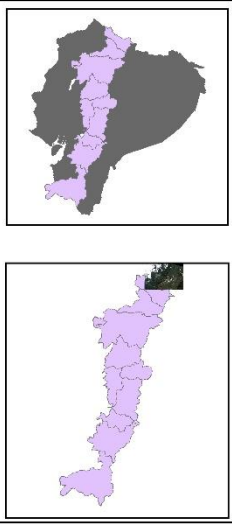
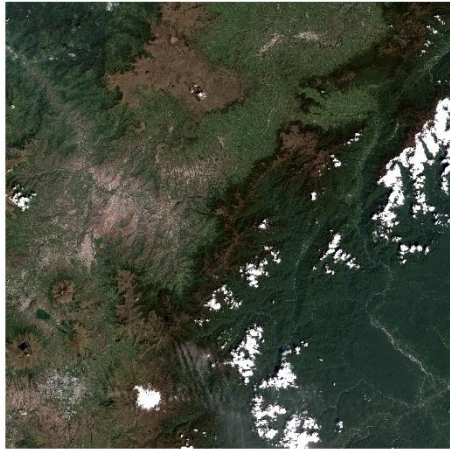
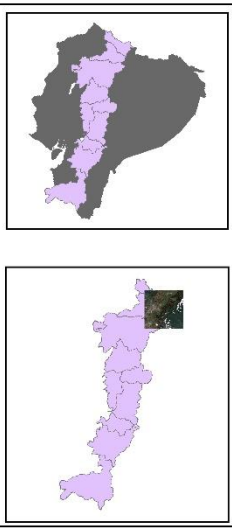
Figura 7. 8. Extracción de píxel de la ortofotografía
Elaborado por: Oscar Contreras


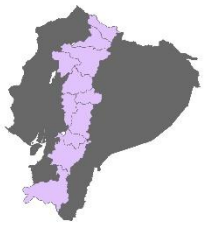




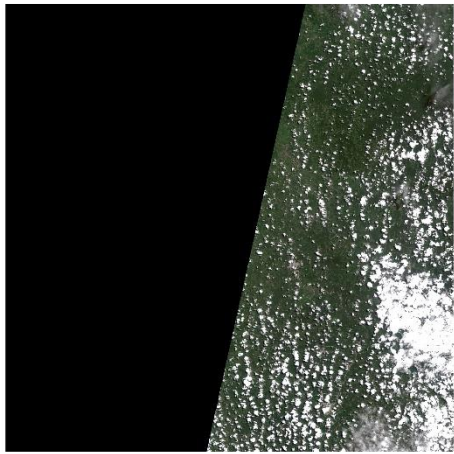
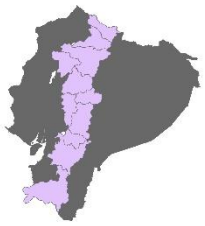
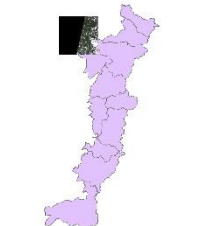
Las bandas multispectrales compuestas por píxeles en donde cada unidad de píxel contiene datos, los cuales mediante el debido procesamiento espectral brindan información cualitativa y cuantitativa de la cobertura del suelo. Cada unidad de píxel posee una medida de 0.0938 metros tanto (X, Y) de la misma manera con la extracción de un metro cuadrado ($1 m^2$) se obtiene 121 unidades de píxel.

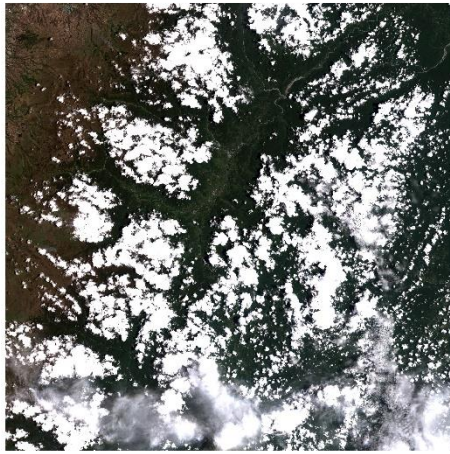
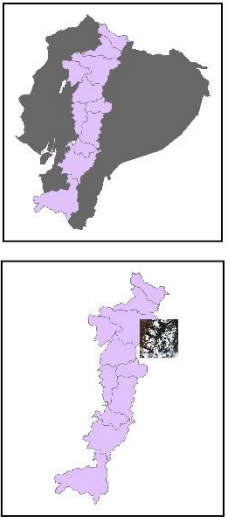
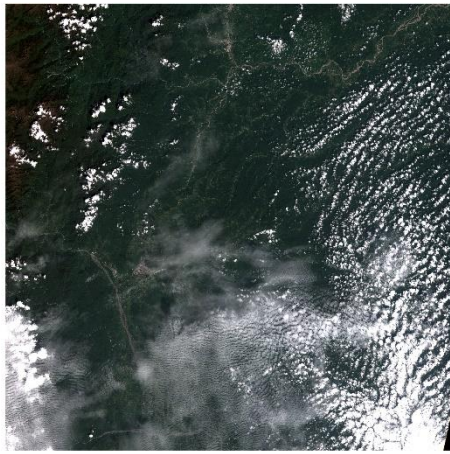
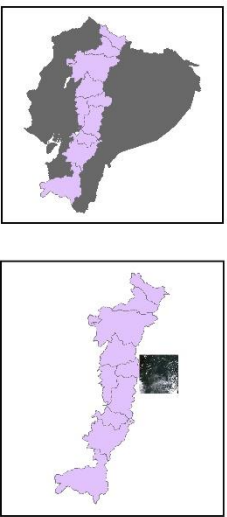
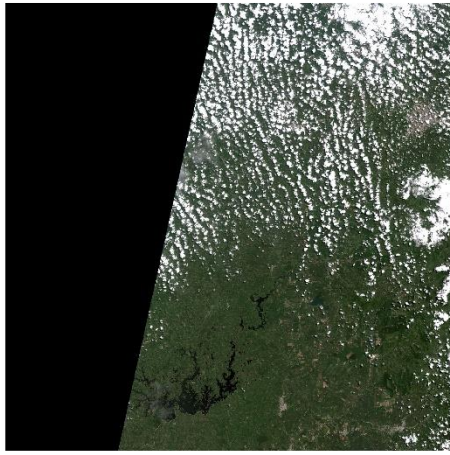
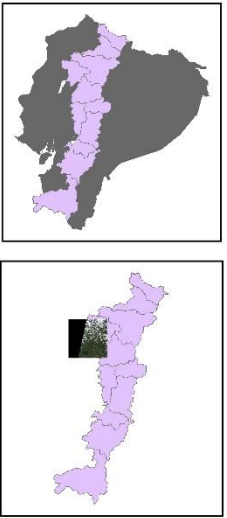
Una vez identificadas las zonas alto andinas del Ecuador se obtuvieron 19 imágenes capturadas por los satélites Sentinel-2A, el primero lanzado en junio del 2015 lleva el instrumento multispectral (MSI), contando con un ciclo de repetición de 10 días en una franja de 290 km de ancho (Zhang et al., 2018).







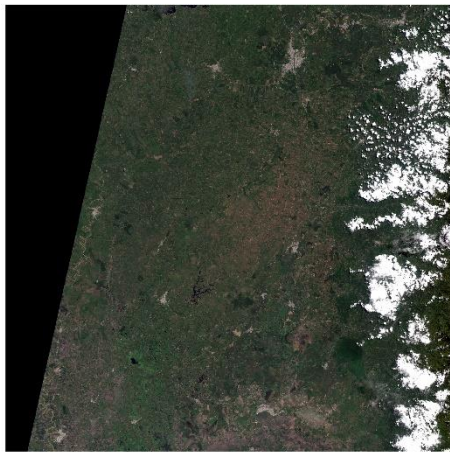


De este modo, determinadas escenas se ordenaron en un mosaico de norte a sur, y las imágenes descargadas muestran la siguiente información:

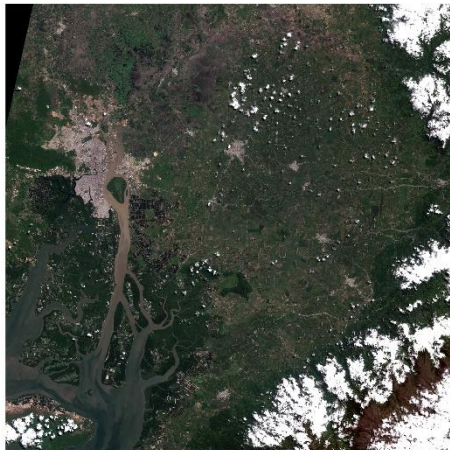

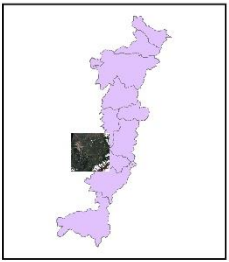


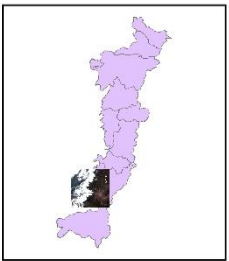
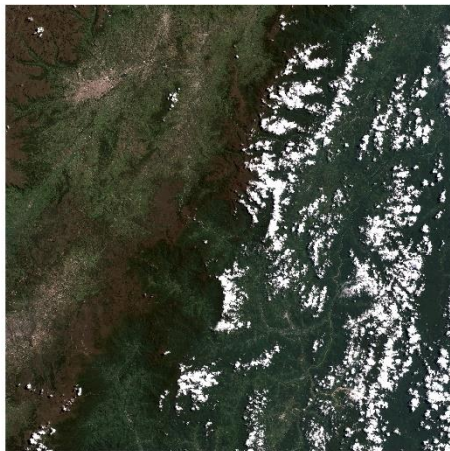

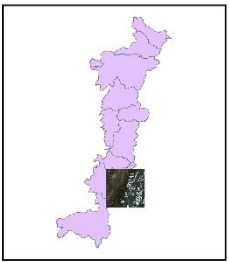
Tabla 7. 2. Características estructurales de imágenes Sentinel

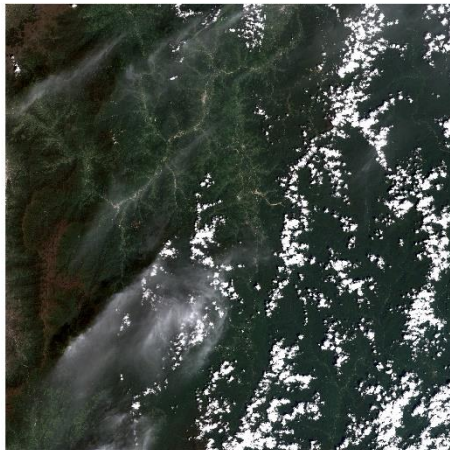

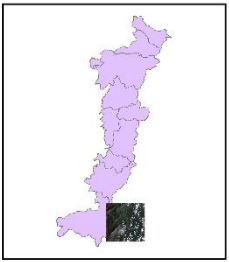


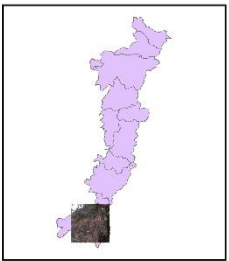
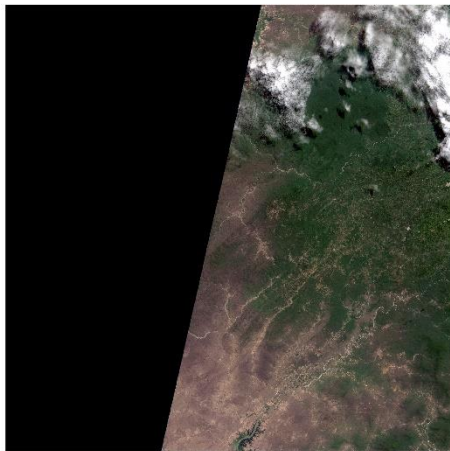


		Plataforma: SENTINEL-2B Nivel de procesamiento: Nivel-1C Formato del producto: JPEG2000 Cubierta de nubes: 5.58 Número de órbita: 68 Provincias: Carchi
L1C_T17NQB_A007387_20180805T154019		
		Plataforma: SENTINEL-2 A Nivel de procesamiento: Nivel-1C Formato del producto: JPEG2000 Cubierta de nubes: 24.16 Número de órbita: 68 Provincias: Carchi, Imbabura
L1C_T17NRB_A012935_20171213T154236		
		Plataforma: SENTINEL-2 A Nivel de procesamiento: Nivel-1C Formato del producto: JPEG2000 Cubierta de nubes: 3.27 Número de órbita: 68 Provincias: Carchi, Imbabura, Pichincha
L1C_T17NRA_A012935_20171213T154236		

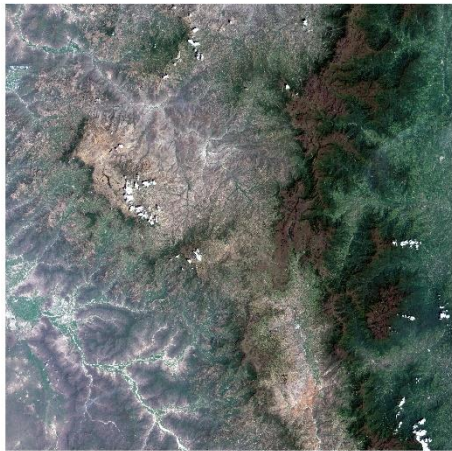
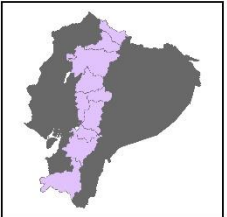
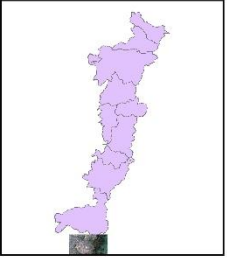
		Plataforma: SENTINEL-2 A
		Nivel de procesamiento: Nivel-1C
		Formato del producto: JPEG2000
		Cubierta de nubes: 18.55
		Número de órbita: 68
		Provincias: Pichincha, Cotopaxi, Santo Domingo de los Tsáchilas, Tungurahua
L1C_T17MQV_A012935_20171213T154236		
		Plataforma: SENTINEL-2 A
		Nivel de procesamiento: Nivel-1C
		Formato del producto: JPEG2000
		Cubierta de nubes: 35.10
		Número de órbita: 68
		Provincias: Carchi, Imbabura, Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas
L1C_T17NQA_A012935_20171213T154236		
		Plataforma: SENTINEL-2 A
		Nivel de procesamiento: Nivel-1C
		Formato del producto: JPEG2000
		Cubierta de nubes: 20.15
		Número de órbita: 68
		Provincias: Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas
L1C_T17NPA_A014651_20180412T153620		

		Plataforma: SENTINEL-2 A Nivel de procesamiento: Nivel-1C Formato del producto: JPEG2000 Cubierta de nubes: 40,23 Número de órbita: 68 Provincias: Pichincha
L1C_T17MRV_A017082_20180929T153615		
		Plataforma: SENTINEL-2 A Nivel de procesamiento: Nivel-1C Formato del producto: JPEG2000 Cubierta de nubes: 8.90 Número de órbita: 68 Provincias: Tungurahua
L1C_T17MRU_A012935_20171213T154236		
		Plataforma: SENTINEL-2 A Nivel de procesamiento: Nivel-1C Formato del producto: JPEG2000 Cubierta de nubes: 9.30 Número de órbita: 68 Provincias: Santo Domingo de los Tsáchilas, Pichincha, Cotopaxi
L1C_T17MPV_A005814_20180417T154048		

		Plataforma: SENTINEL-2 A
		Nivel de procesamiento: Nivel-1C
		Formato del producto: JPEG2000
		Cubierta de nubes: 11.39
		Número de órbita: 68
L1C_T17MQU_A014651_20180412T153620		Provincias: Cotopaxi; Tungurahua, Bolívar, Chimborazo
		Plataforma: SENTINEL-2 A
		Nivel de procesamiento: Nivel-1C
		Formato del producto: JPEG2000
		Cubierta de nubes: 10.29
		Número de órbita: 68
L1C_T17MQT_A004384_20180107T153816		Provincias: Bolívar, Chimborazo, Cañar, Azuay
		Plataforma: SENTINEL-2 A
		Nivel de procesamiento: Nivel-1C
		Formato del producto: JPEG2000
		Cubierta de nubes: 4.31
		Número de órbita: 68
L1C_T17MPU_A005814_20180417T154048		Provincias: Cotopaxi, Bolívar

	 	Plataforma: SENTINEL-2 A Nivel de procesamiento: Nivel-1C Formato del producto: JPEG2000 Cubierta de nubes: 7.47 Número de órbita: 68 Provincias: Bolívar, Chimborazo, Cañar, Azuay
L1C_T17MPT_A014794_20180422T153620		
	 	Plataforma: SENTINEL-2 A Nivel de procesamiento: Nivel-1C Formato del producto: JPEG2000 Cubierta de nubes: 11.39 Número de órbita: 68 Provincias: Cañar, Azuay, Loja
L1C_T17MPS_A003669_20171118T153646		
	 	Plataforma: SENTINEL-2 A Nivel de procesamiento: Nivel-1C Formato del producto: JPEG2000 Cubierta de nubes: 6.85 Número de órbita: 68 Provincias: Cañar, Azuay, Loja
L1C_T17MQS_A014651_20180412T153620		

	 	Plataforma: SENTINEL-2B
		Nivel de procesamiento: Nivel-1C
		Formato del producto: JPEG2000
		Cubierta de nubes: 22.67
		Número de órbita: 68
		Provincias: Azuay, Loja
L1C_T17MQR_A003669_20171118T153646		
	 	Plataforma: SENTINEL-2 B
		Nivel de procesamiento: Nivel-1C
		Formato del producto: JPEG2000
		Cubierta de nubes: 4.72
		Número de órbita: 68
		Provincias: Loja
L1C_T17MPR_A003669_20171118T153646		
	 	Plataforma: SENTINEL-2B
		Nivel de procesamiento: Nivel-1C
		Formato del producto: JPEG2000
		Cubierta de nubes: 3.28
		Número de órbita: 68
		Provincias: Loja
L1C_T17MNR_A005814_20180417T154048		

  	Plataforma: SENTINEL-2B
	Nivel de procesamiento: Nivel-1C
	Formato del producto: JPEG2000
	Cubierta de nubes: 0.25
	Número de órbita: 68
L1C_T17MPQ_A003669_20171118T153646	
Provincias: Loja	

Elaborado por: Oscar Contreras

Nota Las escenas descargadas de (USGS, 2017) las plataformas SENTINEL-2A, SENTINEL-2B son gratuitas en nivel L1C compuesta con 13 bandas espectrales para evaluar el suelo y la vegetación, las mismas se encuentran configuradas a una resolución de 10, 20, 60 metros, lo que permite un mayor análisis de cambio de bosques.

2. Georreferenciación de zona de estudio

Diversas investigaciones determinan que la especie *Polylepis reticulata* Hieron se encuentra distribuida en climas extremos y ambientes hostiles, por lo cual la ortofotografía permitió identificar la zona del bosque de *Polylepis* que se encuentra la reserva y se determinó que el territorio de estudio constituía toda la zona alto andina o región sierra del Ecuador, que compartía las características climáticas y geográficas de la RPFCH.

a. Georreferenciación de Bosque de *Polylepis*

El bosque de *Polylepis* se encuentra ubicado en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo (RPFCH), provincia de Bolívar conformando un atractivo turístico dentro la Reserva.

b. Georreferenciación en el Ecuador

El Ecuador está dividido en cuatro regiones importantes: Costa, Sierra, Amazonía e Insular. Para determinado estudio se considera las zonas alto andina o región sierra creando un mosaico con escenas de imágenes Sentinel nivel L1C formato permitido para su descarga.

1) Zonas alto andina de la Sierra Norte

La zona alta andina de la Sierra norte está compuesta por cinco provincias Carchi, Imbabura, Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas y Cotopaxi, para lo cual se utilizó diez escenas satelitales Sentinel que cubren un área total de 2.813.409,48 hectáreas, de las cuales el 43,85% constituyen la zona alto andina del Ecuador, mostrando una cubierta de nubes promedio al 17,20 %.

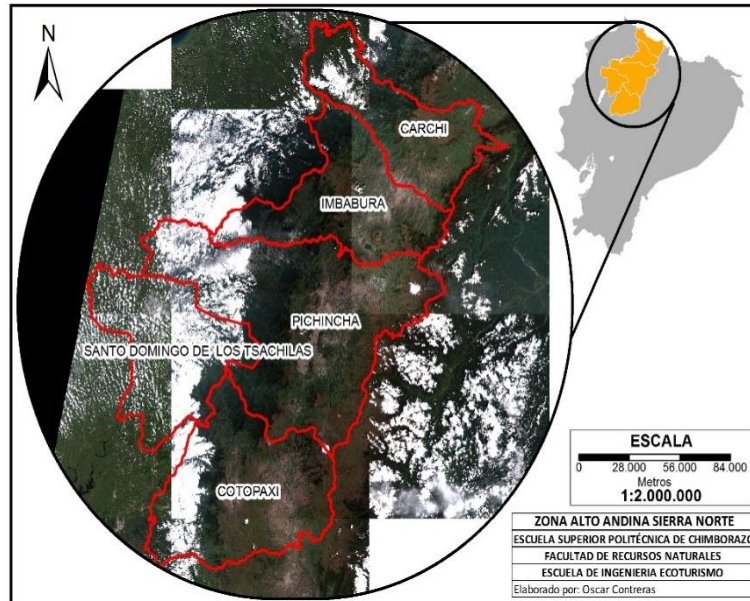


Figura 7. 9. Georreferenciación de la zona alto andina ecuatoriana norte
Elaborado por: Oscar Contreras

2) Zona alto andina de la Sierra Centro

La zona alta andina de la Sierra centro está compuesta por tres provincias Tungurahua, Bolívar y Chimborazo, para lo cual se utilizó cinco escenas satelitales Sentinel que cubren un área total de 1.380.667,44 hectáreas, de las cuales el 21,52% constituyen la zona alto andina del Ecuador mostrando una cubierta de nubes promedio al 8,47%

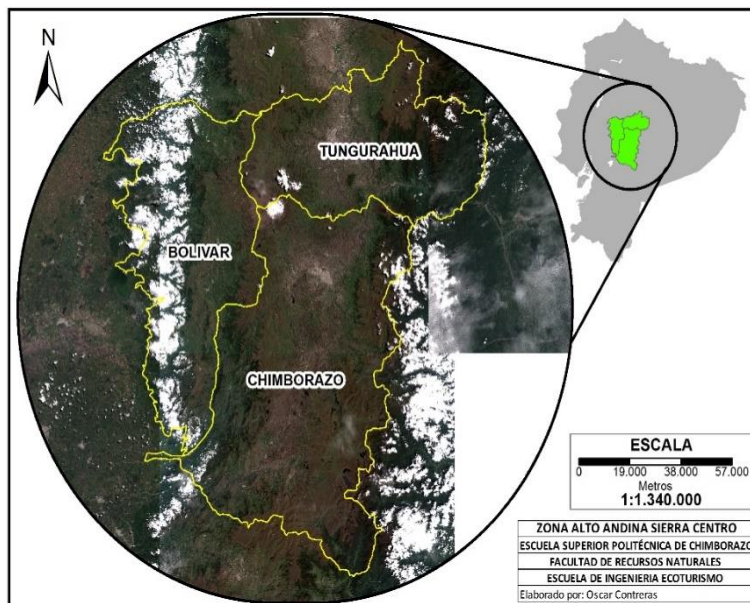


Figura 7. 10. Georreferenciación de la zona alto andina ecuatoriana centro
Elaborado por: Oscar Contreras

3) Zona alto andina de la Sierra Sur

La zona alta andina de la Sierra sur está compuesta por tres provincias Cañar, Azuay y Loja, para lo cual se utilizó ocho escenas satelitales Sentinel que cubren un área total de 2.222.057,86 hectáreas de las cuales el 34,63% constituyen la zona alto andina del Ecuador, mostrando una cubierta de nubes promedio al 8,36%.

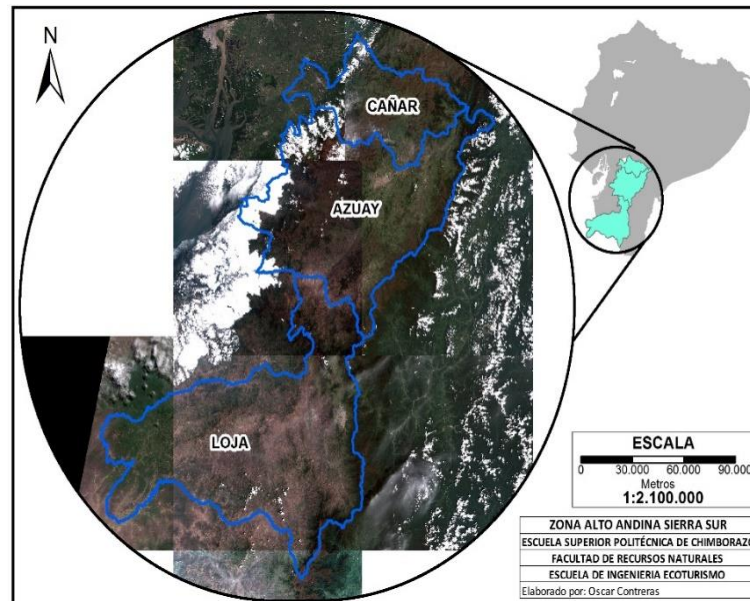


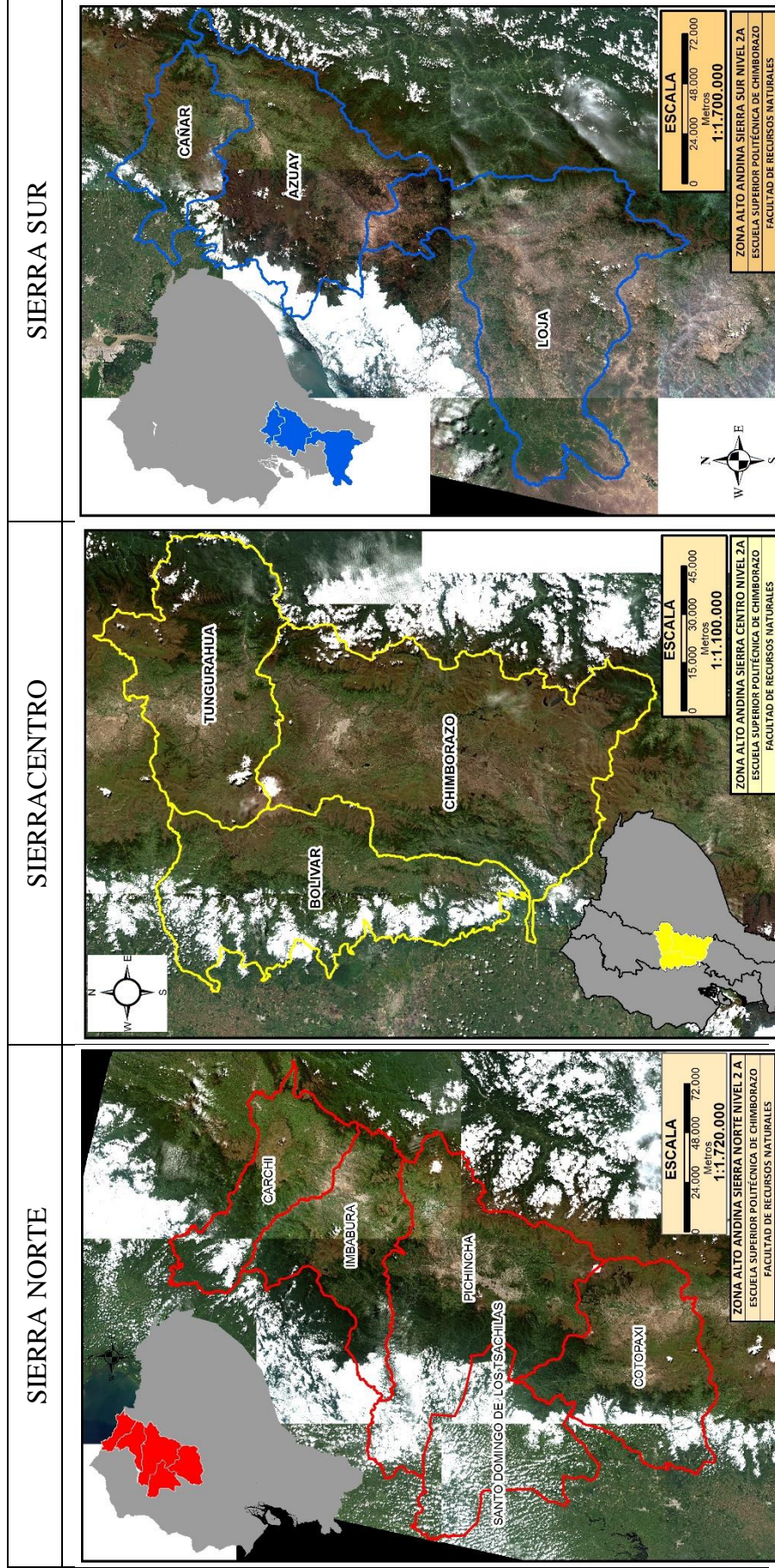
Figura 7. 11. Georreferenciación de la zona alto andina ecuatoriana sur
Elaborado por: Oscar Contreras

3. Corrección y procesamiento de información satelital

La corrección de las imágenes satelitales fue realizada en el software *SNAP.EESA*, mismo que permite realizar las correcciones atmosféricas de las imágenes satelitales, elevando las imágenes de descarga en nivel L 1C a nivel L 2A, clasificando cada una de las bandas espectrales en diferente resolución (10,20,60 metros).

La resolución de 10 metros permite tener un campo de visión a mayor detalle de los elementos en la tierra, manteniendo sus características y disminuyendo errores en el procesamiento satelital.

Tabla 7. 3. Corrección Radiométrica y Atmosférica de las imágenes Satelitales



Elaborado por: Oscar contreras

Nota: Las 19 escenas del satélite SENTINEL fueron sometidas al proceso de corrección atmosférica y elevadas al nivel Sentinel L2A y procesadas a una resolución de 10 metros por pixel.

4. Cálculos de índices espectrales de vegetación del Bosque de Polylepis

Para el cumplimiento de esta fase, se calcularon 4 índices de vegetación espectral (NDVI, SAVI5, SAVI15, NDWI) con sus fórmulas en el software *QGIS 3.2* y el software *ArcGis 10.5*. variables adecuadas que sirvieron como indicadores potenciales en la predicción de *Polylepis reticulata* Hieron, y una comparación gráfica de los índices espectrales en la ortofotografía e imágenes Sentinel 2 A.

a. Índices espectrales de vegetación de la ortofotografía

1) (NDVI) Índice Normalizado Diferencial de Vegetación

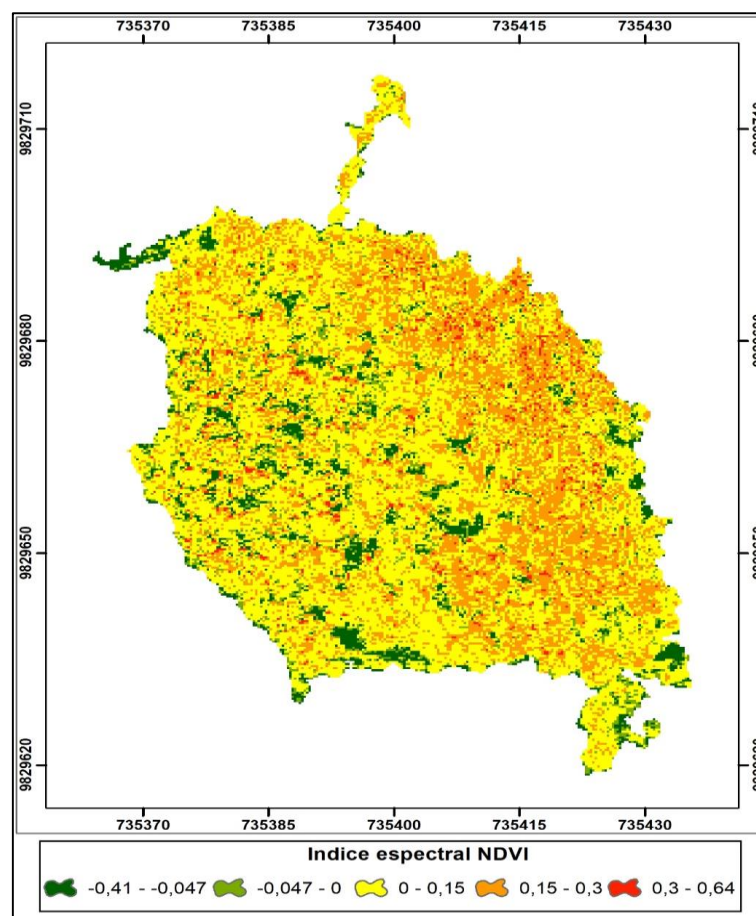


Figura 7. 12. Índice de Vegetación de Ortofotografía (NDVI)
Elaborado por: Oscar Contreras

El índice de vegetación NDVI calculado a partir de las bandas espectrales de la ortofotografía (rojo e infrarrojo cercano), presentó un color rojo que hace referencia a la cobertura vegetal de bosque de mayor reflectancia y vegetación saludable.

De la misma forma se observa una cobertura de color naranja y amarillo, que representa la cobertura de vegetación con poca reflectancia o vegetación poco saludable.

Finalmente se representa con color verde la cobertura de las rocas y suelo desnudo. La producción primaria (fotosíntesis-clorofila) del NDVI aporta un total de información 100% para el entrenamiento Random Forest.

2) (SAVI5) Índice de Vegetación ajustado con el suelo

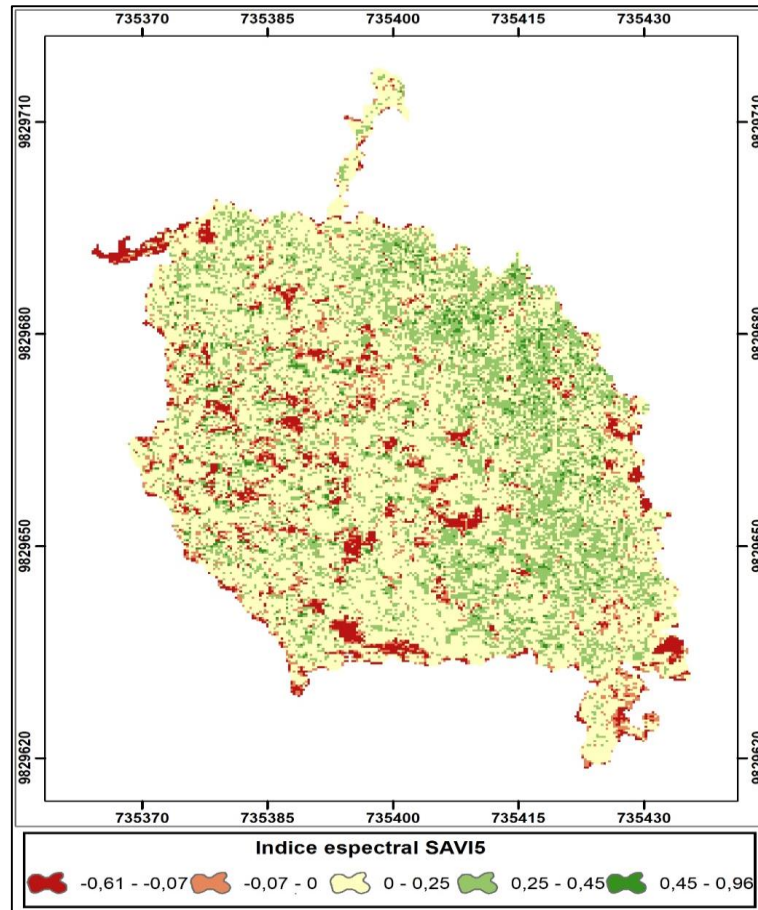


Figura 7. 13. Índice de Vegetación de Ortofotografía (Savi5)
Elaborado por: Oscar Contreras

El índice de vegetación SAVI calculado a partir de las bandas espectrales de la ortofotografía, con el infrarrojo cercano (IR) y el rojo (R), el mismo que se encuentra ajustado con un factor de corrección al brillo del suelo “L” igual a 0,5, presentó los siguientes resultados:

La cobertura de color verde, constituye la vegetación con buena salud.

La cobertura de color blanco y verde claro representa los árboles poco saludables,

Y finalmente el color rojizo representa las rocas y áreas de suelo desnudo en el interior del bosque. La producción primaria (fotosíntesis-clorofila) en SAVI 5 aporta un total de información 100% para el entrenamiento Random Forest.

3) (SAVI15) Índice de Vegetación ajustado con el suelo

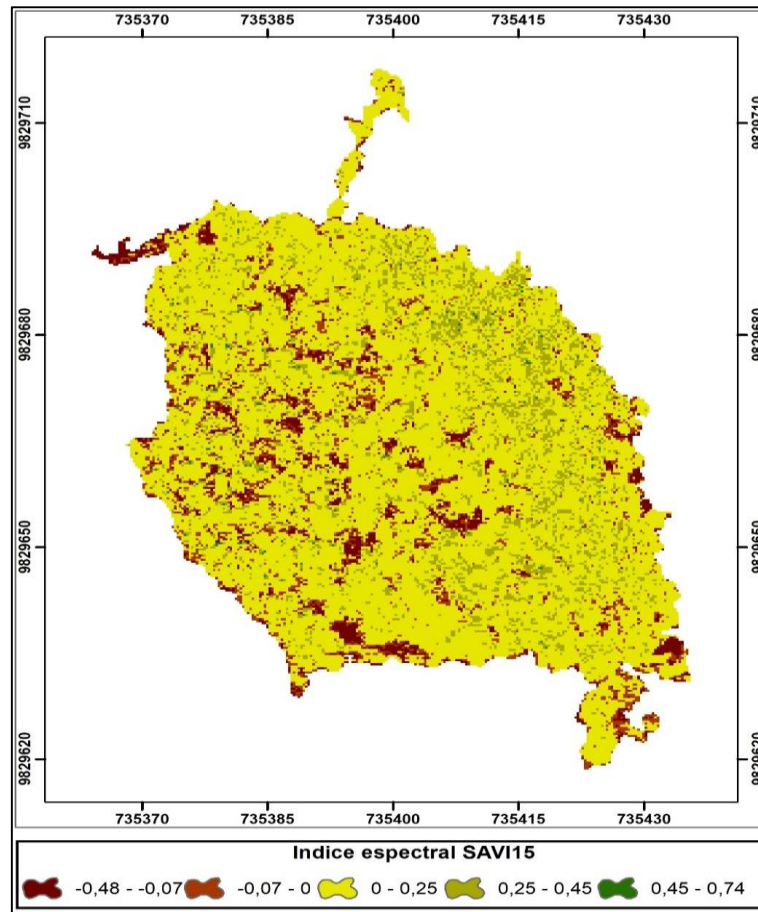


Figura 7. 14. Índice de Vegetación de Ortofotografía (Savi15)
Elaborado por: Oscar Contreras

El índice de vegetación SAVI calculado a partir de las bandas espectrales de la ortofotografía, con el infrarrojo cercano (IR) y el rojo (R) ajustado con un factor de corrección al brillo del suelo “L” igual a 0,15, presentó los siguientes resultados:

La cobertura de color verde oscuro, representa los bosques y árboles con buena salud

La cobertura de color verde claro presenta los arboles con poca salud y menor reflectancia.

Y finalmente el color rojo, representa las rocas y suelo desnudo en el interior del bosque. La producción primaria (fotosíntesis-clorofila) en SAVI 15 aporta un total de información 100% para el entrenamiento Random Forest.

4) (NDWI) El índice de Agua de Diferencia Normalizada

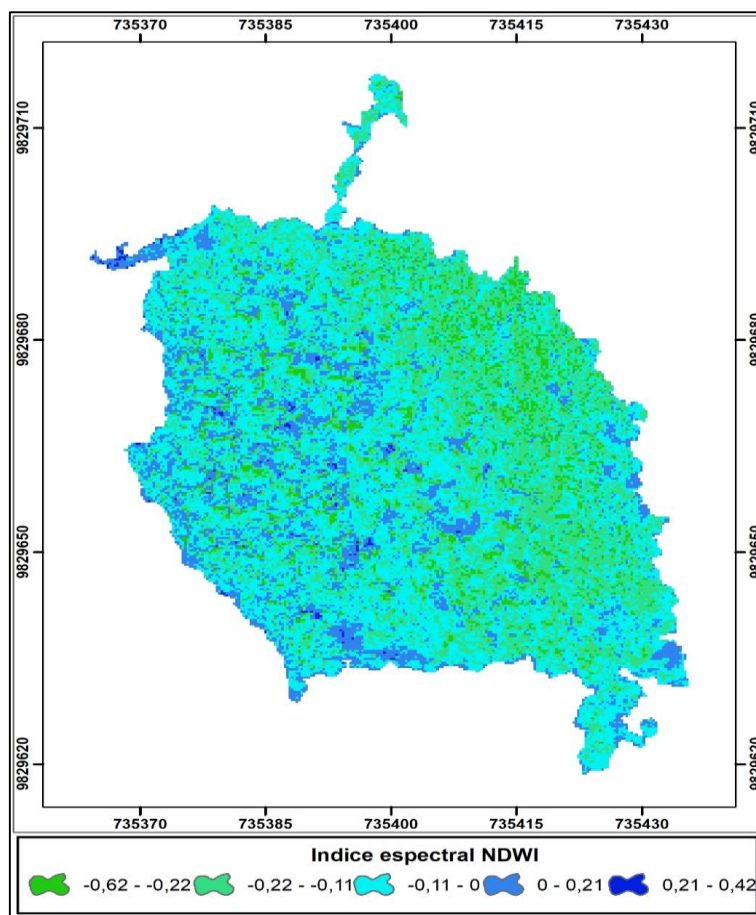


Figura 7. 15. Índice de Vegetación de Ortofotografía (NDWI)
Elaborado por: Oscar Contreras

Tabla 7. 4. Clasificación estadística los índices espectrales de vegetación de la Ortofotografía

Clasificación de estadísticas	NDVI	SAVI5	SAVI15	NDWI
Numero de pixel	40.856	40.865	40.825	40.865
Media	0,11	0,16	0,12	-0,08
Desviación Estándar	0,10	0,15	0,11	0,09

Elaborado por: Oscar Contreras

El índice de vegetación NDWI calculado a partir de las bandas espectrales de la ortofotografía con el verde (G) e infrarrojo cercano (IR), presentó los siguientes resultados:

La cobertura de color azul refleja las zonas sin vegetación o suelo descubierto

La cobertura de color celeste refleja la vegetación poco saludable.

Y finalmente la cobertura de color verde refleja la vegetación de árboles saludable. La producción primaria (fotosíntesis-clorofila) aporta un total de información 6,25% para el entrenamiento Random Forest.

b. Índices espectrales de vegetación de imágenes satelitales SENTINEL 2 A

Los índices de vegetación (NDVI, SAVI 5, SAVI 15, NDWI) procesados en el software *Qgis 3.2*, mediante el procesamiento de las bandas espectrales (Verde (3), Roja (4), Infrarroja (8)) esenciales para la identificación de la especie *Polylepis reticulata* Hieron, a una resolución de 10 metros por pixel (X, Y).

1) Índices espectrales de vegetación calculados mediante *Qgis 3.2*

a) (NDVI) Índice Normalizado Diferencial de Vegetación

El índice de vegetación NDVI calculado a partir de las bandas espectrales rojo (R) e infrarrojo cercano (IR), muestra la siguiente información: la cobertura de color rojo representa la vegetación saludable y bosques importantes, el color amarillo y naranja representa el suelo con vegetación arbustiva o herbácea y finalmente el color verde representa las rocas, suelo desnudo, hielo y partes de nubes. La producción primaria (fotosíntesis-clorofila) aporta un total de información 25,03 % para el entrenamiento Random Forest.

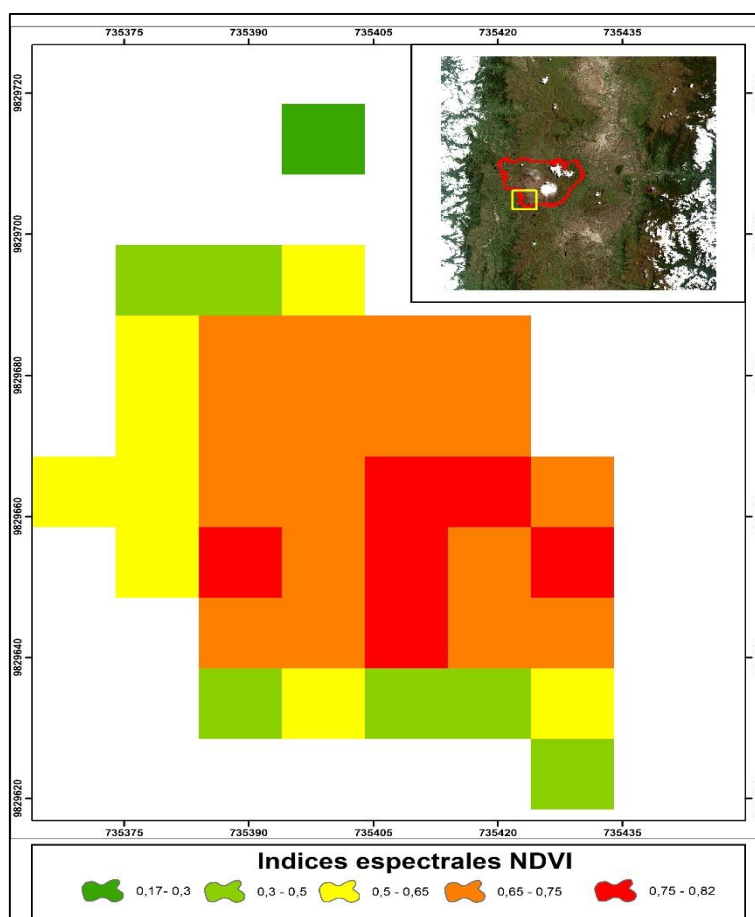


Figura 7. 16. Cálculo del Índice de Vegetación (NDVI) mediante QGIS en Sentinel 2 A
Elaborado por: Oscar Contreras

b) (SAVI5) Índice de Vegetación ajustado con el suelo

El índice de vegetación SAVI calculado a partir de las bandas espectrales de la imagen satelital, con el infrarrojo cercano (IR) y el rojo (R) ajustado con un factor de corrección al brillo del suelo "L" igual a 0,5; muestra la siguiente información: la cobertura de color verde representa los bosques y vegetación

en buena salud, el color blanco y verde claro representa la vegetación herbácea y menos saludable y finalmente el color rojo representa las rocas, suelo desnudo, hielo y nubes. La producción primaria (fotosíntesis-clorofila) en SAVI 5 aporta un total de información 12,22 % para el entrenamiento Random Forest.

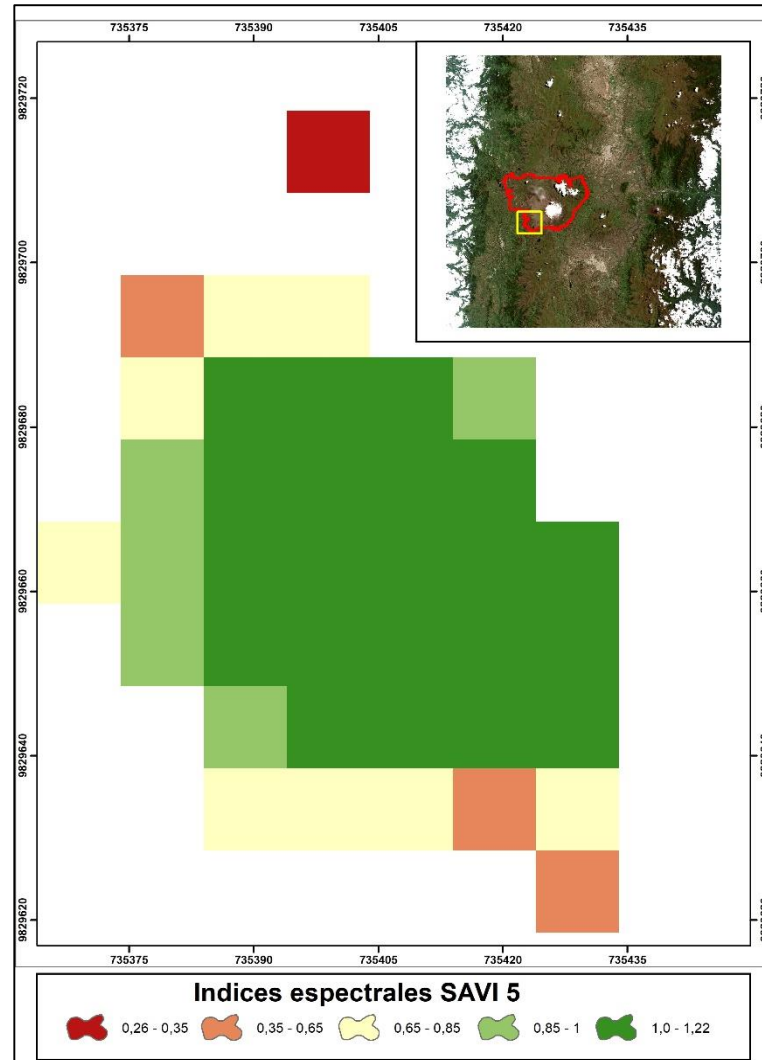


Figura 7. 17. Cálculo del Índice de Vegetación (SAVI 5) mediante *QGIS* en Sentinel 2 A

Elaborado por: Oscar Contreras

c) (SAVI15) Índice de Vegetación ajustado con el suelo

El índice de vegetación SAVI calculado a partir de las bandas espectrales de la imagen satelital, con el infrarrojo cercano (IR) y el rojo (R) ajustado con un factor de corrección al brillo del suelo “L” igual a 0,15; muestra la siguiente información: la cobertura de color verde oscuro representa los bosques y vegetación en buena salud, el verde claro representa la vegetación herbácea y menos saludable y finalmente el color rojo presenta las rocas, suelo desnudo, hielo y nubes. La producción primaria (fotosíntesis-clorofila) en SAVI 15 aporta un total de información 25,61 % para el entrenamiento Random Forest.

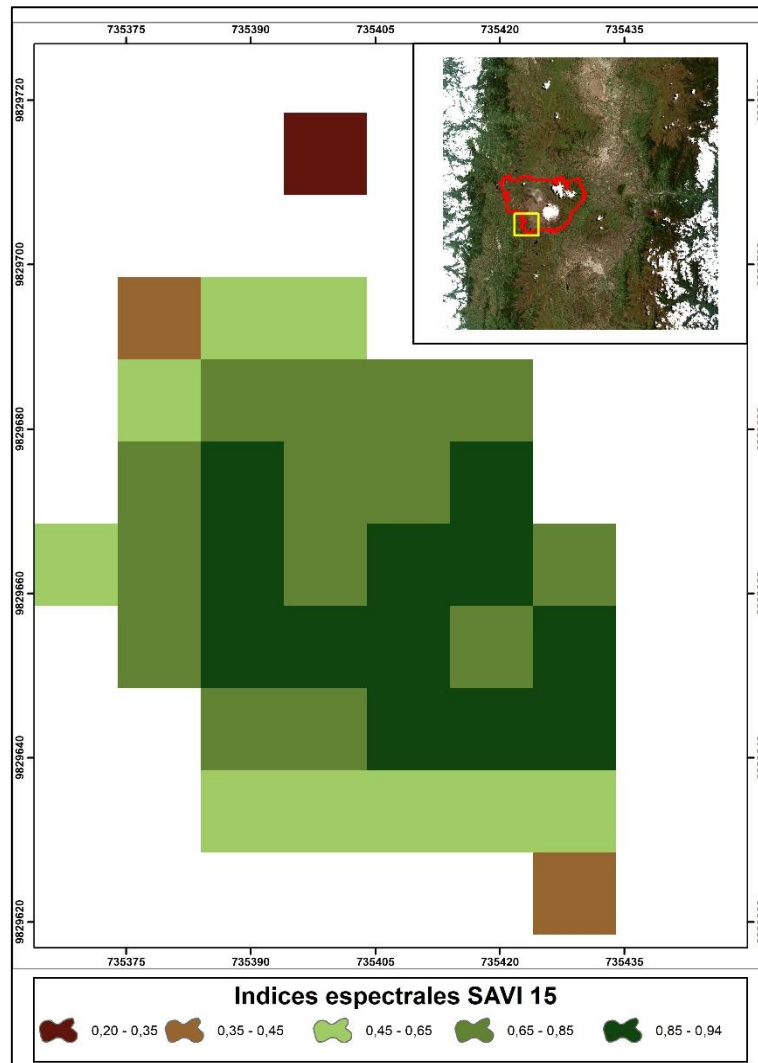


Figura 7. 18. Cálculo del Índice de Vegetación (SAVI 15) mediante *QGIS* en Sentinel 2 A
Elaborado por: Oscar Contreras

d) (NDWI) El índice de Agua de Diferencia Normalizada

El índice de vegetación NDWI calculado a partir de las bandas espectrales de la imagen satelital con el verde (3) e infrarrojo cercano (8), muestra la siguiente información: la cobertura de color azul representa las zonas de hielo, agua y nubes, el color celeste representa el suelo desnudo y vegetación herbácea o poco saludable y finalmente el color rojo oscuro refleja la vegetación saludable. La producción primaria (fotosíntesis-clorofila) aporta un total de información 100 % para el entrenamiento Random Forest.

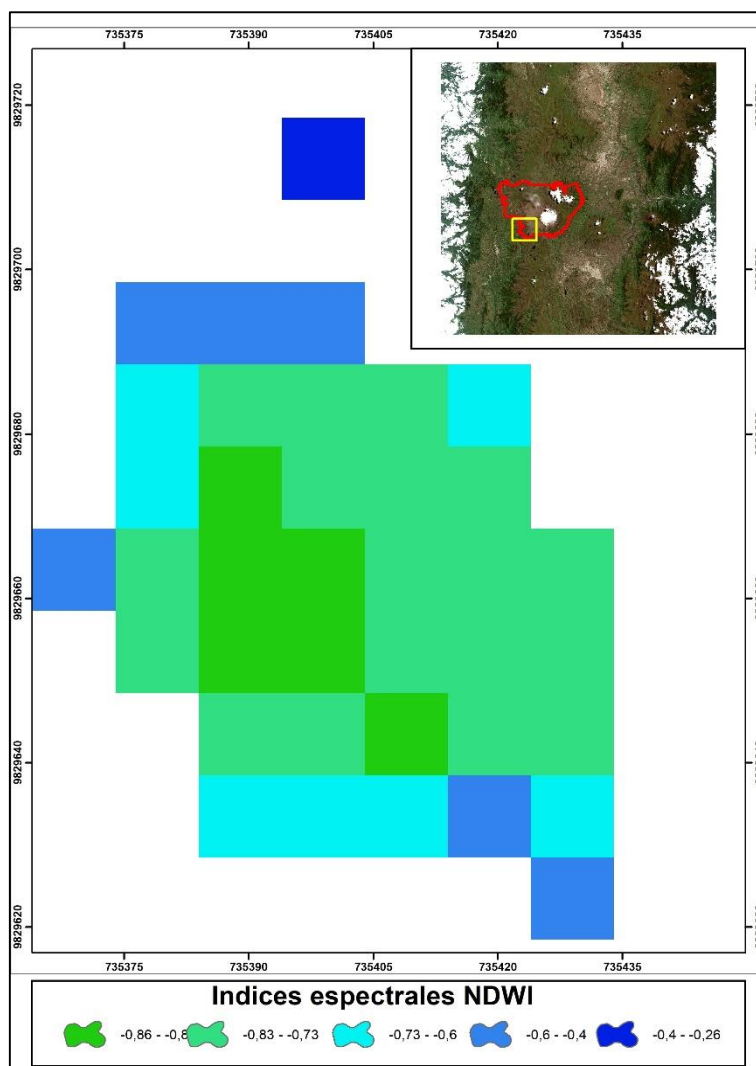


Figura 19. Cálculo del Índice de Vegetación (NDWI) mediante *QGIS* en Sentinel 2 A

Nota: luego del debido procesamiento se utilizó el software *ArcGis 10.5*, teniendo como base principal la imagen satelital que cubre la mayor parte de la zona 3 del Ecuador.

Elaborado por: trabajo de campo *Qgis*,

Tabla 7. 5. Clasificación estadística de los índices de vegetación Qgis

Clasificación de estadísticas	NDVI	SAVI 5	SAVI 15	NDWI
Numero de pixel	38	38	38	38
Media	0,63	0,95	0,73	- 0,72
Desviación Estándar	0,14	0,22	0,17	0,12

Elaborado por: Oscar Contreras

2) Índices espectrales de vegetación calculados mediante *Qgis* 3.2

a) NDVI Índice Normalizado Diferencial de Vegetación

El índice de vegetación NDVI calculado a partir de las bandas espectrales rojo (R) e infrarrojo cercano (IR), muestra la siguiente información: la cobertura de color rojo representa la vegetación saludable y bosques importantes, el color amarillo y naranja refleja el suelo con vegetación arbustiva o herbácea y

finalmente el color verde representa las rocas, suelo desnudo, hielo y partes de nubes. La producción primaria (fotosíntesis-clorofila) aporta un total de información 100 % para el entrenamiento Random Forest

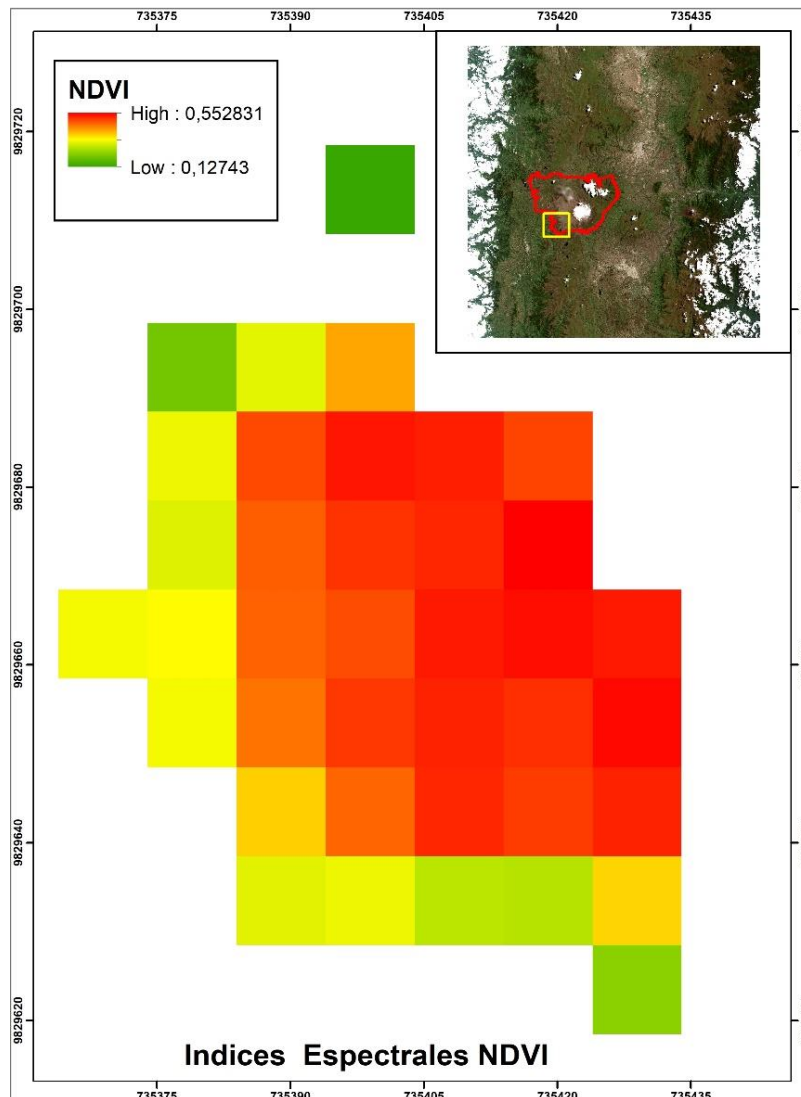


Figura 7. 20. Cálculo del Índice de Vegetación (NDVI) mediante SNAP en Sentinel 2 A
Elaborado por: Oscar Contreras

b) (SAVI5) Índice de Vegetación ajustado con el suelo

El índice de vegetación SAVI calculado a partir de las bandas espectrales de la imagen satelital, con el infrarrojo cercano (IR) y el rojo (R) ajustado con un factor de corrección al brillo del suelo “L” igual a 0,5; muestra la siguiente información: la cobertura de color verde representa los bosques y vegetación en buena salud, el color blanco y verde claro representa la vegetación herbácea y menos saludable y finalmente el color rojo representa las rocas, suelo desnudo, hielo y nubes. La producción primaria (fotosíntesis-clorofila) en SAVI 5 aporta un total de información 87,30 % para el entrenamiento Random Forest.

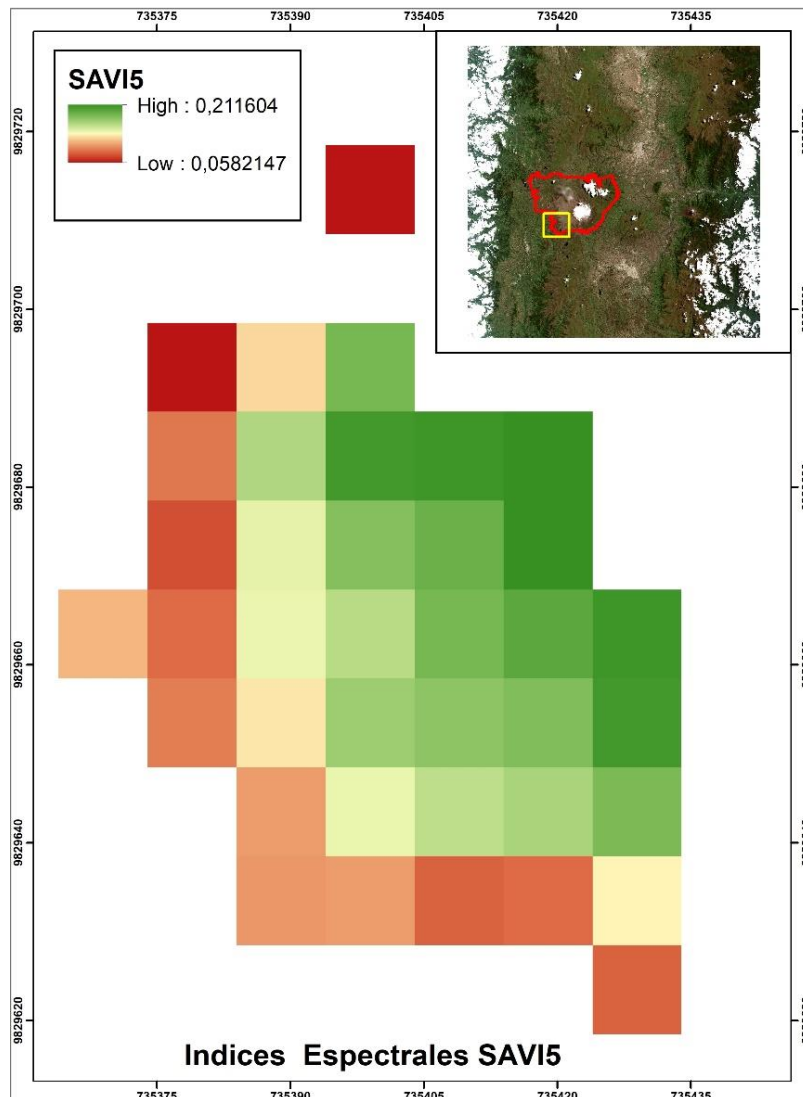


Figura 21. Cálculo del Índice de Vegetación (SAVI5) mediante SNAP en Sentinel 2 A
Elaborado por: Oscar Contreras

c) (SAVI15) Índice de Vegetación ajustado con el suelo

El índice de vegetación SAVI calculado a partir de las bandas espectrales de la imagen satelital, con el infrarrojo cercano (IR) y el rojo (R) ajustado con un factor de corrección al brillo del suelo “L” igual a 0,15; muestra los siguientes resultados: la cobertura de color verde oscuro representa los bosques y vegetación en buena salud, el color verde claro representa la vegetación herbácea y menos saludable, finalmente el color rojo representa las rocas, suelo desnudo, hielo y nubes. La producción primaria (fotosíntesis-clorofila) en SAVI 15 aporta un total de información 43,16 % para el entrenamiento Random Forest.

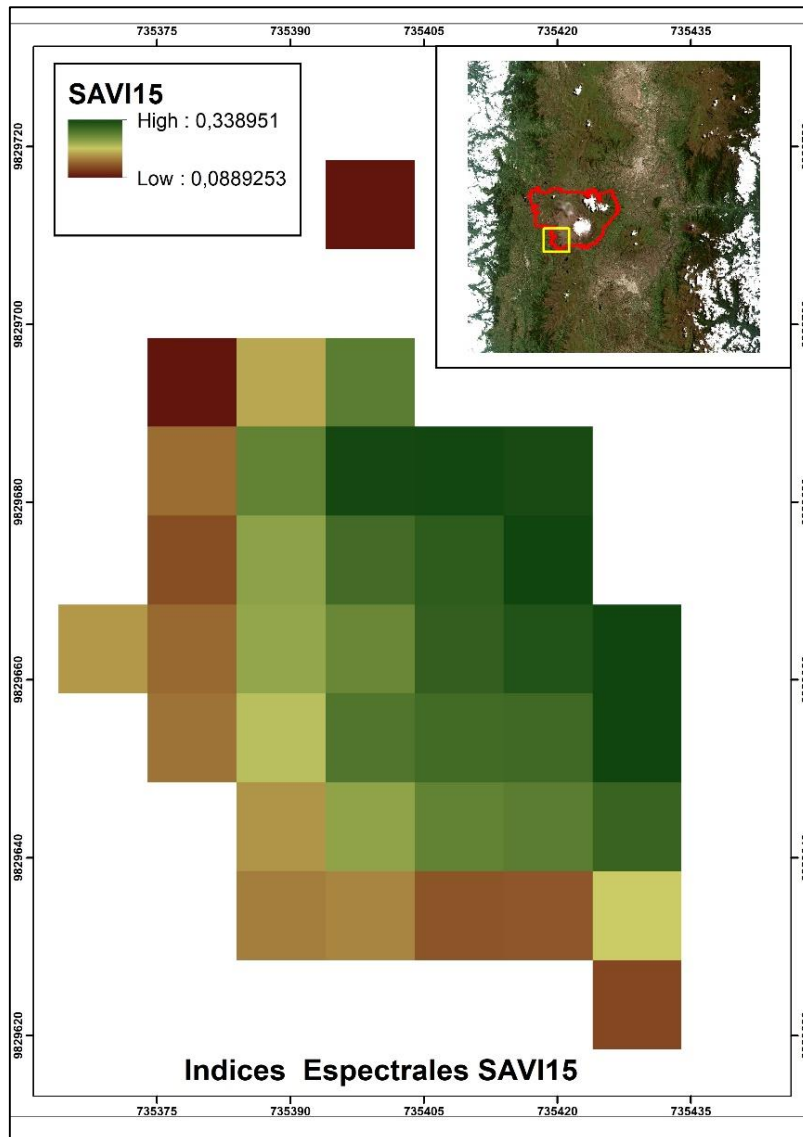


Figura 22. Cálculo del Índice de Vegetación (NDWI) mediante SNAP en Sentinel 2 A
Elaborado por: Oscar Contreras

d) (NDWI) El índice de Agua de Diferencia Normalizada

El índice de vegetación NDWI calculado a partir de las bandas espectrales de la imagen satelital, con el verde (3) e infrarrojo cercano (8), muestra los siguientes resultados: la cobertura de color azul representa las zonas de hielo, agua y nubes, el color celeste refleja el suelo desnudo y vegetación herbácea o poco saludable y finalmente el color rojo oscuro representa la vegetación saludable. La producción primaria (fotosíntesis-clorofila) aporta un total de información 23,06 % para el entrenamiento Random Forest.

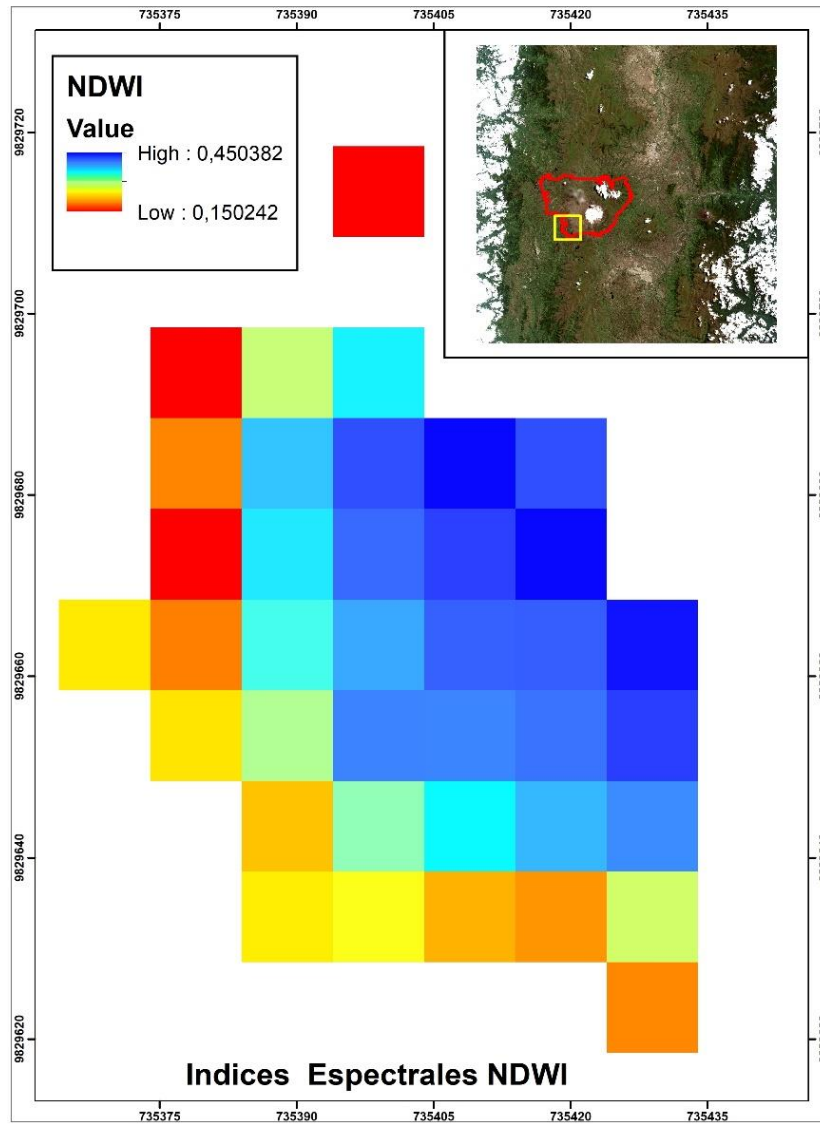


Figura 23. Cálculo del Índice de Vegetación (NDWI) mediante *SNAP* en Sentinel 2 A
Elaborado por: Oscar Contreras

Tabla 7. 6. Clasificación estadística de los índices de vegetación *SNAP*

Clasificación de estadísticas	NDVI	SAVI 5	SAVI 15	NDWI
Numero de pixel	38	38	38	38
Media	0,42	0,14	0,73	0,34
Desviación Estándar	0,11	0,05	0,17	0,09

Elaborado por: Oscar Contreras

5. Limitaciones del área de cobertura en Imágenes satelitales Sentinel 2A

Mediante diversos estudios realizados por la comunidad científica sobre el uso de imágenes satelitales, se ha podido establecer las ventajas, desventajas y limitaciones según el tipo de proyecto satelital.

Partiendo de ello estudios elaborados en imágenes satelitales Sentinel 2 A y Landsat propuestos por (Picone, 2017), (Escobar Flores, Lopez Sanchez, Sandoval, Marquez Linares, & Wehenkel, 2018), (Sonobe, et al., 2018), (Hernán & Hernández, 2017) que usan los principales índices espectrales de vegetación NDBI, UI, NDVI, SAVI, NDWI, MNDWI, SR, RVI, GI y SAVI5, mediante procesos metodológicos en softwares *Qgis.xx* y *SNAP* para zonas de territorios georreferenciados de alrededor de 1.600 píxeles distribuidos por 400 píxeles en cada clase de uso, de la misma manera la utilización de polígonos para elegir las texturas del territorio en 4.719 campos de cultivos con áreas de georreferenciación mayores a 18 hectáreas en seis clases de cultivos, similarmente en estudios de vegetación usan áreas desde 47, 6 hectáreas los cuales permiten proponer una restauración de ecosistemas.

Todos los casos de estudios ya sea de uso de suelo, identificación de especies o evaluación de cultivos, a través del uso de imágenes Sentinel 2 A (Borràs, et al., 2017), requiere del uso de diversas capas con muchas fuentes de georreferenciación o ROI (region of interest), que cuenten con un gran número de píxeles como datos de entrenamiento y validación.

Finalmente, los resultados obtenidos de la extracción de píxeles en la imagen Sentinel 2 A con resolución de 10 metros y sus respectivos índices espectrales de vegetación, referente al estudio en el Bosque de *Polylepis* que posee un área de 0,34 hectáreas siendo considerada la más importante en la reserva no refleja un número adecuado para realizar evaluación o ser considerados variables de importancia para la identificación de la especie *Polylepis reticulata* Hieron, como se ha logra evidenciar en diversos estudios de vegetación no sería la opción más óptima puesto a tener pocos datos y muy generales fácilmente podrían considerarse similares en diversas áreas del territorio y no a la especie en estudio.

B. IDENTIFICACIÓN DE LA ESPECIE *Polylepis reticulata* Hieron

Una vez calculados los índices espectrales de vegetación de la ortofotografía y de las imágenes satelitales Sentinel 2 A, se realiza tres entrenamientos para la ortofotografía, partiendo de la discriminación de valores calculados en la ortofotografía menores a: ($NDVI < 0,01$), ($NDVI < 0,04$), ($NDVI < 0,07$), esto se realiza en base a la importancia de los índices de vegetación que presenta en el Bosque de *Polylepis* y la efectividad en la información de la ortofotografía puedan ser identificados correctamente en el software *Random Forest*, considerando la resolución del pixel (0,0938m, y 10 m) en X, Y.

Para ello, partimos de la información obtenida en el procesamiento del software *ArcGis 10.5* de los shapefile de *Polylepis* identificados en el trabajo de campo y las áreas delimitadas como **Polylepis** y áreas **No Polylepis** observados en la ortofotografía.

A continuación, se detalla los resultados y discusión del entrenamiento aplicando el algoritmo de aprendizaje automático *Random Forest*:

1. Aplicación del algoritmo de clasificación *Random Forest* primer entrenamiento en la Ortofotografía

Las variables a utilizarse en la ortofotografía corresponden a los índices espectrales de vegetación: *NDVI*, *SAVI15*, *SAVI5* Y *NDWI*. Además de realizar un ajuste de selección en la información de los índices procesados mediante el software *Qgis3.1*, se procedió a discriminar valores de la categoría Bosque del $NDVI \leq 0,01$ y se ejecutó el entrenamiento en un área aproximada de 8 hectáreas.

Tomando este grupo como variables predictoras el porcentaje global de categorizaciones correctas realizadas con el subconjunto de datos OOB (Porcentaje global de correctas) fue de 87,64 %. Un valor de gran importancia, considerando el uso de 345.002 píxeles para el entrenamiento del algoritmo. En el porcentaje de clasificaciones correctas de píxeles pertenecientes a las dos categorías: *Polylepis* (1) y No *Polylepis* (2); fue de 87,16 % y 88,46 %, respectivamente, de 188.508 y 113.861 píxeles asociados a cada una de las clases; el clasificador categorizó correctamente 203.366 de datos pertenecientes a *Polylepis* y 141.636 a No *Polylepis*.

Tabla 7. 7. Matriz de confusión primer entrenamiento en la Ortofotografía

Clase	Total, de píxeles	Porcentaje de correctas	Predicción – Clases	
			<i>Polylepis</i> N= 203.366	No <i>Polylepis</i> N= 141.636
(1) <i>Polylepis</i>	216.283	87,16 %	188.508	27.775
(2) No <i>Polylepis</i>	128.719	88,46 %	14.858	113.861
Total puntos (píxeles)	345.002			
Porcentaje promedio de correctas		87,81 %		
Porcentaje global de correctas		87,64 %		

Nota: Trabajo de campo (*Random Forest*, 2018)

Tomando en consideración la importancia de las variables predictoras de los índices espectrales de vegetación, se puede igualar la disminución en la precisión que ocurre cuando los valores numéricos de las variables son conmutados de posición.





Variable	Score	
SAVI15	100,00	
SAVI5	100,00	
NDVI	100,00	
NDWI	25,00	

Figura 7. 24. Importancia de las variables en términos de la disminución promedio en la precisión usando el subconjunto de datos OOB (primer entrenamiento)

Nota: Trabajo de campo (Random Forest, 2018)

Los índices o variables que se muestran en la Figura 7.16., brindan información para la categorización o predicción de la especie *Polylepis reticulata* Hieron, tomando en consideración que un porcentaje mínimo es el NDWI con una importancia relativa del 25%, debido a que evalúa las bandas del cercano infrarrojo y del verde para cuantificar la presencia de los cuerpos de agua. Además, los índices SAVI15, SAVI5, NDVI, contribuyen significativamente en la precisión de la categorización de *Polylepis*, con una importancia del 100 % para cada variable mencionada, debido al procesamiento de bandas espectrales roja e infrarroja en estudios de cobertura vegetal.

El reporte de datos obtenidos con los índices de vegetación y los resultados arrojados por Random Forest en el primer entrenamiento, muestra valores de la categoría *Polylepis* del $NDVI \leq 0,01$ que se representan a continuación:

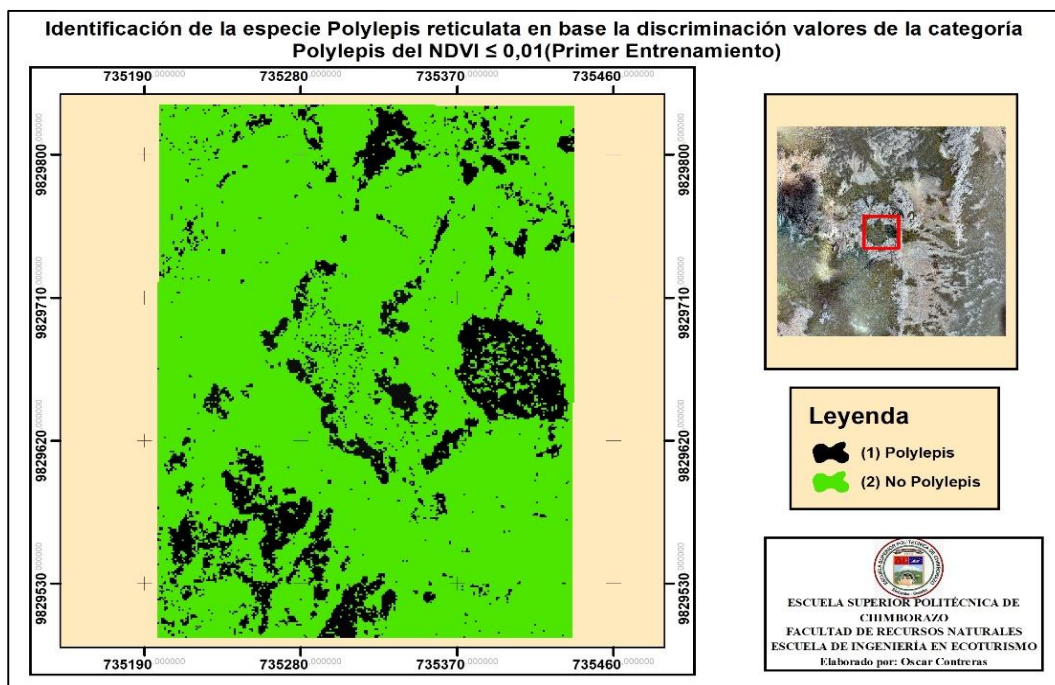


Figura 7. 25. Mapa de categorización en la identificación de la especie *Polylepis reticulata* Hieron en base a la discriminación de valores de la categoría Bosque del $NDVI \leq 0,01$ (Primer Entrenamiento).

Nota: Trabajo de campo (Random Forest, 2017)

En este entrenamiento se logra observar mediante la superposición de capas raster, un error de predicción en áreas que no corresponde a la especie *Polylepis reticulata* Hieron, por lo que se determinó no completar el entrenamiento de toda la cobertura de la ortofotografía.

Tabla 7. 8. Calculo de áreas a partir software ArcGis 10.5

Predictor	Área_m ²	Área_ ha
No Polylepis	69039,3	6,90
Polylepis	12358,5	1,24
Total Áreas	81397,8	8,14

Elaborado por: Oscar Contreras

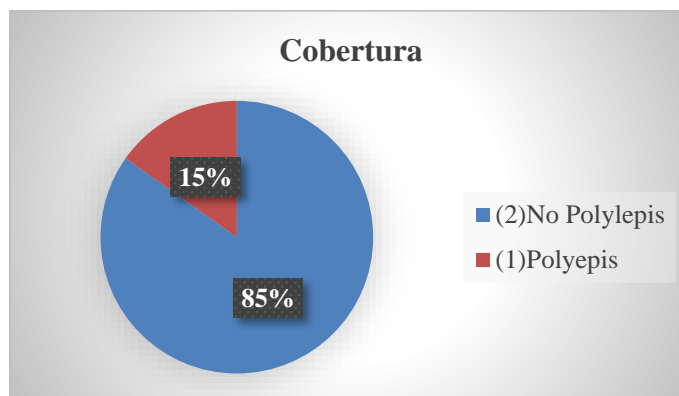


Figura 7. 26. Porcentaje de cobertura de *Polylepis reticulata* en las 8 hectáreas (primer entrenamiento)

Elaborado por: Oscar Contreras

Luego de realizar éste entrenamiento del total de la cobertura del área de estudio, se logró determinar que el 15 % pertenece a la especie *Polylepis* y el 85 % no pertenece a la especie *Polylepis*.

2. Aplicación del algoritmo de clasificación Random Forest segundo entrenamiento en la Ortofotografía

Las variables que se utilizaron en la ortofotografía, corresponden a los índices espectrales de vegetación: *NDVI*, *SAVI15*, *SAVI5* Y *NDWI*.

A más de ello se realizó un ajuste de selección en la información de los índices procesados mediante el software *Qgis3.1* y se discriminó los valores de la categoría Bosque del $NDVI \leq 0,04$ para ejecutar el entrenamiento en un área aproximada de 8 hectáreas.

Tomando este grupo como variables predictoras el porcentaje global de categorizaciones correctas realizadas con el subconjunto de datos OOB (Porcentaje global de correctas) fue de 86,41 %. El mismo que corresponde a un valor de gran importancia considerando el uso de 345.832 píxeles para el entrenamiento del algoritmo. En el porcentaje de clasificaciones correctas de píxeles pertenecientes a las dos categorías: *Polylepis* (1) y *No Polylepis* (2); fue de 85,18 % y 89,37 %, respectivamente, de 244.568 y 101.255 píxeles asociados a cada una de las clases; el clasificador categorizó correctamente 219080 datos pertenecientes a *Polylepis* y 126.743 *No Polylepis*.

Tabla 7. 9. Matriz de confusión segundo entrenamiento en la Ortofotografía

Clase	Total, de píxeles	Porcentaje de correctas	Predicción – Clases	
			Polylepis N= 203.366	No Polylepis N= 141.636
(1) Polylepis	244.568	85,18 %	208.318	36.250
(2) No Polylepis	101.225	89,37 %	10.762	90.493
Total puntos (píxeles)	345.823			
Porcentaje promedio de correctas		87,27 %		
Porcentaje global de correctas		86,41 %		

Nota: Trabajo de campo (Random Forest, 2018)

Tomando en consideración la importancia de las variables predictoras de los índices espectrales de vegetación, se puede igualar la disminución en la precisión que ocurre cuando los valores numéricos de las variables son conmutados de posición.

Variable	Score	
SAVI15	100,00	
SAVI5	100,00	
NDVI	100,00	
NDWI	17,56	

Figura 7. 27. Importancia de las variables en términos de la disminución promedio en la precisión usando el subconjunto de datos OOB (segundo entrenamiento)

Nota: Trabajo de campo (Random Forest, 2018)

Los índices o variables como muestran en la Figura 7.19., brindan información para la categorización u predicción de la especie *Polylepis reticulata* Hieron, un mínimo porcentaje el NDWI con una importancia relativa del 17,56 %, debido a que evalúa las bandas del cercano infrarrojo y del verde para cuantificar la presencia de los cuerpos de agua. Además, los índices SAVI15, SAVI5, NDVI contribuyen significativamente en la precisión de la categorización de Polylepis con una importancia del 100 % para cada variable mencionada, debido al procesamiento de bandas espectrales roja e infrarroja en estudios de cobertura vegetal.

El reporte de datos obtenidos con los índices de vegetación y los resultados arrojados por Random Forest en el primer entrenamiento, reflejaron valores de la categoría Polylepis de $NDVI \leq 0,04$ que se representan a continuación:

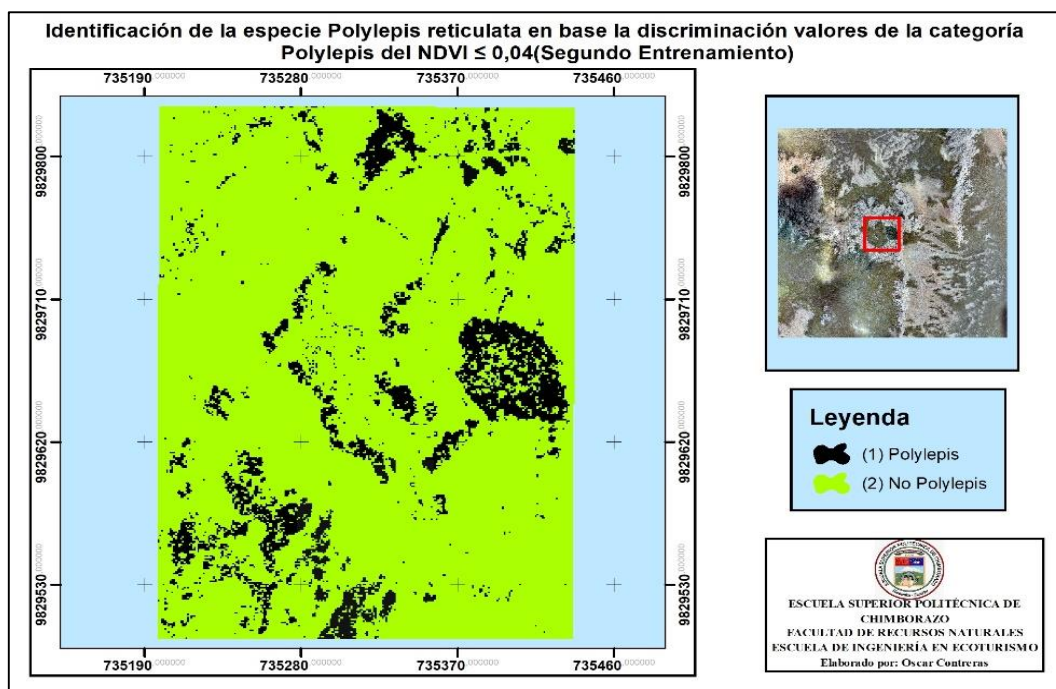


Figura 7. 28. Mapa de categorización en la identificación de la especie *Polylepis reticulata* Hieron en base la discriminación valores de la categoría Bosque del NDVI $\leq 0,04$ (Segundo Entrenamiento)
Nota: Trabajo de campo (Random Forest, 2017)

En este entrenamiento se observa mediante la superposición de capas raster un error de predicción en áreas que no corresponde a la especie *Polylepis reticulata* Hieron, por lo que se determinó no completar el entrenamiento de toda la cobertura de la ortofotografía.

Tabla 7. 10. Cálculo de áreas a partir software *ArcGis 10.5*

Predictor	Área_ m^2	Área_ ha
No <i>Polylepis</i>	71745,12	7,17
<i>Polylepis</i>	9606,82	0,96
Total		
Áreas	81351,94	8,14

Elaborado por: Oscar Contreras

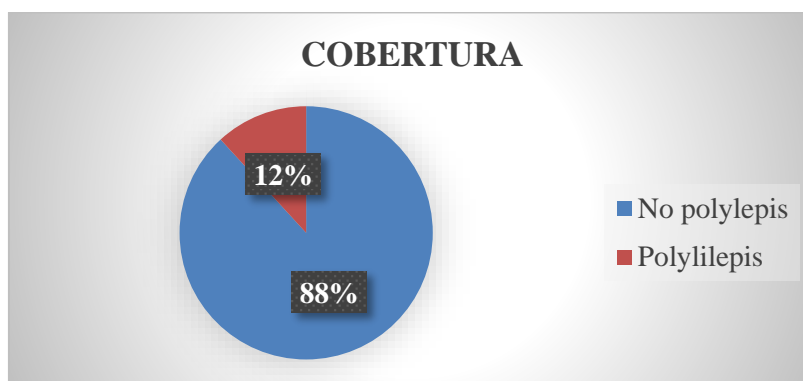


Figura 7. 29. Porcentaje de cobertura de *Polylepis reticulata* en las 8 hectáreas (segundo entrenamiento)

Elaborado por: Oscar Contreras

Las áreas calculadas posterior al entrenamiento del total de cobertura en estudio estima que el 12 % pertenece a la especie de *Polylepis* y el 85 % no pertenece a la especie *Polylepis*.

3. Aplicación del algoritmo de clasificación Random Forest tercer entrenamiento en la Ortofotografía

Las variables que se utilizaron en la ortofotografía corresponden a los índices espectrales de vegetación: *NDVI*, *SAVI15*, *SAVI5* y *NDWI*. Tomando este grupo como variables predictoras, el porcentaje global de categorizaciones correctas realizadas con el subconjunto de datos OOB (Porcentaje global de correctas) fue de 89.96 %. Un valor de gran importancia considerando el uso de 344.560 píxeles para el entrenamiento del algoritmo.

En el porcentaje de clasificaciones correctas de píxeles pertenecientes a las dos categorías: Bosque (1) y No Bosque (2); fue de 90,44% y 89,28%, respectivamente, de 198.711 y 145.849 píxeles asociados a cada una de las clases; el clasificador categorizó correctamente 195.361 datos pertenecientes a *Polylepis* y 149.199 No *Polylepis*.

Tabla 7. 11. Matriz de confusión entrenamiento Ortofotografía

Clase	Total, de píxeles	Porcentaje de correctas	Predicción – Clases	
			Bosque N= 195.361	No Bosque N= 149.199
(1) Bosque	198.711	90,44 %	178.422	20.289
(2) No Bosque	145.849	89,28 %	14.973	130.876
Total puntos (píxeles)	344.560			
Porcentaje promedio de correctas		89,86 %		
Porcentaje global de correctas		89.96 %		

Nota: Trabajo de campo (Random Forest, 2018)

De acuerdo a la importancia de las variables predictoras de los índices espectrales de vegetación, se puede identificar la disminución en la precisión que ocurre cuando los valores numéricos de las variables son conmutados de posición.

Variable	Score	
SAVI15	100,00	
SAVI5	100,00	
NDVI	100,00	
NDWI	6,25	

Figura 7. 30. Importancia de las variables en términos de la disminución promedio en la precisión usando el subconjunto de datos OOB (tercer entrenamiento)

Nota: Trabajo de campo (Random Forest, 2018)

Los índices o variables como se muestran en la Figura 7.22., brindan información para la categorización o predicción de la especie *Polylepis reticulata* Hieron, mostrando los siguientes resultados: un mínimo porcentaje el NDWI con una importancia relativa del 6,25 %, debido a que evalúa las bandas del cercano infrarrojo y del verde para cuantificar la presencia de los cuerpos de agua. Además, los índices SAVI15, SAVI5, NDVI contribuyen significativamente a la precisión de la categorización de *Polylepis* con una

importancia del 100 % para cada variable mencionada debido al procesamiento de bandas espectrales roja e infrarroja en estudios de cobertura vegetal.

El reporte de datos obtenidos con los índices de vegetación como variables predictoras y los resultados arrojados por Random Forest en el primer entrenamiento muestran valores de la categoría Polylepis del $NDVI \leq 0,07$ que se representan a continuación:

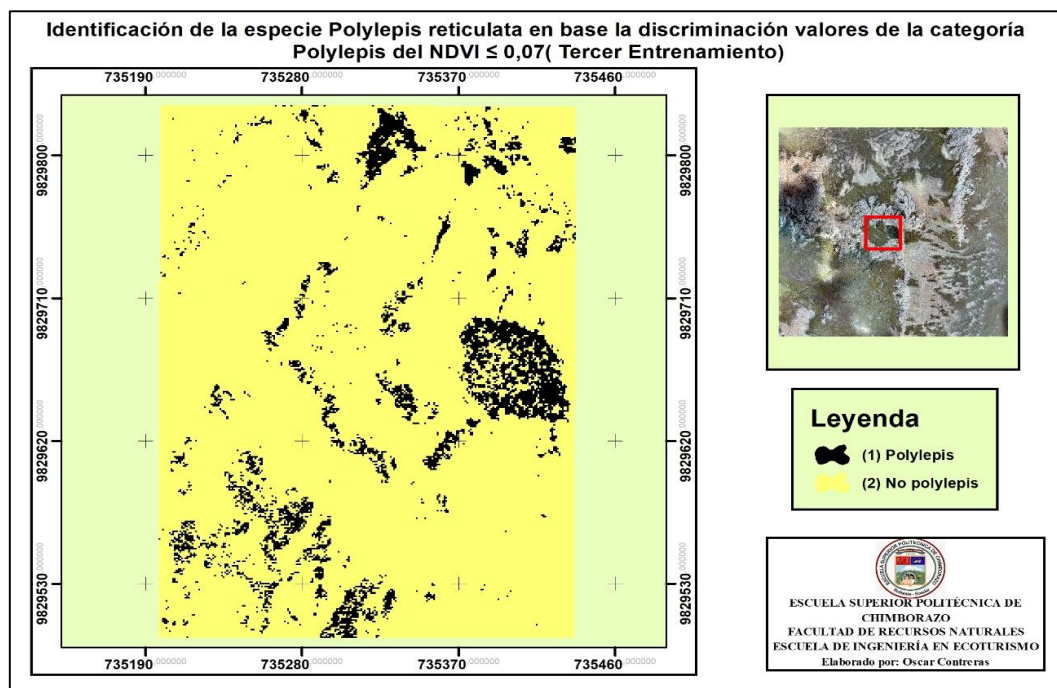


Figura 7. 31. Mapa de categorización en la identificación de la especie *Polylepis reticulata* Hieron en base a la discriminación de valores de la categoría Bosque del $NDVI \leq 0,07$ (Tercer Entrenamiento)
Elaborado por: Oscar Contreras

En este entrenamiento se observa mediante la superposición de capas raster la predicción en áreas más acertadas, lo que permite realizar el entrenamiento en toda la cobertura de la ortofotografía y por ende determinar la distribución de la especie *Polylepis reticulata* Hieron.

Tabla 7. 12. Cálculo de áreas a partir del software *ArcGis 10.5*

Predictor	Área_ m^2	Área_ ha
No Polylepis	74238,81	7,42
Polylepis	7124,49	0,71
Total Áreas	81363,40	8,14

Elaborado por: Oscar Contreras

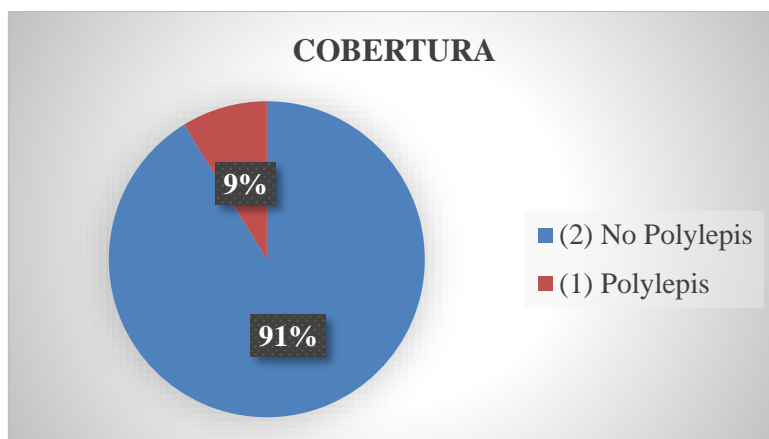


Figura 7. 32. Porcentaje de cobertura de *Polylepsis reticulata* Hieron en 8 hectáreas (tercer entrenamiento)

Elaborado por: Oscar Contreras

Las áreas calculadas posterior al entrenamiento del total de cobertura en estudio, estima que el 9 % es Polylepsis y el 91 % No Polylepsis.

4. Aplicación del algoritmo de clasificación Random Forest cuarto entrenamiento en la imagen satelital Sentinel usando índices espectrales calculados en Qgis

Las variables a utilizarse en la imagen satelital corresponden a los índices espectrales de vegetación: *NDVI*, *SAVI15*, *SAVI5* y *NDWI*. Considerando a este grupo como variables predictoras del porcentaje global de categorizaciones correctas realizadas.

A partir de ello el subconjunto de datos OOB (Porcentaje global de correctas) fue de 91,10 %. Un valor de gran importancia considerando el uso de 10.533 píxeles para el entrenamiento del algoritmo.

En el porcentaje de clasificaciones correctas de píxeles pertenecientes a las dos categorías: Bosque (1) y No Bosque (2); fue de 60,00% y 91,31%, respectivamente, de 70 y 10.463 píxeles asociados a cada una de las clases; y por último el clasificador categorizó correctamente 951 datos pertenecientes a Polylepsis y 9.582 No Polylepsis.

Tabla 7. 13. Matriz de confusión entrenamiento Sentinel 2A, índices *Qgis*

Clase	Total, de píxeles	Porcentaje de correctas	Predicción – Clases	
			Bosque N= 951	No Bosque N= 9.582
(1) Bosque	70	60,00 %	42	28
(2) No Bosque	10.463	91,31 %	909	9.554
Total puntos (píxeles)	10.533			
Porcentaje promedio de correctas		95,66 %		
Porcentaje global de correctas		91,10 %		

Nota: Trabajo de campo (Random Forest, 2018)

De acuerdo a la importancia de las variables predictoras de los índices espectrales de vegetación, se puede identificar una disminución en la precisión cuando los valores numéricos de las variables son conmutados de posición.

Variable	Score	
NDWI	100,00	
SAVI15	25,61	
NDVI	25,03	
SAVI5	12,22	

Figura 7. 33. Importancia de las variables en términos de la disminución promedio en la precisión usando el subconjunto de datos OOB (índices *Qgis*)

Nota: Trabajo de campo (Random Forest, 2018)

Los índices o variables como se muestran en la Figura 7.25., brindan información para la categorización o predicción de la especie *Polylepis reticulata* Hieron, reflejando el máximo porcentaje del NDWI con una importancia relativa del 100 %. Posterior a ello se evalúa las bandas de color verde, y el infrarrojo cercano cuantifica la presencia de los cuerpos de agua.

Los índices calculados a partir de las bandas espectrales roja e infrarroja cercana SAVI15 muestran una importancia de 25,61%; el NDVI refleja una importancia de 25,06 %, mientras que el SAVI5 tan sólo muestra una importancia de 12,22%, por lo que éstos no contribuyen significativamente en la precisión de categorización de *Polylepis*.

A partir del reporte de los datos obtenidos con los índices de vegetación y de los resultados arrojados por el Random Forest en un área de 8.261 hectáreas, se puede evidenciar la efectividad de la identificación en el entrenamiento, que se presenta a continuación:

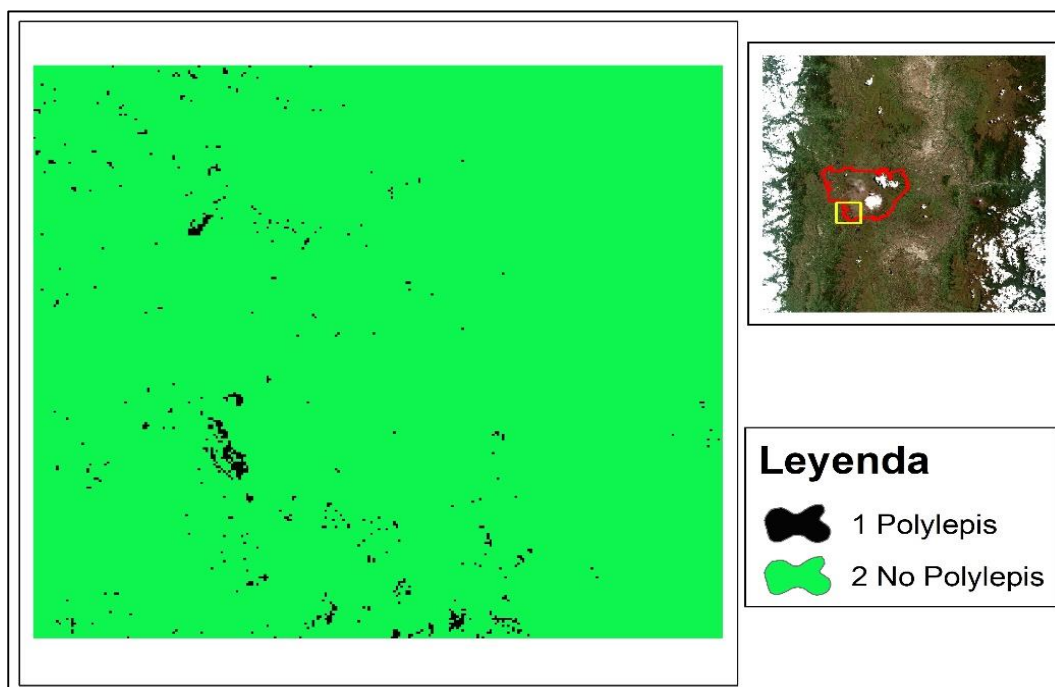


Figura 7. 34. Mapa de categorización en la identificación de la especie *Polylepis reticulata* Hieron

Nota: Trabajo de campo (Random Forest, 2018)

5. Aplicación del algoritmo de clasificación Random Forest, quinto entrenamiento en la imagen satelital Sentinel con índices espectrales calculados en SNAP

Las variables a utilizarse en la imagen satelital corresponden a los índices espectrales de vegetación: *NDVI*, *SAVI15*, *SAVI5* y *NDWI*. Considerando a éste grupo como variables predictoras el porcentaje global de categorizaciones correctas.

A partir de ello el subconjunto de datos OOB (Porcentaje global de correctas) fue de 93,43 %, lo que refleja un valor de gran importancia considerando el uso de 10.533 píxeles para el entrenamiento del algoritmo.

En el porcentaje de clasificaciones correctas de píxeles pertenecientes a las dos categorías: Bosque (1) y No Bosque (2); fue de 67,14 % y 93,61 %, respectivamente, de 70 y 10.463 píxeles asociados a cada una de las clases, por último, el clasificador categorizó correctamente 716 datos pertenecientes a *Polylepis* y 9.817 No *Polylepis*.

Tabla 7. 14. Matriz de confusión, entrenamiento Sentinel 2A, índices SNAP

Clase	Total, de píxeles	Porcentaje de correctas	Predicción – Clases	
			Bosque N= 716	No Bosque N= 9.817
(1) Bosque	70	67,14 %	47	23
(2) No Bosque	10.463	93,61 %	669	9.794
Total puntos (píxeles)	10.533			
Porcentaje promedio de correctas		80,37 %		
Porcentaje global de correctas		93,43 %		

Nota: Trabajo de campo (Random Forest, 2018)

De acuerdo a la importancia de las variables y de los índices espectrales de vegetación, se puede identificar la disminución en la precisión, puesto que los valores numéricos de las variables son conmutados de posición.





Variable	Score	
NDVI	100,00	
SAVI5	87,30	
SAVI15	43,16	
NDWI	23,06	

Figura 7. 35. Importancia de las variables en términos de la disminución promedio en la precisión usando el subconjunto de datos OOB (Índices SNAP)

Nota: Trabajo de campo (Random Forest, 2018)

Los índices o variables como se muestran en la Figura 7.27., brindan información para la categorización o predicción de la especie *Polylepis reticulata* Hieron, reflejando un mínimo porcentaje del NDWI con una importancia relativa del 23,06 %. Posterior a ello se evalúa las bandas de color verde y el infrarrojo cercano cuantifica la presencia de los cuerpos de agua.

Los índices calculados a partir de las bandas espectrales roja e infrarroja cercana SAVI15 muestra una importancia de 43,16 %; SAVI5 una importancia de 87,30 %, mientras que el NDVI presenta una

categorización máxima de 100 %, los cuales no contribuyen significativamente en la precisión de la categorización de *Polylepis*.

A partir del reporte de datos obtenidos con los índices de vegetación y de los resultados arrojados por Random Forest en un área de 8.261 hectáreas, se puede observar la efectividad de la identificación en el entrenamiento que se presenta a continuación:

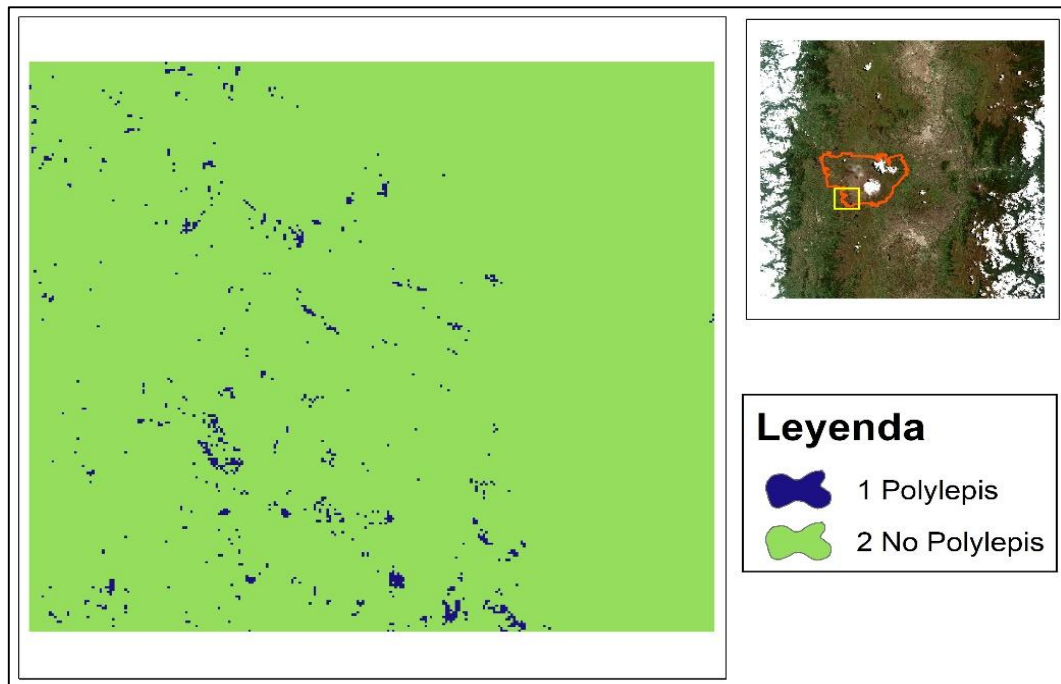


Figura 7. 36. Mapa de categorización en la identificación de la especie *Polylepis reticulata* Hieron índices *SNAP*.

Nota: Trabajo de campo (Random Forest, 2018)

C. EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN DE LOS CLASIFICADORES EN LA IDENTIFICACIÓN DE *Polylepis reticulata* Hieron

Para realizar la evaluación de la precisión de Los clasificadores, se realizó diversos procesos en los softwares (*ArcMap*, *ENVI*, *RF*), que permitieron la identificación de la especie *Polylepis reticulata* Hieron mostrando resultados raster y vectorial.

1. Clasificación supervisada para la identificación de *Polylepis* mediante ArcGis 10.5

La clasificación supervisada *ArcMap 10.5* muestra temáticamente en datos raster la identificación de áreas con vegetación de *Polylepis*.

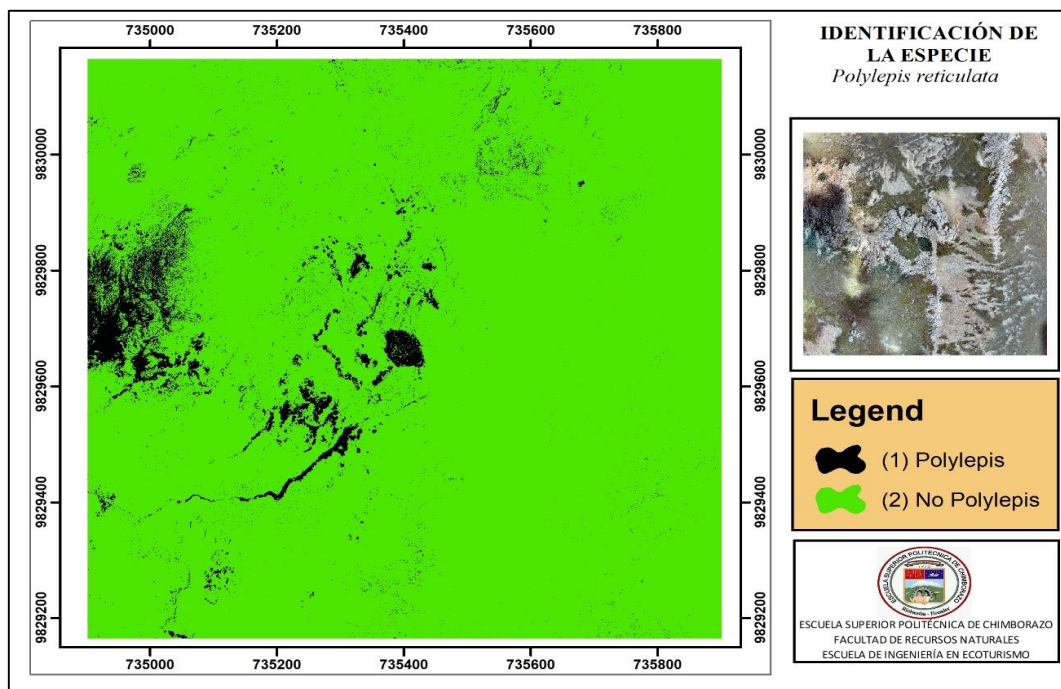


Figura 7. 37. IDENTIFICACIÓN DE LA ESPECIE *Polylepis reticulata* Hieron APLICANDO *ArcMap 10.5*

Elaborado por: Oscar Contreras

Para poder observar la efectividad de la identificación en la misma ortofotografía se seleccionó las áreas que visiblemente mostraban vegetación de *Polylepis* y posterior a ello, se realizó una evaluación visual (Zoom) que permita la representación en mapas temáticos:

En segunda instancia tomando como referencia las mismas coordenadas geográficas y el incremento de la escala, se logró determinar así una falencia en la identificación.

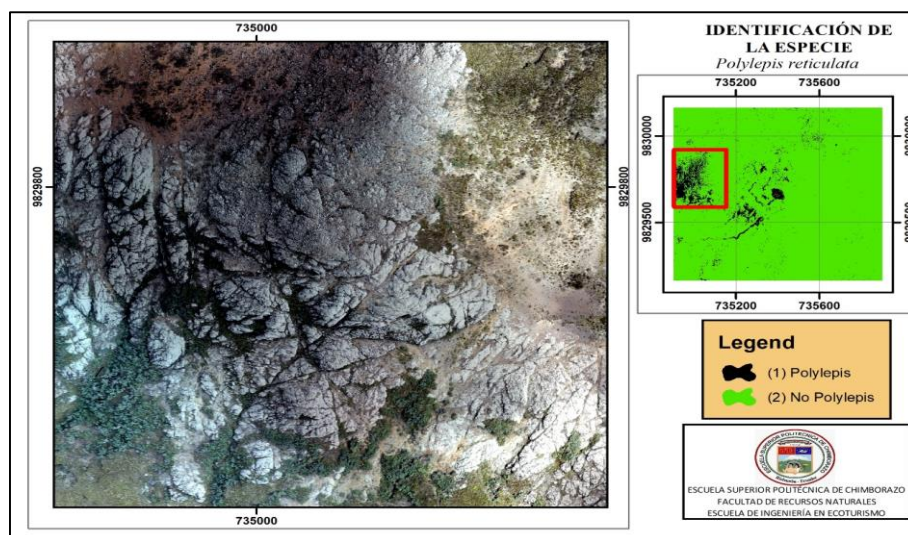


Figura 7. 38. Zoom de la Primera Área Interés *ArcMap 10.5*
Elaborado por: Oscar Contreras

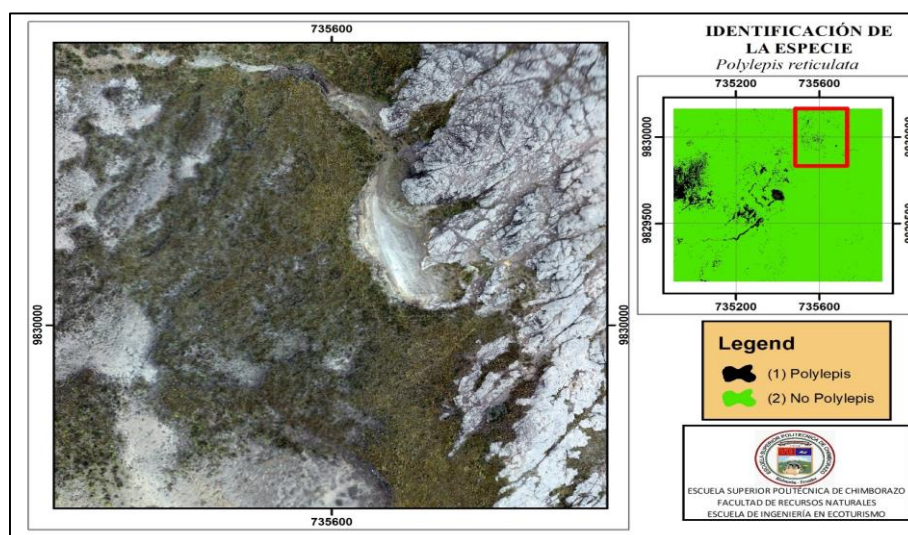


Figura 7. 39. Zoom de la Segunda Área Interés *ArcMap 10.5*
Elaborado por: Oscar Contreras

En la Figura 7.30 y Figura 7.31 se representan capas de datos identificados como *Polylepis*, denotando un error a través del uso del zoom a las áreas de interés. De igual manera es posible evidenciar falencias en la identificación mediante la clasificación supervisada, mientras que los datos vectoriales reflejan la siguiente información:

Tabla 7. 15. Extracción de datos cartográficos *ArcMap 10.5*

Clasificación supervisada ArcGis 10.5	Área (m^2)	Área (ha)
(2) No <i>Polylepis</i>	953229,23	95,32
(1) <i>Polylepis</i>	46868,17	4,68
Total de Cobertura	1000097	100

Elaborado por: Oscar Contreras

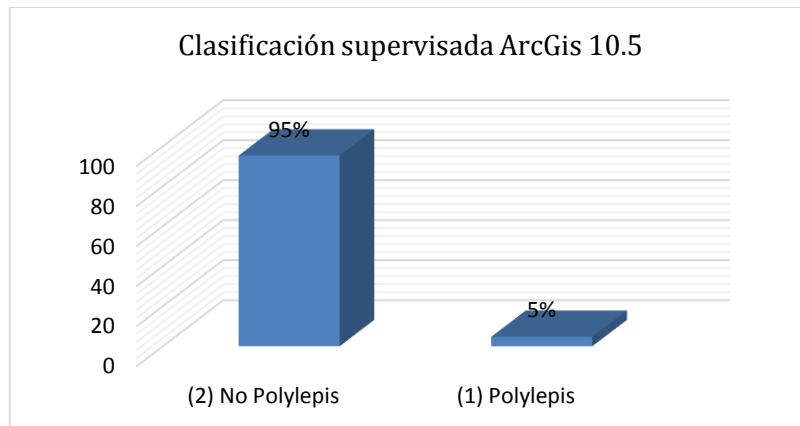


Figura 7. 40. Porcentaje de cobertura de *Polylepis reticulata* Hieron ArcMap 10.5
Elaborado por: Oscar Contreras

La clasificación supervisada y la conversión de raster a polígonos presenta dos categorías de clasificación: con 110.052 polígonos de (1) que pertenecen a la especie *Polylepis* y 33840 que pertenece a la categoría (2) No *Polylepis*.

2. Clasificación supervisada para la identificación de *Polylepis* mediante ENVI 5.1

La clasificación supervisada *ENVI 5.1* muestra temáticamente en datos raster una identificación en áreas con vegetación de *Polylepis*.

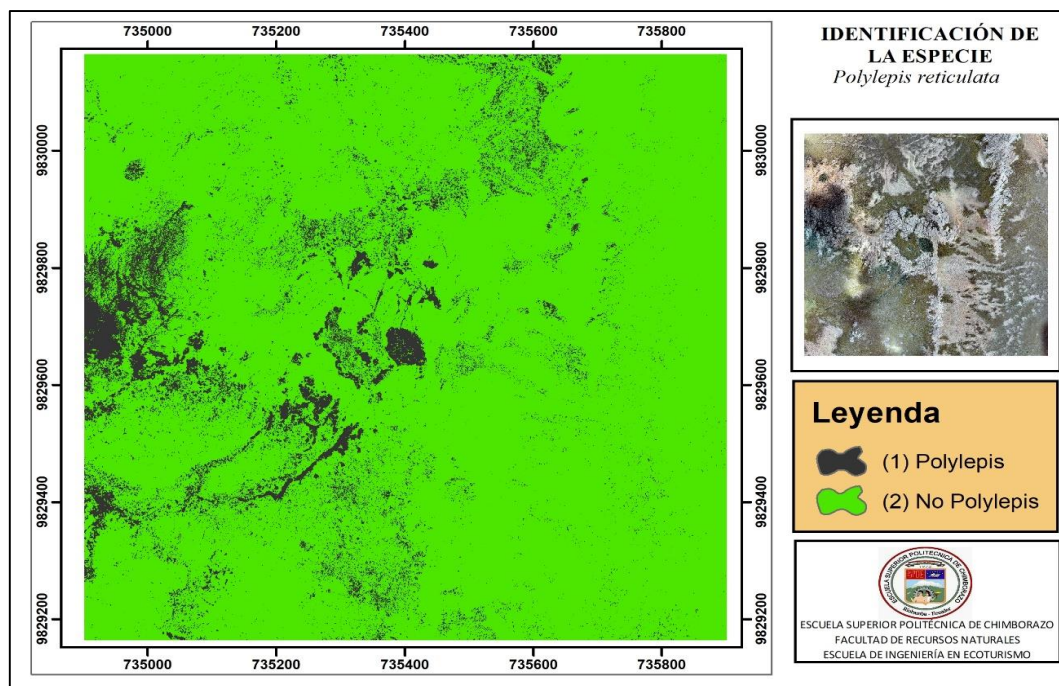


Figura 7. 41. IDENTIFICACIÓN DE LA ESPECIE *Polylepis reticulata* APLICANDO *ENVI 5.1*
Elaborado por: Oscar Contreras

Para poder observar la efectividad de la identificación en la ortofotografía, en primer lugar, se selecciona las áreas visibles con *Polylepis* y se hace una evaluación visual (Zoom) en la ortofotografía, que posteriormente nos permitirá realizar su representación en mapas temáticos:

En segunda instancia, tomando como referencia las mismas coordenadas geográficas y el incremento de la escala, se logró determinar una falencia en la identificación.

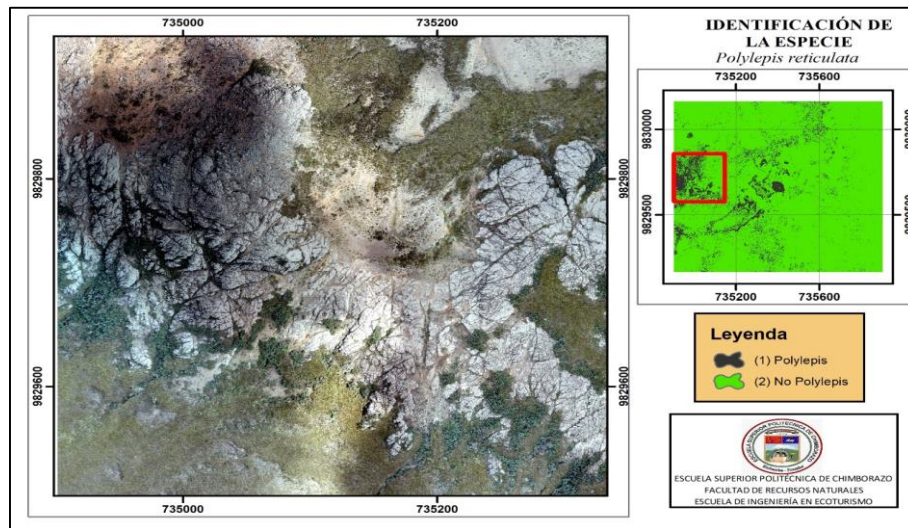


Figura 7. 42. Zoom de la Primera Área Interés ENVI 5.1
Elaborado por: Oscar Contreras

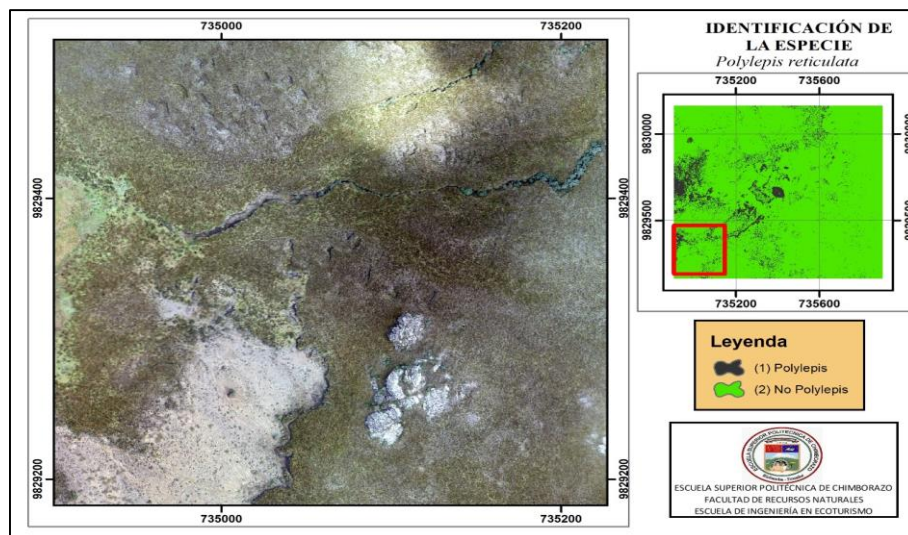


Figura 43. Zoom de la Segunda Área Interés ENVI 5.1
Elaborado por: Oscar Contreras

En la Figura 7.34 y Figura 7.35 que representan capas de datos identificados como Polylepsis, se logró identificar un error, a través del uso de zoom a las áreas de interés. De igual manera es posible evidenciar falencias en la identificación, mientras que los datos vectoriales reflejan la siguiente información:

Tabla 7. 16. Extracción de datos cartográficos ENVI

Clasificación supervisada ENVI 5.1	Área m2	Área ha
(2) No Polylepsis	911171,69	91,12
(1) Polylepsis	88925,71	8,89
Total	1000097,40	100

Elaborado por: Oscar Contreras

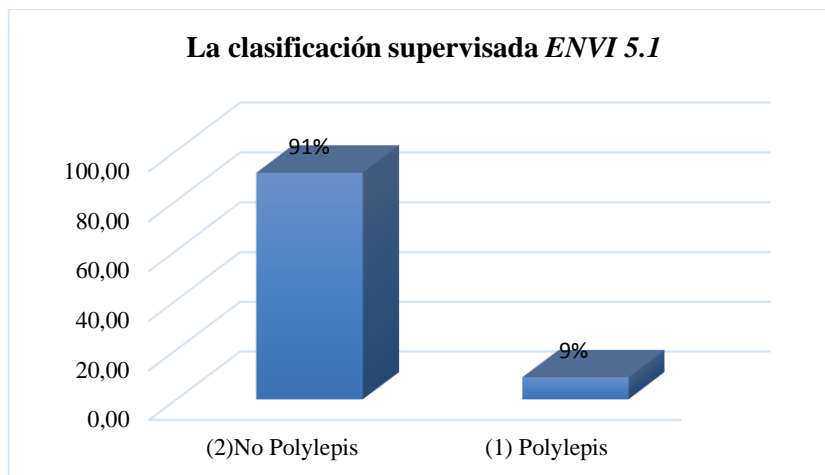


Figura 7. 44. Porcentaje de cobertura de *Polylepis reticulata* Hieron ENVI 5.1
Elaborado por: Oscar Contreras

La clasificación supervisada y la conversión de raster a polígonos presentan dos categorías de clasificación: 29.496 polígonos que pertenecen a la categoría (1) *Polylepis* y 3.580 polígonos que pertenecen a la categoría (2) No *Polylepis*.

3. Identificación Algoritmo Random Forest

Finalmente, se realizó la aplicación del Algoritmo RF con la información del *Grove* del tercer entrenamiento, tomando en consideración una discriminación de NDVI > 0,07 de la categoría (1) *Polylepis* en toda el área que cubre las 100 hectáreas. Posteriormente la Ortofotografía permitió la identificación de la especie *Polylepis reticulata* en las zonas alto andinas del Ecuador con mayor precisión y a una resolución del pixel a 1 metro (X,Y).

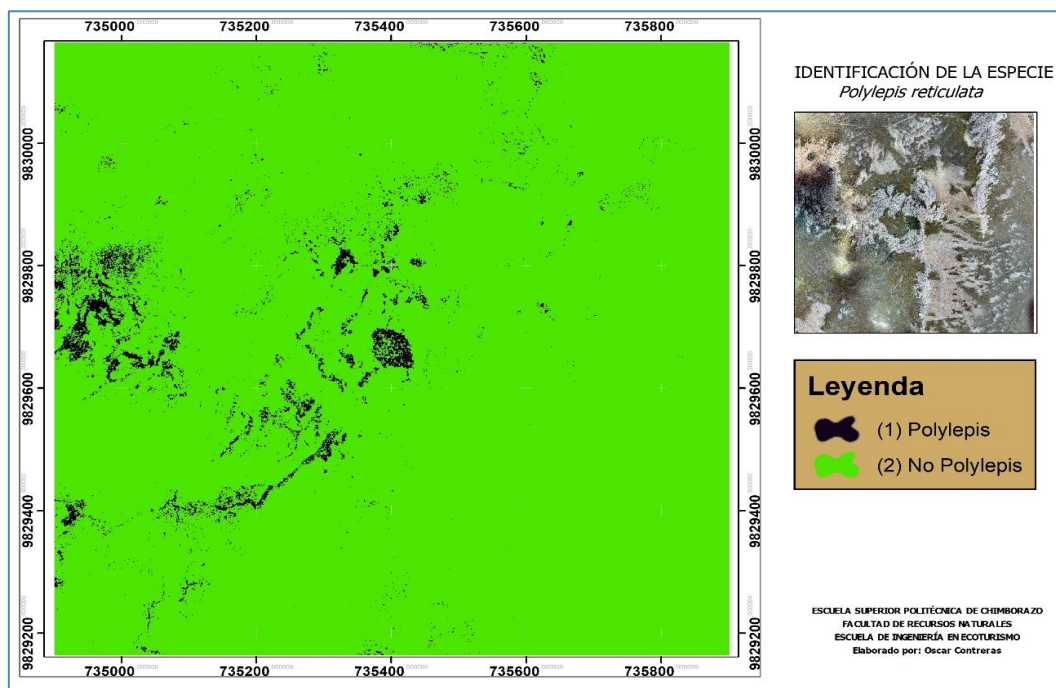


Figura 7. 45. IDENTIFICACIÓN DE LA ESPECIE *Polylepis reticulata* Hieron APLICANDO ALGORITMO RF
Elaborado por: Oscar Contreras

Para poder determinar la efectividad de la identificación, en la ortofotografía se seleccionó las áreas visibles con *Polylepis* y se hizo una evaluación visual (Zoom), que posteriormente nos permitirá realizar su representación en mapas temáticos:

En segunda instancia, tomando como referencia las mismas coordenadas geográficas y el incremento de la escala se logró determinar una falencia en la identificación.

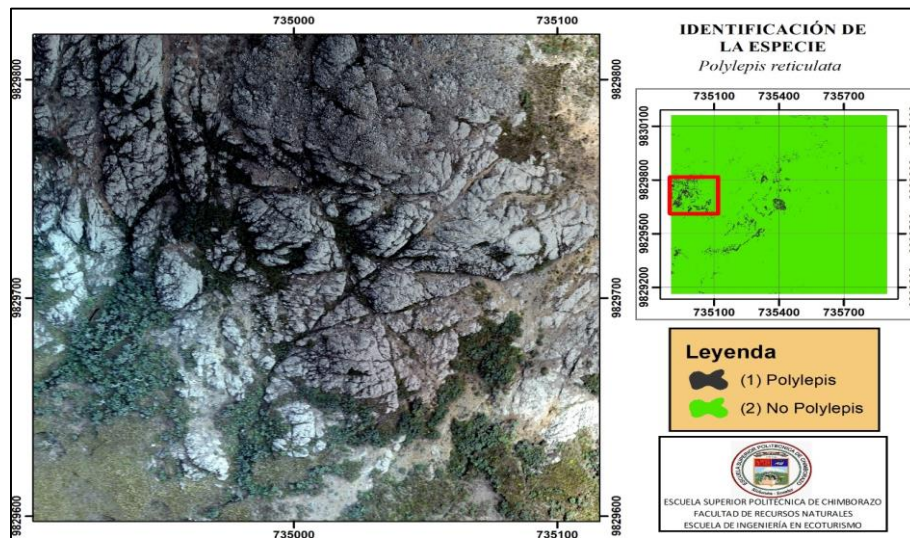


Figura 7. 46. . Zoom de la Primera Área Interés RF
Elaborado por: Oscar Contreras

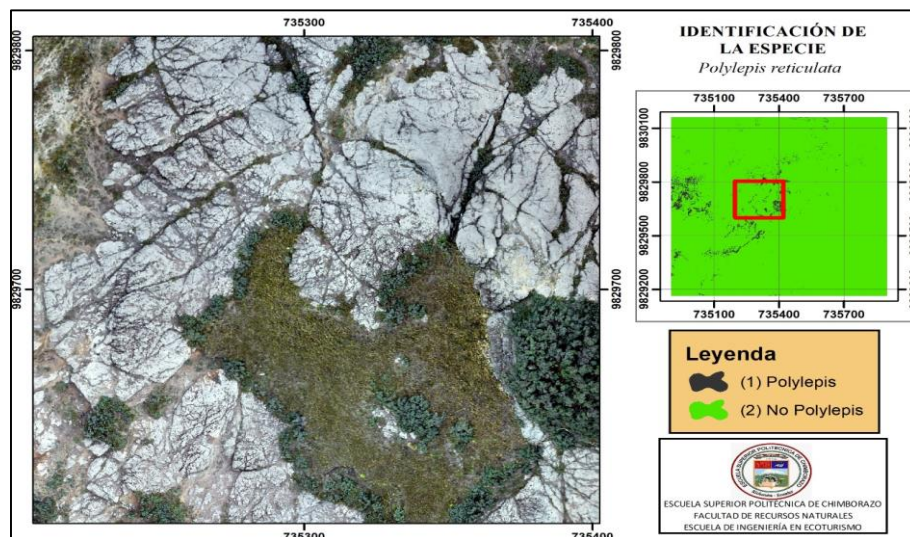


Figura 7. 47. Zoom de la Segunda Área Interés RF
Elaborado por: Oscar Contreras

En la Figura 7.38 y Figura 7.39 que representan capas de datos identificados como *Polylepis*, se logró una identificación idónea de la cobertura vegetal a través del uso del zoom en las áreas de interés, puesto que se mostró una identificación más verdadera mediante el algoritmo RF, mientras que los datos vectoriales reflejan la siguiente información:

Tabla 7. 17. Identificación de especie *Polylepis reticulata* Hieron aplicando RF

Predictor	Área m ²	Área ha
(2) No Polylepis	999125,76	99,913
(1) Polylepis	23703,18	2,37
Total	1022828,94	102,28

Elaborado por: Oscar Contreras

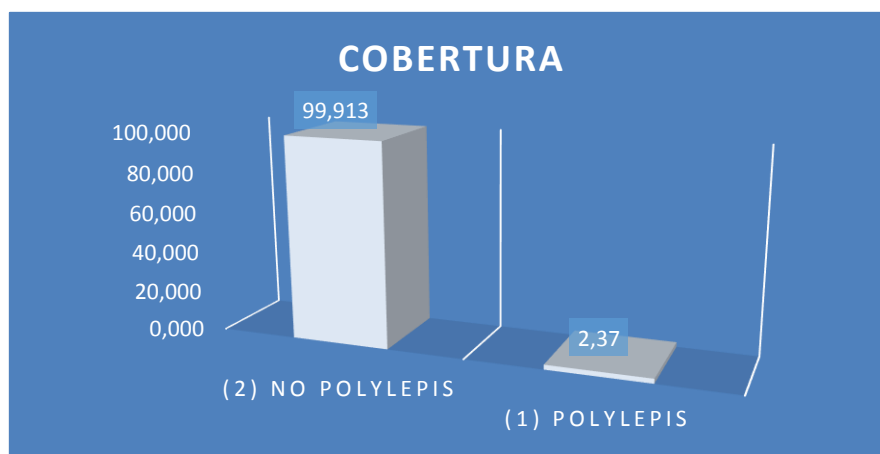


Figura 7. 48. Porcentaje de cobertura de *Polylepis reticulata* Hieron RF
Elaborado por: Oscar Contreras

Las áreas calculadas posterior al entrenamiento del total de cobertura en estudio estima que el 2 % pertenece a la especie de *Polylepis* y el 98 % no pertenece a la especie. En cuanto a la conversión de raster a polígonos que presentan dos categorías de clasificación se obtuvo: 5.046 polígonos son de la categoría (1) *Polylepis*, mientras que 894 son parte de la categoría polígonos de (2) No *Polylepis*.

4. Comparación de información de datos vectoriales (Polígonos)

La comparación de extensiones a partir de la información vectorial extraída, refleja una mayor cobertura de *Polylepis* con el clasificador *ENVI 5.1*, pero a pesar de ello la imagen multispectral muestra que la identificación ocupa espacios que no corresponden a la especie en estudio.

A diferencia de ello, *RF* aporta información más cercana a la realidad, puesto que, de acuerdo a la cantidad de datos tomados para la clasificación, evalúa de mejor manera las variables de índices espectrales de vegetación.

Tabla 7. 18. Ficha de comparación porcentual de extensiones

Clasificador	(2) No Polylepis		(1) Polylepis	
	Área Total (m ²)	% de cobertura	Área Total (m ²)	% de cobertura
<i>ArcGis</i>	953229,23	95,32 %	46868,17	4,68 %
<i>ENVI</i>	911171,69	91,11 %	88925,71	8,89 %
<i>RF</i>	999125,76	97,68 %	23703,18	2,32 %

Elaborado por: Oscar Contreras

El método de clasificación RF, a través de la asignación de valores tienen una mayor aceptabilidad en la identificación, puesto que ocupa la comparación de diversos índices espectrales de vegetación (Jin, Sung, Lee, Biging, & Jeong, 2016) usando un sinnúmero de píxeles como evaluación de variables de importancia limitándose a realizar una evaluación de los datos e información estrictamente de cada píxel obtenido ejecutando una identificación cercana a la realidad de la especie *Polylepis reticulata* Hieron en estudio.

Comprobación metodológica de la Hipótesis

1. Formular las Hipótesis

Ho: El clasificador Random Forest tiene una baja identificación de la distribución de especie *Polylepis reticulata* Hieron en las zonas alto andinas del Ecuador.

Ho: $p_1 = p_2$

Ha: El clasificador Random Forest tiene una alta identificación de la distribución de la especie *Polylepis reticulata* Hieron en las zonas alto andinas del Ecuador

Ha: $p_1 > p_2$

2. Seleccionar el nivel de significación

$\alpha = 5\% = 0,05$

3. Determinar la técnica y la prueba estadística

Se utilizó el software Salford Predictive Model v8.2 64 bit y los estadísticos de prueba Chi – cuadrado y Distribución de diferencia de proporciones.

4. Determinar los valores críticos y sus regiones de rechazo

Para un nivel de significación del 5% de dódima unilateral derecha: $Z_s = 1,64$

5. Aplica el estadístico

Determinar el Estadístico de prueba chi – cuadrado y diferencia de proporciones

Entrenamientos	1	2	3	4	5
Grupo 1	$1,16 \times 10^9$	$9,75 \times 10^8$	$1,23 \times 10^9$	9880,52	722,43
Grupo 2	$1,17 \times 10^9$	$9,73 \times 10^8$	$1,23 \times 10^9$	9880,52	722,43

Distribución de diferencia de proporciones

Entrenamientos	1	2	3	4	5
Z	0,76	0,75	0,80	0,54	0,60

6. Decisión

Al nivel del 5% de significancia con el estadístico de prueba chi – cuadrado, se rechaza la hipótesis nula por ser menor a 0,05, puesto que el valor de χ^2 teórico es 9,49 y se acepta la hipótesis alternativa; es decir, el clasificador Random Forest tiene una alta identificación de la distribución de la especie *Polylepis reticulata* Hieron en las zonas alto andinas del Ecuador

Al nivel del 5% de significancia con el estadístico de prueba distribución de diferencia de proporciones, se rechaza la hipótesis nula por ser menor a 0,05, puesto que el valor de z teórico es de 0,02 y se acepta la hipótesis alternativa; es decir, el clasificador Random Forest tiene una alta identificación de la distribución de la especie *Polylepis reticulata* Hieron en las zonas alto andinas del Ecuador.

VIII. CONCLUSIONES

El cálculo de los índices espectrales de vegetación en 40.865 píxeles del Bosque de *Polylepis* en la ortofotografía a una resolución de 0,0938 metros, refleja promedios del NDVI= 0,11; SAVI5= 0,16; SAVI15=0,12; NDWI= -0,08; teniendo una gran aceptación para ser considerado variables de importancia en la identificación de la especie *Polylepis reticulata* Hieron al poseer número adecuado de datos para la selección de uso del suelo.

La identificación de la especie *Polylepis reticulata* Hieron mediante el uso del algoritmo *RF* y los índices espectrales como variables en un área de 8 hectáreas refleja un promedio del 100% de importancia en los índices SAVI15, SAVI5 y NDVI durante los tres entrenamientos, mientras que el NDWI varía su importancia con un promedio de 16,27 % esto debido a ser zonas con poca humedad como muestra la ortofotografía usando los datos como base fundamental en la identificación.

El uso de clasificadores para la categorización de uso de suelo aplicados en 100 hectáreas de la ortofotografía muestra visualmente una alta identificación mediante el algoritmo *RF*, el cual refleja una cobertura de la clase (1) POLYLEPIS = 2,32 % y la clase (2) NO POLYLEPIS = 97,68 % debido a las variables de importancia que son evaluados para realizar la clasificación.

IX. RECOMENDACIONES

Se recomienda disponer un Drones (UAVs) en la Facultad de Recursos Naturales para realizar estudios aplicados a la teledetección, donde docentes y estudiantes puedan utilizar estos equipos para evaluar áreas pequeñas en la obtención de datos del territorio a una mejor resolución, a su vez aplicando el uso de índices espectrales de vegetación conocer las ventajas que aportan en la identificación de determinados elementos de interés sobre el suelo.

Fortalecer el uso de nuevas herramientas metodológicas y prácticas, así como nuevos softwares que ofrece los mercados gratuitos y licenciados que permita extraer la información multiespectral de ortofotografía e imágenes satelitales, que determinen índices espectrales, características geográficas, tipológicas y topográficas del territorio sin condicionar la capacidad de manipulación y manejo de información.

Fomentar el uso de clasificadores para estudios dentro la Facultad en este caso la aplicación del algoritmo RF ampliando su uso, profundizando en los resultados puesto que sería de mucha utilidad en estudios de restauración o protección ambiental, esencialmente aquellos ecosistemas frágiles que restringen el ingreso físico de investigadores sea por su dificultad o políticas de conservación.

X. RESUMEN

La presente investigación propone: Identificar la especie *Polylepis reticulata* mediante la teledetección en las zonas alto andinas del Ecuador, a través de procesamiento de una ortofotografía con una resolución de 0,0938 metros e imágenes satelitales Sentinel 2 A con resolución de 10 metros; donde se realizó tres entrenamientos en la ortofotografía con discriminaciones del $NDVI \leq 0,01$; $NDVI \leq 0,04$; $NDVI \leq 0,07$ y dos entrenamientos en las escenas Sentinel 2A del algoritmo Random Forest. Este proceso se desarrolló mediante el cálculo de los índices espectrales de vegetación, generando un modelo predictorio de categorización por medio de árboles de decisión; los resultados muestran que los factores relevantes en la categorización para cada entrenamiento son: en los tres entrenamientos de la ortofotografía las variables de NDVI, SAVI5, SAVI15, tienen un nivel de importancia igual a 100%, mientras que en la imagen satelital al no poseer áreas de gran tamaño o consideradas de importancia no se efectuó una identificación adecuada de la especie en estudio, del mismo modo se realizó una comparación en la efectividad de identificación de *Polylepis* en 100 hectáreas mediante tres softwares: ArcGis, Envi, RF, se ejecutó la clasificación supervisada que permitió identificar áreas de cobertura de *Polylepis*, en el primer software se identifica 4,68% (1) *Polylepis* y 95,32 % (2) No *Polylepis*, en el segundo software identifica 8,89% (1) *Polylepis* y 91,11% (2) No *Polylepis*, finalmente, en el tercer software identifica 2,32 % (1) *Polylepis* y 97,68% (2) No *Polylepis* mostrando en los información raster una mejor identificación con el software RF y determinando la especie con mayor precisión.

Palabras clave: TELEDETECCIÓN - ÍNDICES ESPECTRALES - RANDOM FOREST - POLYLEPIS - VEGETACIÓN ALTO ANDINAS

Por: Oscar Contreras



XI. ABSTRACT

The present research proposes: to identify the species *Polylepis reticulata* by remote sensing in the high Andean areas of Ecuador, through the processing of an orthophotograph with a resolution of 0.0938 meters and Sentinel 2 A satellite images with a resolution of 10 meters; where three training sessions were carried out in orthophotography with discriminations of $NDVI \leq 0.01$; $NDVI \leq 0.04$; $NDV \leq 0.07$ and two workouts in the Sentinel 2A scenes of the Random Forest algorithm. This process was developed by calculating the vegetation spectral indexes, generating a predictive model of categorization by means of decision trees; the results show that the relevant factors in the categorization for each training are: in the three workouts of the orthophotography, the variables of NDVI, SAVI5, SAVI15, have a level of importance equal to 100%, while in the satellite image they do not have areas of great size or considered of importance did not make an adequate identification of the species under study, in the same way a comparison was made in the effectiveness of identification of *Polylepis* in 100 hectares through three softwares: ArcGis, Envi, RF, the supervised classification that allowed to identify *Polylepis* coverage areas, in the first software it is identified 4.68% (1) *Polylepis* and 95.32% (2) No *Polylepis*, in the second software it identifies 8.89% (1) *Polylepis* and 91.11% (2) No *Polylepis*, finally, in the third software identifies 2.32% (1) *Polylepis* and 97.68% (2) No *Polylepis* showing in the raster information a better identification with the software RF and determining the species with greater precision.

KEYWORDS: TELEDETECTION - SPECTRAL INDICES - RANDOM FOREST - POLYLEPIS - ALTE ANDINAS VEGETATION



XII. BIBLIOGRAFÍA

- Agency European Spatial. (21 de enero de 2019). *Science toolbox exploitation platform*. Recuperado el 12 de enero de 2019, de: <http://step.esa.int/main/doc/tutorials/snap-tutorials/>
- Arellano, H. (Enero de 2007). Los bosques de Polylepis en Colombia : riqueza y amenazas para su conservación. (C. I. National University of Colombia, Ed.) *ResearchGate*, Colombia, p.21.
- Borràs, J., Delegido, J., Pezzola, A., Pereira, M., Morassi, G., & Camps Valls, G. (2017). Clasificación de usos del suelo a partir de imágenes Sentinel-2 Borràs,. *Revista de Teledetección, Hilario Ascasubi, Argentina, 48*, 55-66.
- Bosque, J., & Sedra, R. (2000). El uso de los sistemas de información geográfica en la planificación territorial. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense, Madrid, 20*, 49-67.
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning, University of California, Berkeley, 42*,5-32.
- Cabello, J., & Paruelo, J. (2008). La teledetección en estudios ecológicos. *Ecosistemas, Buenos Aires, Argentina 7*(3), 1-3.
- Caranqui, J. (2010). Demografía de un Rodal de Polylepis Reticulata Hieron En La Reserva De Producción Faunística Chimborazo (Tesis de grado. Ingeniero Forestal).Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Riobamba,Ecuador
- Caranqui, J., Lozano, P., & Reyes, J. (2016). Composición y diversidad florística de los páramos en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo, Ecuador. *Enfoque UTE*, pp.33-45.
- Chuvieco Salinero, E. (1996). Empleo de imágenes de satélite para medir la estructura del paisaje: análisis cuantitativo y representación cartográfica. *Serie Geográfica, Buñol-Valencia, 6*, 131-147.
- Chuvieco, E. (2010). Teledeteccion, s.i.g. y cambio global. *V coloquio de geografía cuantitativa*. Universidad de Alcalá de Henares. pp. 33-55
- Environment for Visualizing Images. (2008). *ENVI. Getting Started with ENVI*. Recuperado el 18 de enero de 2019 de: <http://www.sigs.info/productos/envi>
- Escobar Flores, J. G., Lopez Sanchez, C. A., Sandoval, S., Marquez Linares, M. A., & Wehenkel, C. (2018). Predicting Pinus monophylla forest cover in the Baja California Desert by remote sensing. *PeerJ, California*, p.17.
- Estrella, J., Manosalvas, R., Mariaca, J., & Ribadeneira, M. (2005). *Biodiversidad y recursos genéticos : una guía para su uso y acceso en el Ecuador* (1ª ed.). Quito, Pichincha, Ecuador: EcoCiencia, INIAP, MAE y Abya Yala.
- Flores, V. (2017). Predicción de Bofedales en la Reserva De Producción De Fauna Chimborazo a través del Tratamiento de Imágenes Satelitales (Tesis de grado. Ingeniero Ecoturismo). Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, Riobamba,Ecuador
- García, F. C., Sarría, F. A., & Castillo, F. G. (2016). Modificación del algoritmo random forest para su empleo en clasificación de imágenes de teledetección. *XVII Congreso Nacional de Tecnologías de Información Geográfica, Málaga, 29, 30 de junio y 1 de julio 2016*, Loja, pp. 359-368

- Gilabert, M. A., González Piqueras, J., & García Haro, J. (1997). Acerca de los Índices de Vegetación. *Revista de Teledetección*, Valencia, p.10.
- Harris. (21 de febrero de 2019). *ENVI - The Leading Geospatial Analytics Software*. Recuperado el 21 de febrero de 2019 de : <https://www.harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI>
- Hernández, J., & Montaner, D. (s.f.). *Patrones de Respuesta Espectral*. Lab. Geomática y Ecología del Paisaje (GEP) – Facultad de Ciencias Forestales, Chile.
- Huete, A. . (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, California, 25(3), 295–309.
- Jeff, S., & Wrightsell, J. (1987). *Editing in ArcMap*. California, USA.
- Jin, Y., Sung, S., Lee, D. K., Biging, G. S., & Jeong, S. (2016). Mapping deforestation in north korea using phenology-based multi-index and random forest. *Remote Sensing*, Korea, 8(12), 1–16.
- Jordi, G. M. L. A. V. D. V. M. (2005). Estudio de la vegetación y Teledetección. Recuperado el 22 de September 22, 2017, de http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad2/td_ndvi.htm
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, Nebraska Hall, Lincoln, 17(7), 1425–1432.
- Kennedy, M. (2013). *Introducing geographic information systems with ArcGIS : a workbook approach to learning GIS, USA*.
- Kessler, M. (2006). Bosques de Polylepis Michael. (B. Ø. M. Moraes R., Ed.) *Botánica Económica de los Andes Centrales*, San Andrés, La Paz, pp.110-120.
- Lencinas, J. D., & Siebert, A. (2009). Relevamiento de bosques con información satelital: Resolución espacial y escala. *Revista de Ciencias Forestales, Antofagasta*, p.17.
- León Yáñez, S., Valencia, R., Pitmam, N., Endara, L., & Ulloa Ulloa, C. &. (2011). *Libro rojo de plantas endémicas del Ecuador*. (2ª ed.). QCA, Editor, & Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito) Recuperado el 21 de septiembre de 2018, de: <https://bioweb.bio/floraweb/librorojo/FichaEspecie/Polylepis%20reticulata>
- Martínez Vega, J., & Martín Isabel, P. (2010). Teledetección y Medio Ambiente. *Red Nacional de Teledetección Ambiental*, USA, p.67.
- Milson, A. J. (2011). Sig en la nube: websig para la enseñanza de la geografía. *Didactica Geografica, Nigeria*, 12, pp. 111-124.
- Ministerio de Ambiente del Ecuador. (2010). *Plan Gerencial Reserva de Producción Faunística Chimborazo*. Quito. p.59.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2007). *Plan Estratégico del Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador 2007-2016*. Quito, p.156.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2014). *Guía Parques, Áreas Protegidas del Ecuador*. Quito. p.14.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2018). *El Ministerio del Ambiente*. Recuperado el 9 de agosto de: <http://www.ambiente.gob.ec/>
- Morales, A., Corral, M., Trujillo, F., Salas, G., García, D., & Alan, E. (2018). Topographic investigation from a low altitude unmanned aerial vehicle. *Optics and Lasers in Engineering*, 110,63-71.
- Muños Aguayo, P. (2013). Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación Índices de vegetación. *Centro de Información de Recursos Naturales*, Chile, p.15.

- Oliva, P., & Verdú, F. (2008). Review of the use of several spectral indices and techniques to map burned area with MODIS images. *Departamento de Geografía, Península Ibérica*, pp.129-152.
- Picone, N. (2017). Comparación de imágenes satelitales sentinel 2 y landsat 8 en el estudio de áreas urbanas. *Eje Temático 3: Investigación y aplicaciones de Tecnologías de la Información Geográfica*. Chaco, p.10
- Project Qgis. (2019). *Qgis training Manual*. USA.
- Quantum Geografic Information Sistem. (2019). Manual de uso de QGIS, Recuperado el 18 de enero de 2019 de: https://docs.qgis.org/2.18/es/docs/user_manual/preamble/foreword.html
- Quintana, S. M., Valentin Criado, A., Martín Ramos, B., & Martín Fernández, M. (2008). *Libro Sig: aprendiendo a mejorar los Sig en la gestion ambiental*. Madrid, España.
- Rosete, F., & Bocco, G. (2003). Los sistemas de información geográfica y la percepción remota. Herramientas integradas para los planes de manejo en comunidades forestales. *Gaceta Ecológica ISSN:*, México, 68, 43-54.
- Rouse, J. W., Haas, R., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *Progress Report*, Grenbelant, Meriland, p.120.
- Sacristán Romero, F. (2006). La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental AquaTIC., *AquaTIC*, Zaragoza, España, pp.13-41.
- Sacristán, F. (2006). Teledetección satelital en la visión territorial y sistemas de proteccion ambiental urbano-rural (2ª parte). *Revista Urbano*, Madrid,España, pp.84-90.
- Saini, R., & Ghosh, S. K. (2018). Crop classification on single date sentinel-2 imagery using random forest and suppor vector machine. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Dehradun, India, 22(2),683-688.
- Sánchez, P. (2012). “La Teledetección Enfocada a la Obtención de Mapas Digitales” (Tesis de grado. Ingeniero Civil. Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Scornet, E. (2015). *Learning with random forests*. Sciences mathématiques de Paris Centre. Paris.
- Secretaria Nacional de Planificacion Y Desarrollo (2012). Zonas Administrativas de Planificación. Quito. p.48.
- Sonobe, R., Yamaya, Y., Tani, H., Wang, X., Kobayashi, N., & Mochizuki, K.-i. (2018). Assessing the suitability of data from Sentinel-1A and 2A for crop classification. *GIScience & Remote Sensing*, Japón 56, pp.918-938.
- Soria, J., & Granados, R. (2005). Relación entre los índices de vegetación obtenidos de los sensores AVHRR del satélite NOAA y TM del Landsat. *Ciencia Ergo Sum*, México, 12(2), 169-174.
- Miinisterio del Ambiente del Ecuador. (2003). Texto Unificado de Legislación Secundaria (TULAS). En *Libro Iii Del Regimen Forestal* . Quito, p.85.
- Zutta, B., Rundel, P., Saatchi, S., Casana, J., Gauthier, P., Soto, A., Velazco, Y. Buermann, W. (2012). Prediciendo la distribución de Polylepis : bosques Andinos vulnerables y cada vez más importantes. (F. d. UNMSM, Ed.) *Revista Peruena De Biología,South America* 19(2), 205-212.

XIII. ANEXOS

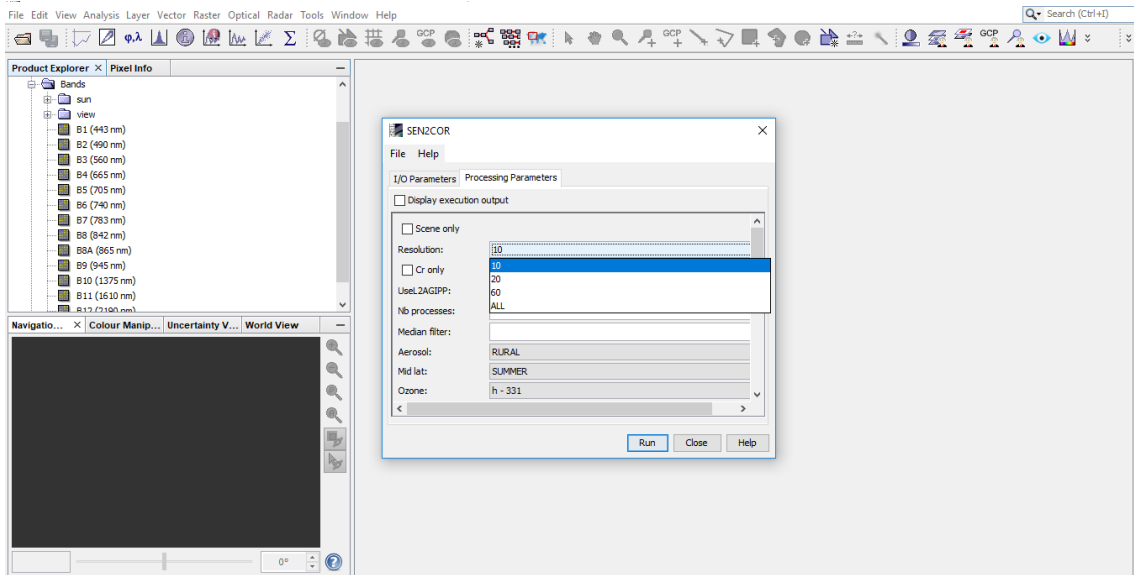


Figura 11. 49. Corrección atmosférica imágenes satelitales
Elaborado por: Trabajo de campo *SNAP*

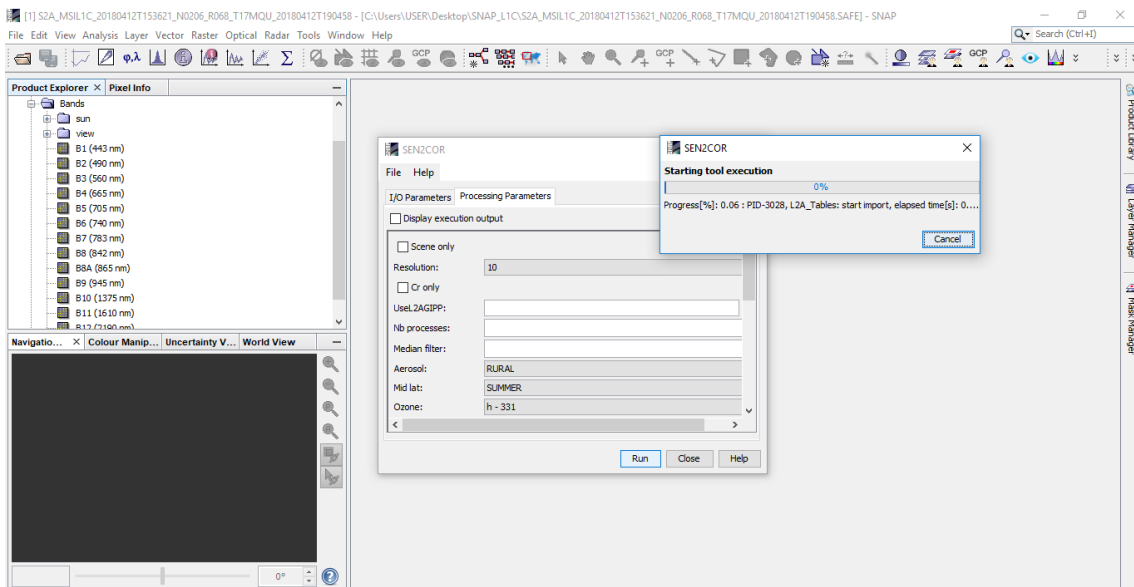


Figura 11. 50. Aplicación *SEN2COR* Sentinel L1C
Elaborado por: Trabajo de campo *SNAP*

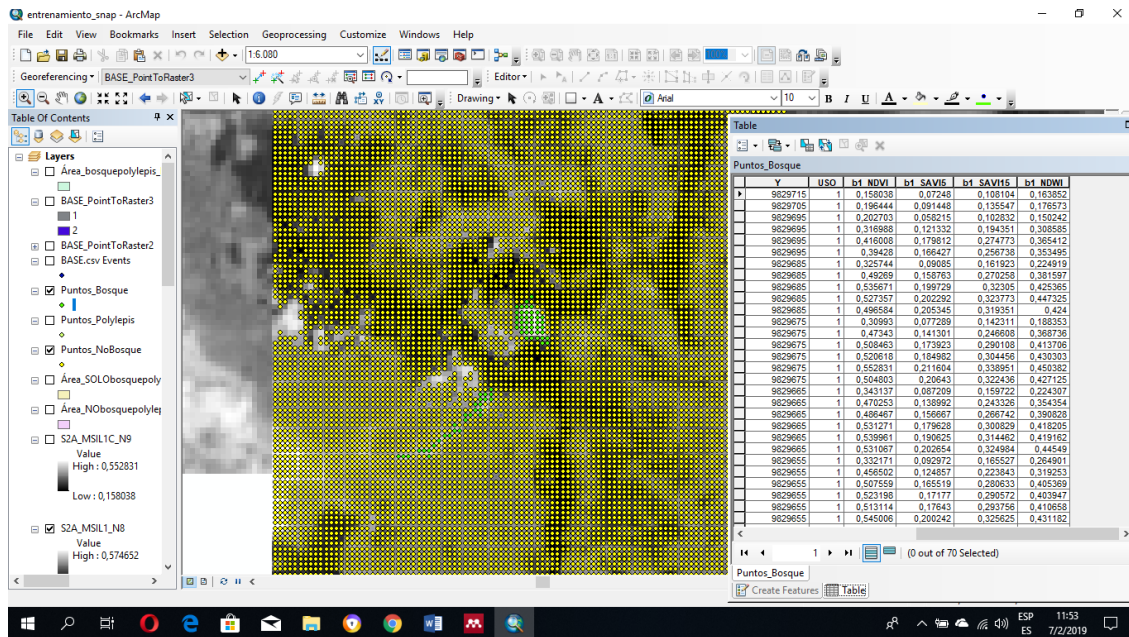


Figura 11. 51. Extracción de Valores de Índices Espectrales
Elaborado por: Trabajo de campo ARCMAP

Class	N Cases	N Mis-Classed	Pct. Error	Cost
1	216.283	27.775	12.84%	0,12842
2	128.719	14.858	11.54%	0,11543

Figura 11. 52. Error de clasificación (tercer entrenamiento NDVI > 0,01)
Elaborado por: Trabajo de campo RF

Class	N Cases	N Mis-Classed	Pct. Error	Cost
1	244.568	36.250	14.82%	0,14822
2	101.255	10.762	10.63%	0,10629

Figura 11. 53. Error de clasificación (segundo entrenamiento NDVI > 0,04)
Elaborado por: Trabajo de campo RF

Class	N Cases	N Mis-Classed	Pct. Error	Cost
1	198.711	18.990	9.56%	0,09557
2	145.849	15.640	10.72%	0,10723

Figura 11. 54. Error de clasificación (tercer entrenamiento NDVI > 0,07)
Elaborado por: Trabajo de campo RF

Class	N Cases	N Mis-Classed	Pct. Error	Cost
1	70	28	40.00%	0,40000
2	10.463	909	8.69%	0,08688

Figura 11.55. Error de clasificación (cuarto entrenamiento índices Qgis)
Elaborado por: Trabajo de campo RF

Class	N Cases	N Mis-Classed	Pct. Error	Cost
1	70	23	32.86%	0,32857
2	10.463	669	6.39%	0,06394

Figura 11. 56. Error de clasificación (quinto entrenamiento índices *SNAP*)

Elaborado por: Trabajo de campo *RF*