



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES

ESCUELA DE INGENIERÍA EN ECOTURISMO

**PREDICCIÓN DE BOFEDALES EN LA RESERVA DE
PRODUCCIÓN DE FAUNA CHIMBORAZO A TRAVÉS DEL
TRATAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES**

TRABAJO DE TITULACIÓN

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA TITULACIÓN DE GRADO

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

FLORES CANTOS VALERIA FERNANDA

RIOBAMBA- ECUADOR

2017

©2017, Valeria Fernanda Flores Cantos

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

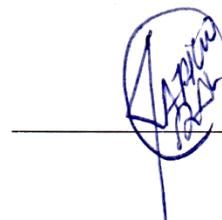
**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES
ESCUELA DE INGENIERÍA EN ECOTURISMO**

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de investigación **PREDICCIÓN DE BOFEDALES EN LA RESERVA DE PRODUCCIÓN DE FAUNA CHIMBORAZO A TRÁVES DEL TRATAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES**, de responsabilidad de la señorita Valeria Fernanda Flores Cantos, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, quedando autorizada su presentación:

Ing. MSc. Carlos Arturo Jara Santillán
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



Ing. MSc. Patricio Xavier Lozano Rodríguez
ASESOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



DECLARACIÓN DE AUTENCIDAD

Yo, Valeria Fernanda Flores Cantos, 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, 24 de noviembre del 2017



Valeria Fernanda Flores Cantos

Cédula de ciudadanía: 060403794-5

Yo, Valeria Fernanda Flores Cantos soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta Tesis y el patrimonio intelectual del Trabajo de Titulación de Grado pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



VALERIA FERNANDA FLORES CANTOS

DEDICATORIA

Los resultados de este trabajo, están dedicados

A todas aquellas personas que, de alguna forma, son parte de mi proceso de formación académica.

En especial dedico este trabajo a mi madre Cristina Cantos, por ser el pilar más importante y fundamental en mi vida, ya que con su apoyo incondicional ha sido mi fuente de inspiración para llegar a cumplir poco a poco mis sueños y es por ella que he llegado a este momento de muchos logros que vendrán en mi formación profesional.

A mis hermanos Anita, Bélgica, Maya y Fernando, que siempre han creído en mí y han impulsado mi deseo de superación y como no olvidar a mis sobrinos en especial a Luis Miguel.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios y a la virgen del Cisne, por permitirme llegar 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 Jara, Ing. Patricio Lozano, Ing. Fernando Romero y Ing. Ana Flores que me brindaron su tiempo y me guiaron a través de mi investigación.

No puedo olvidar a mis amigos en especial a Nelson, Joha, Merci, Erika, Vero, Álvaro, Yurik y Araceli Armas que siempre han estado presente en mi vida universitaria, gracias por su apoyo sincero y amistad.

A todos gracias.

CONTENIDO

I. PREDICCIÓN DE BOFEDALES EN LA RESERVA DE PRODUCCIÓN DE FAUNA CHIMBORAZO A TRAVÉS DEL TRATAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES	1
II. INTRODUCCIÓN	1
A. IMPORTANCIA	1
B. PROBLEMA	2
C. JUSTIFICACIÓN	2
III. OBJETIVOS.....	3
A. OBJETIVOS GENERAL	3
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
IV. HIPÓTESIS	3
A. NULA	3
B. ALTERNANTE	3
V. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
A. ECOSISTEMA ALTOANDINO	5
1. <i>Clasificación de los ecosistemas Alto andino</i>	5
2. <i>Factores bióticos y abióticos de los ecosistemas</i>	7
B. SIG Y TELEDETECCIÓN	9
3. <i>Sistemas de información geográfica (SIG)</i>	10
4. <i>Teledetección</i>	13
C. RANDOM FOREST	18
1. <i>Algoritmo Random Forest</i>	19
2. <i>Etapa de entrenamiento</i>	19
3. <i>Árboles predictores</i>	19
D. MODELO PREDICTIVO	21
1. <i>Análisis predictivos</i>	22
2. <i>Tipos de modelo predictorio</i>	22
3. <i>Modelo matemático de Random Forest</i>	22
VI. MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
A. CARACTERIZACIÓN DEL LUGAR.....	24
1. <i>Localización</i>	24
2. <i>Ubicación geográfica</i>	24
3. <i>Limites</i>	25

4. Características climáticas.....	25
5. Clasificación ecológica.....	26
6. Características del suelo.....	27
7. Equipos y materiales.....	28
B. METODOLOGÍA	29
1. Desarrollar indicadores potenciales para caracterizar bofedales en la Reserva, se procedió al cumplimiento de las siguientes fases:	29
2. Aplicar el algoritmo Random Forest para detectar bofedales en la Reserva, se procedió al cumplimiento de las siguientes fases:	36
3. Aplicar un modelo para predecir el colapso ecosistémico de los bofedales de Reserva, se procedió al cumplimiento de las siguientes fases:	37
VII.RESULTADOS.....	40
A. INDICADORES POTENCIALES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE BOFEDALES EN LA RESERVA	40
1. Recopilación de información	40
2. Desarrollo de indicadores potenciales	49
B. ALGORITMO RANDOM FOREST PARA DETECTAR BOFEDALES EN LA RESERVA	55
1. Aplicación del algoritmo de clasificación Random Forest en base a los 16 bofedales (primer entrenamiento).....	55
2. Aplicación del algoritmo de clasificación Random Forest en base a 5 bofedales medianamente intervenidos (segundo entrenamiento).....	58
3. Aplicación del algoritmo de clasificación Random Forest en base a las 20 zonas mejor conservadas (tercer entrenamiento)	61
C. MODELO PARA PREDECIR EL COLAPSO ECOSISTEMICO DE LOS BOFEDALES EN LA RESERVA	64
1. Elaboración de mapas para bofedales detectados.....	64
2. Análisis del modelo Predictorio.....	70
VIII.CONCLUSIONES.....	75
IX. RECOMENDACIONES.....	76
X. BIBLIOGRAFÍA.....	79
XI. ANEXOS.....	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1. Tipos de Bofedales	7
Tabla 5.2. Clasificación de Factores Bióticos.....	8
Tabla 5.3. Tipos de satélites	13
Tabla 5.4. Diferencia de resoluciones espectrales	16
Tabla 6.5. Clasificación Ecológica de la RPFCH.....	26
Tabla 6.6. Características de imágenes satelitales	30
Tabla 6.7. Características de imágenes satelitales	34
Tabla 6.8. Fórmula para el cálculo del índice de Agua de Diferencia Normalizada	34
Tabla 6.9. Fórmula para el cálculo del índice de vegetación de rango dinámico amplio	35
Tabla 6.10. Subcriterios de disminución en la distribución geográfica.....	38
Tabla 7.11. Bofedales de la RPFCH.....	40
Tabla 7.12. Calibración radiométrica imagen Landsat 5 TM año 1991	41
Tabla 7.13. Calibración radiométrica imagen Landsat 7 ETM año 2001	42
Tabla 7.14. Calibración radiométrica imagen Landsat 7 ETM año 2010.....	42
Tabla 7.15. Calibración radiométrica imagen Landsat 8 OLI año 2016.....	43
Tabla 7.16. Corrección Atmosférica imagen Landsat 5 TM - 1991	44
Tabla 7.17. Corrección Atmosférica imagen Landsat 7 ETM - 2001.....	45
Tabla 7.18. Corrección Atmosférica imagen Landsat 7 ETM – 2010	46
Tabla 7.19. Corrección Atmosférica imagen Landsat 8 OLI 2016.....	47
Tabla 7.20. Zonas mejor conservadas.....	48
Tabla 7.21. Cálculo del NDVI en la RPFCH.....	49
Tabla 7.22. Cálculo del SAVI5 en la RPFCH	50
Tabla 7.23. Cálculo del SAVI 15 en la RPFCH	51
Tabla 7.24. Cálculo del NDWI en la RPFCH.....	52
Tabla 7.25. Cálculo del WDRI en la RPFCH	53
Tabla 7.26. Valores de clasificación del DEM	54
Tabla 7.27. Matriz de confusión primer entrenamiento.....	55
Tabla 7.28. Área relativa y absoluta ocupada por Bofedal y Distinto de Bofedal definida en el primer entrenamiento	57
Tabla 7.29. Matriz de confusión segundo entrenamiento.....	58
Tabla 7.30. Área relativa y absoluta ocupada por Bofedal y Distinto de Bofedal definida en el segundo entrenamiento	60
Tabla 7.31. Matriz de confusión tercer entrenamiento	61
Tabla 7.32. Área relativa y absoluta ocupada por Bofedal y Distinto de Bofedal definida en el tercer entrenamiento.....	63

Tabla 7.33. Cálculo de reducción de tasa absoluta constante	75
Tabla 11.34. Cálculo de la reducción por año	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5.1 Flujo de información en el algoritmo del "Random Forest"	20
Figura 6. 2 Mapa de Macro localización de la RPFCH.....	24
Figura 6.3. Propuesta metodológica para la predicción de bofedales de la RPFCH.	29
Figura 6.4 DEM de la RPFCH	35
Figura 6. 5 Proceso metodológico para el procesamiento de información.....	36
Figura 7.6 Imagen Landsat 5 TM año 1991	41
Figura 7.7 Imagen Landsat 5 TM año 1991 calibrada radiométricamente.....	41
Figura 7.8 Imagen Landsat 7 ETM año 2001	42
Figura 7.9 Imagen Landsat 7 ETM año 2001 calibrada radiométricamente	42
Figura 7.10 Imagen Landsat 7 ETM año 2010.....	42
Figura 7.11 Imagen Landsat 7 ETM año 2010 calibrada radiométricamente	42
Figura 7.12 Imagen Landsat 8 OLI año 2016.....	43
Figura 7.13 Imagen Landsat 8 OLI año 2016 calibrada radiométricamente	43
Figura 7. 14 Color verdadero imagen Landsat 5 TM de 1991 (Corrección Atmosférica)	44
Figura 7.15 Color verdadero imagen Landsat 7 ETM del 2001 (Corrección Atmosférica).....	45
Figura 7.16 Color verdadero imagen Landsat 7 ETM del 2010 (Corrección Atmosférica).....	46
Figura 7.17 Color verdadero imagen Landsat 8 OLI del 2016 (Corrección Atmosférica).....	47
Figura 7.18 NDVI de 1991	49
Figura 7. 19 NDVI del 2001	49
Figura 7. 20 NDVI del 2010.....	50
Figura 7. 21 NDVI del 2016.....	50
Figura 7. 22 SAVI del 1991	50
Figura 7.23 SAVI 5 del 2001	50
Figura 7.24 SAVI 5 del 2010	50
Figura 7.25 SAVI 5 del 2016	50
Figura 7.26 SAVI 15 de 1991.....	51
Figura 7. 27 SAVI 15 del 2001	51
Figura 7.28 SAVI 15 del 2010	52
Figura 7.29 SAVI 15 del 2016	52
Figura 7.30 NDWI de 1991	52
Figura 7.31 NDWI del 2001	52
Figura7.32 NDWI del 2010.....	53
Figura 7.33 NDWI del 2016.....	53
Figura 7.34 WDRI de 1991	53
Figura 7.35 WDRI del 2001	53

Figura 7.36 WDRI del 2011	54
Figura 7.37 WDRI del 2016	54
Figura 7.38 DEM de la RPFCH	54
Figura 7.39 Importancia de las variables en términos de la disminución promedio en la precisión usando el subconjunto de datos OOB (primer entrenamiento)	56
Figura 7.40 Mapa que resulta de la categorización realizada por el algoritmo de clasificación RF de todos los pixel asociados a la región de estudio (primer entrenamiento).....	57
Figura 7.41 Importancia de las variables en términos de la disminución promedio en la precisión usando el subconjunto de datos OOB (segundo entrenamiento).....	59
Figura 7.42 Mapa que resulta de la categorización realizada por el algoritmo de clasificación RF de todos los pixel asociados a la región de estudio (segundo entrenamiento).....	60
Figura 7.43 Importancia de las variables en términos de la disminución promedio en la precisión usando el subconjunto de datos OOB (tercer entrenamiento).....	62
Figura 7.44 Mapa que resulta de la categorización realizada por el algoritmo de clasificación RF de todos los pixel asociados a la región de estudio (tercer entrenamiento)	63
Figura 7.45 Mapa de ubicación de los bofedales en la RPFCH	65
Figura 7.46 Mapa de distribución de Bofedales en base al primer entrenamiento	66
Figura 7.47 Mapa de distribución de Bofedales en base al segundo entrenamiento	67
Figura 7.48 Mapa de distribución de Bofedales en base al tercer entrenamiento	68
Figura 7.49 Distribución de bofedales en Reserva de Producción de Fauna Chimborazo-1991.....	71
Figura 7.50 Distribución de bofedales en Reserva de Producción de Fauna Chimborazo-2001.....	72
Figura 7.51 Distribución de bofedales en Reserva de Producción de Fauna Chimborazo-2010.....	73
Figura 7.52 Distribución de bofedales en Reserva de Producción de Fauna Chimborazo-2016.....	74
Figura 7.53. Tasa absoluta de reducción y tasa proporcional de disminución	75
Figura 11.54. Mechahuasca.....	90
Figura 11.55. Río Blanco.....	90
Figura 11.56. Los Hieleros	90
Figura 11.57. Pampas Salasaca	911
Figura 11.58. Cruz del Arenal 2	91

GLOSARIO DE SIGLAS

RPFCH	Reserva de Producción de Fauna Chimborazo
MAE	Ministerio del Ambiente
IGM	Instituto Geográfico Militar
SIG	Sistema de Información Geográfica
UTM	Universal Transversal Mecator
MSS	Multispectral scanner
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos
ETM	Enhanced Thematic Mapper Plus
NDVI	Índice Normalizado Diferencial de Vegetación
SAVI	Índice de Vegetación ajustado con el suelo
NDWI	El índice de Agua de Diferencia Normalizada
WDRI	Índice de vegetación de rango dinámico amplio
DEM	Modelo de elevación digital
RF	Random Forest
UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
LRE	Lista roja de los ecosistemas

I. PREDICCIÓN DE BOFEDALES EN LA RESERVA DE PRODUCCIÓN DE FAUNA CHIMBORAZO A TRAVÉS DEL TRATAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

II. INTRODUCCIÓN

A. IMPORTANCIA

El Ecuador ha considerado que es de fundamental importancia el manejo de los recursos naturales por ello ha creado el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP); identificadas como “espacios geográficos claramente definidos, reconocidos y gestionados, a través de medios legales u otros tipos de medios eficaces para conseguir la conservación a largo plazo de la naturaleza y sus valores culturales asociados” (Dudley, 2008). Las áreas protegidas en el Ecuador ocupan el 20% del territorio nacional, a partir de la declaratoria del primer Parque Nacional hasta la actualidad se han sumado 51 Áreas entre el territorio continental e insular.

Por ende, la Reserva de Producción Faunística de Chimborazo (RPFCH) forma parte del SNAP desde 1987, y de acuerdo a recientes actualizaciones a febrero 2013 la Reserva tiene una extensión de 52.683,27 ha, distribuidas entre las provincias de Tungurahua, Chimborazo y Bolívar, con altitudes que van desde los 3800 hasta los 6310 metros sobre el nivel del mar. (Ministerio del Ambiente, 2014). Adicionalmente esta área protegida tiene como objetivos prioritarios la conservación de los ecosistemas y especies susceptibles de manejo, por lo que representa una fuente importante de servicios ecosistémicos como los servicios de soporte, regulación y culturales.

Dentro del tipo del servicio ecosistémico de regulación que tiene la Reserva destaca como principales clases del servicio, la regulación hídrica, purificación del aire, regulación climática y control de la erosión, mismos que se originan a través del almacenamiento de carbono, en los humedales alto andinos conocidos como bofedales. Según (Alzérreca, 2001) “Los bofedales son hábitats naturales húmedos con agua permanente alimentados de diferentes fuentes como manantiales, agua de deshielo, ríos y lluvia. Ubicados y distribuidos en forma dispersa en las ecorregiones del Altiplano y Alto andino”. Dentro del marco ecológico este tipo de ecosistema presenta grandes extensiones de vegetación y biodiversidad de flora y fauna, convirtiéndose de esta manera en fuentes de reserva de agua para las comunidades aledañas a la zona de influencia del área de estudio.

Bajo este contexto el proyecto SIV 25 “Evaluación de los servicios ecosistémicos de la RPFCH”, tiene como uno de sus objetivos identificar la extensión de este ecosistema, por tal motivo la presente investigación a través del uso de técnicas de teledetección espacial como el tratamiento de imágenes satelitales, la aplicación del algoritmo Random Forest y un análisis multitemporal, detecta y caracteriza la distribución de la cobertura vegetal del área con la finalidad de proveer información importante para garantizar su conservación.

B. PROBLEMA

Las recientes investigaciones exploratorias realizadas en la Reserva bajo el proyecto de investigación institucional SIV 25 “Evaluación de los servicios ecosistémicos de la RPFCH”, han determinado que los bofedales se encuentran en un proceso de degradación, siendo las actividades antrópicas el factor más incisivo; lo que ha generado un cambio constante y paulatino en la cobertura vegetal y extensión de este ecosistema, alterando procesos e interacciones con la biota que habitan en los mismos.

C. JUSTIFICACIÓN

El proyecto investigación institucional SIV 25 “Evaluación de los servicios ecosistémicos de la RPFCH” necesita conocer la exacta extensión de los bofedales con la finalidad de implementar acciones de manejo inmediatas. Por ende el objetivo principal de esta investigación es realizar la identificación y caracterización ecológica de los bofedales, en relación al estado actual en el que se encuentran; por medio de la aplicación de herramientas de teledetección y modelamiento del mismo. Con el propósito de determinar los límites y comportamientos de la cobertura vegetal de los bofedales en la Reserva.

Bajo esta consideración el trabajo de investigación aplico el uso de herramientas digitales, facilitadas por los sensores que se encuentran orbitando el planeta en los satélites, los cuales nos permitirán analizar a través del tiempo las distintas coberturas vegetales de la zona de estudio, con el fin de estructurar una base de datos espaciales que permitan la precisa detección de bofedales; para establecer medidas de manejo que ayuden a la toma de decisiones sobre este ecosistema garantizando su conservación y el mantenimiento de los servicios que suministra.

III. OBJETIVOS

A. OBJETIVOS GENERAL

Predecir bofedales en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo a través del tratamiento de imágenes satelitales, aplicando el software *Random Forest*.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Desarrollar indicadores potenciales para caracterizar bofedales en la Reserva.
2. Aplicar el algoritmo Random Forest para detectar los bofedales en la Reserva.
3. Aplicar un modelo para predecir el colapso ecosistémico de los bofedales en la Reserva.

IV. HIPÓTESIS

A. NULA

La aplicación del algoritmo Random Forest tiene una baja confiabilidad en la detección de bofedales en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo.

B. ALTERNANTE

La aplicación del algoritmo Random Forest tiene una alta confiabilidad en la detección de bofedales en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo.

V. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A. ECOSISTEMA ALTOANDINO

De acuerdo a Kappelle, (2005) “el ecosistema Alto andino es una formación vegetal, heterogénea, psocrofítica, muy vellosa, herbácea y generalmente desarbolada con altitudes de 2.800-4.800 msnm”. En el Ecuador (Medina & Mena, 2001) mencionan que este tipo de ecosistema presenta alturas de 3.500 msnm como límite inferior, pero las condiciones geológicas, climáticas y antrópicas hacen que este límite varíe mucho y que se encuentren a veces desde los 2.800 msnm, especialmente en el sur del país, o bosques cerrados hasta por sobre los 4.000 msnm. Por lo que se puede mencionar que este tipo de ecosistema cubre alrededor de 1.250.000 ha, lo que representa a un 6% del territorio nacional.

Por lo que Andrade, (2016) cita que los ecosistemas Alto andino son especies de islas ubicadas en las cimas de las montañas y al estar separadas entre sí por ecosistemas diferentes, se ha producido una diversificación grande de formas de vida y de especies. Asimismo, los eventos tectónicos, volcánicos y de glaciaciones que afectaron especialmente a las altas montañas, han hecho que los rangos de distribución de las especies se alteraran de acuerdo con los cambios en las condiciones del medio.

Se podría decir que este tipo de ecosistema abarca una notable biodiversidad, debido a su situación territorial y a los procesos biológicos que ocurren en los mismos como son las concentraciones de carbono orgánico (CO₂), a la vez se destaca por la presencia de flora endémica, en la cual destacan las plantas vasculares con un total de 1.500 especies; al contrario de la escasa presencia de fauna entre mamíferos, reptiles y aves que habitan estos pisos Alto andino.

1. Clasificación de los ecosistemas Alto andino

Debido a las variaciones altitudinales el ecosistema Alto andino se divide en:

a. Páramo de pajonal

Como menciona Vásconez , Medina, & Hofstede, (2001) los páramos de pajonal “son extensiones cubiertas por pajonal de varios géneros; se encuentran distribuidos en todas las provincias y cubren un alrededor del 70% de la extensión del territorio nacional”.

b. Páramos de frailejones

Es un páramo dominado, por lo menos visualmente por el frailejón, aunque en realidad la forma de vida dominante es el pajonal, pero es tan notable la presencia de del frailejón. Las otras especies de este tipo de páramo son básicamente las mismas que las del páramo de pajonal; de hecho, si no fuera por la presencia de los frailejones se parecería a un páramo de pajonal. (Vásconez , Medina, & Hofstede, 2001)

c. **Páramos secos sobre los arenales**

En ocasiones los páramos se desarrollan sobre un suelo arenoso resultado de procesos erosivos intensos, como en el caso de los arenales del Chimborazo en la provincia homónima. Hay una similitud con la vegetación del páramo seco pero la humedad es mayor y la escasez de cobertura vegetal se puede deber más bien a erosión climática y antropogénica. (Negrete, 2012)

d. **Superpáramo**

Como mencionan Vásconez, Medina, & Hofstede, (2001) el superpáramo son aquellos páramos que se encuentran en aproximadamente en los 4.200 metros, es decir solo en las montañas que alcanzan estas altitudes, las condiciones climáticas se parecen superficialmente a las tundras templadas, donde únicamente las plantas más resistentes al frío, la desecación fisiológica y el viento pueden sobrevivir.

e. **Superpáramos zonales**

El Superpáramo a zonal recibe este nombre porque posee ciertas características semejantes a las del Superpáramo típico, pero se presenta a menores altitudes (por ejemplo, donde debería haber páramo de pajonal). La razón de esta anomalía está en que estos sitios se encuentran sobre lugares recientes (flujos de lodo y piedras producidos tras la erupción de un volcán) que crean características edáficas locales y que además están muy expuestas, lo que impide el crecimiento de las especies que normalmente se encuentran a estas altitudes. Por ello solo hay especies como las del Superpáramo y, especialmente, líquenes foliosos. (Medina & Mena, 2001)

f. **Páramo arbustivo**

El pajonal típico da paso a una vegetación arbustiva y herbácea dominada por *Puya*, *Miconia*, *Neurolepis*, *Oreocallis*, *Weinmannia* y *Blechnum*. Este tipo de vegetación posiblemente deba considerarse dentro de otro tipo general de ecosistemas y no como un tipo de páramo. Hay muchos elementos de bosque andino y menos de páramo. Es necesario indicar que no todos los páramos de la provincia de Loja corresponden a este tipo: también hay especialmente páramo de pajonal. (Mena, & Hofstede, 2006)

g. **Bofedales**

Los bofedales son hábitats naturales húmedos con agua permanente alimentados de diferentes fuentes como manantiales, agua de deshielo, ríos y lluvia. Considerados como oasis con vegetación siempre verde que sirven de refugio apropiado para mantener una sobresaliente biodiversidad de flora y fauna. En este contexto (Pozo, 2000) menciona que los bofedales son formaciones vegetales que se establecen en un ambiente edáfico, principalmente orgánico, caracterizado por una condición hídrica de saturación permanente, presentando una gran diversidad biológica respecto del entorno. A la vez son zonas de forraje y abrevadero de valiosas especies amenazadas en su conservación (vicuña, guanaco, llama y alpaca entre otros).

En cuanto a su composición de flora y fauna en los bofedales se presentan una variación de acuerdo a la cantidad de agua, época del año, contenido de sales tanto en el suelo como en el

agua, altitud, pastoreo y manejo de los mismos. (Cárdenas & Encina, 2008). Por lo que se puede decir que los bofedales son ecosistemas de altura en donde predomina la vegetación nativa, la cual es responsable del almacenamiento de agua por distintos medios.

1) Clasificación de los bofedales

Según Cárdena, & Encina, (2008) los bofedales en el Ecuador se clasifican de acuerdo a su altitud y características físicas a continuación se detalla cada uno:

Tabla 5.1. Tipos de Bofedales

TIPOS DE BOFEDALES		
ORIGEN	Naturales	Creados por la humedad de deshielos, manantiales naturales de aguas superficiales o subterráneas y por precipitaciones pluviales
	Artificiales o Antrópicos	Establecidos por el hombre de acuerdo a sus necesidades
RÉGIMEN HÍDRICO	Hidromórficos o údicos	Tienen presencia de ficos o údicos agua permanente.
ALTITUD	Altiplánicos	Se ubican por debajo de los 4100 m.s.n.m
	Alto andinos	Se encuentran por encima de los 4100 m.s.n.m
TAMAÑO	Pequeños	Creados para usos familiares
	Grandes	Son utilizados por las comunidades
PH DE LOS SUELOS	Básicos	PH mayor a 7.4
	Neutros	PH de 6.4 a 7.4
	Ácidos	PH menores a 6.4
FISIOGRAFÍA	Son de cordillera o altura	
	De llanura, pampa y aluviales	

Nota: (Cárdena, & Encina, 2008)

2. Factores bióticos y abióticos de los ecosistemas

a. Factores bióticos

De acuerdo a Rayden, (2010) se conoce como factor biótico o componente biótico a todos los organismos vivos que interactúan con otros organismos vivos, refiriéndonos a la fauna y la flora de un lugar específico, así como también a sus interacciones. Mientras que (Santillana, 2006) señala que los factores bióticos poseen características fisiológicas específicas que les permiten sobrevivir y reproducirse dentro de un ecosistema.

Por ende, dentro de la clasificación de los factores bióticos tenemos:

Tabla 5.2 Clasificación de Factores Bióticos

CLASIFICACIÓN	CARACTERÍSTICAS
INDIVIDUO	Son organismos que fisiológicamente son independientes de otros, estos pueden ser unicelulares o pluricelulares s son capaces de sobrevivir en un ambiente determinado
POBLACIÓN	Conjunto de organismos de una especie que están en un mismo lugar. Con esto nos referimos a organismos vivos, ya sean unicelulares o pluricelulares. Los miembros de las poblaciones se relacionan entre sí mediante relaciones interespecificas.
COMUNIDAD	Está formada por las diversas poblaciones de seres vivos que habitan un ecosistema. Los miembros de la comunidad se relacionan unos con otros mediante determinadas relaciones interespecificas.

Nota: (Soler, 2006)

b. Factores abióticos

Mediante Espasa Calpe, (2003) los factores abióticos comprenden todo lo que no tiene vida, como son las sustancias orgánicas o inorgánicas, es decir son cualquier factor químico-físico que pueden acelerar la diversidad y crecimiento de poblaciones de seres vivos. Por lo que (Cifuentes, 2015) menciona que su importancia para la vida y el equilibrio ecológico es muy grande ya que determina la distribución de los seres vivos sobre la tierra y, además influyen sobre ellos su adaptación al medio.

De acuerdo a Acuña, (2014) los factores abióticos se clasifican en:

1) Luz

La luz es un factor abiótico esencial del ecosistema, dado que constituye el suministro principal de energía para todos los organismos. La energía luminosa es convertida por las plantas en energía química gracias al proceso llamado fotosíntesis. Esta energía química es encerrada en las sustancias orgánicas producidas por las plantas. Es inútil decir que, sin la luz, la vida no existiría sobre la Tierra.

La luz visible no es la única forma de energía que nos llega desde el Sol. El Sol nos envía varios tipos de energía, desde ondas de radio hasta rayos gamma. La luz ultravioleta (UV) y la radiación infrarroja (calor) se encuentran entre estas formas de radiación solar. Ambas son factores ecológicos muy valiosos.

2) Temperatura

Un factor fundamental en la vida de los organismos ya que regula las funciones vitales que realizan las enzimas de carácter proteico. Cuando la temperatura es muy elevada o muy baja, estas funciones se paralizan llevando a la destrucción de los organelos celulares o la propia célula.

Organismos tales como aves y mamíferos invierten una gran cantidad de su energía para conservar una temperatura constante óptima con el fin de asegurar que las reacciones químicas, vitales para su supervivencia, se realicen eficientemente.

3) Humedad

La humedad atmosférica es la cantidad de vapor de agua existente en el aire. Depende de la temperatura, de forma que resulta mucho más elevada en las masas de aire caliente que en las de aire frío. Se mide mediante un aparato denominado higrómetro, y se expresa mediante los conceptos de humedad absoluta, específica, o relativa del aire.

La humedad absoluta es la masa total de agua existente en el aire por unidad de volumen, y se expresa en gramos por metro cúbico de aire. La humedad atmosférica terrestre presenta grandes fluctuaciones temporales y espaciales. La humedad específica mide la masa de agua que se encuentra en estado gaseoso en un kilogramo de aire húmedo, y se expresa en gramos por kilogramo de aire. La humedad relativa del aire es la relación porcentual entre la cantidad de vapor de agua real que existe en la atmósfera y la máxima que podría contener a idéntica temperatura.

4) Presión atmosférica

Está compuesta por una mezcla de varios gases que rodea un objeto celeste (como la Tierra) cuando éste cuenta con un campo gravitatorio suficiente para impedir que estos escapen.

La atmósfera terrestre está constituida principalmente por nitrógeno (78%) y oxígeno (21%). El 1% restante lo forman el argón (0,9%), el dióxido de carbono (0,03%), distintas proporciones de vapor de agua, y trazas de hidrógeno, ozono, metano, monóxido de carbono, helio, neón, kriptón y xenón.

La presión atmosférica se define como el peso del aire por unidad de superficie. La presión disminuye con la altura. Las zonas de alta presión están por encima de los 1013 hectopascales, mientras que las de baja presión están por debajo de esa magnitud.

B. SIG Y TELEDETECCIÓN

La Teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG) poseen como uno de sus objetivos el análisis de imágenes y almacenamiento de información de cualquier tipo con referencia espacial. A la vez estas herramientas nos permiten gestionar con sencillez grandes

volúmenes de información, y analizar los datos de forma precisa para apoyar la toma de decisiones en la gestión territorial. (Portugués, 2010)

3. Sistemas de información geográfica (SIG)

Mondolfi, (1971) Menciona que “los sistemas de información Geográfica (SIG) representan nuevas formas para realizar estudios de hábitat debido a la gran variedad de herramientas que contienen, las cuales permiten manipular, procesar, analizar y relacionar grandes volúmenes de datos dentro de un componente espacial asociado”. Así mismo, permiten la aplicación de métodos y análisis estadísticos y matemáticos para tener una visión más aproximada a la realidad de las variables a considerar en diversos estudios.

Mientras que CIESAS, (2013) refiere que utilizar un sistema de información geográfica (SIG) permitirá separar la información en diferentes capas temáticas y las almacenará independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, y facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos, con el fin de generar otra nueva.

En este contexto los sistemas de información geográfica son softwares que permiten realizar consultas, integrar, analizar y representar de manera eficiente a los usuarios cualquier tipo de información geográfica asociada a un territorio, conectado mapas con bases de datos.

a. Usos

En la actualidad los sistemas de información geográfica son utilizados para la producción cartográfica, evaluaciones ambientales de recursos naturales, sistemas de catastros, evaluación de áreas de riesgo, zonificación de áreas naturales, entre otros.

b. Tipos de sistemas de información geográfica

1) Raster

En su forma más simple, un raster consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información, como la temperatura. Son fotografías aéreas digitales, imágenes de satélite, imágenes digitales o incluso mapas escaneados. (ArcGIS for Desktop, 2015)

a) Modelo digital de elevación (DEM)

De acuerdo al INEGI, (2017) “Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo”.

En los modelos digitales de elevación existen dos cualidades esenciales que son la exactitud y la resolución horizontal o grado de detalle digital de representación en formato digital, las cuales varían dependiendo del método que se emplea para generarlos y para el caso de los que son

generados con tecnología LIDAR se obtienen modelos de alta resolución y gran exactitud (valores submétricos)

2) Vector

Se utiliza para la descripción de los objetos geográficos, vectores, líneas o puntos, definidos por duplas de coordenadas con referencia a algún sistema de coordenadas, los cuales son expresados en función de algún tipo de proyección cartográfica. (Instituto Geografico Austín Codazo, 2006)

c. Global Positioning System (GPS)

De acuerdo a Letham, (2001) el GPS es un “sistema de satélites de navegación que permite determinar la posición las 24 horas del día, en cualquier lugar del globo y en cualquier condición climatológica. El GPS utiliza señales de radio para calcular su posición, que es facilitada como un grupo de números y letras que corresponden a un punto sobre un mapa”.

d. Sistema de Coordenadas

1) Coordenadas Esféricas

La Pontificia Universidad Javeriana, (2012) menciona que en el sistema de coordenadas esféricas se utilizan también tres coordenadas para notar la posición de un punto o un vector en un espacio tridimensional, dos de estas coordenadas son angulares y una de ellas es métrica.

2) Coordenadas Geográficas

Las coordenadas geográficas permiten definir la posición de un punto terrestre a partir de los meridianos y paralelos. El sistema más clásico y conocido es el que emplea la longitud y latitud. (Instituto Geografico Militar, 2005)

b) Latitud Geográfica

Según WordPress, (2015) menciona que “es la distancia angular de un punto de la Tierra con respecto al Ecuador. Puede ser: Norte o Sur. La latitud máxima es de 90° Norte y de 90° Sur”.

c) Longitud Geográfica

De acuerdo al Instituto Geografico Militar, (2005) estipula que:

Es la distancia que existe entre un punto cualquiera y el Meridiano de Greenwich. El Meridiano de Greenwich se toma como la línea de base, y le corresponde la Longitud de 0°. Todos los puntos ubicados sobre el mismo meridiano, tienen la misma longitud.

Aquellos puntos que se encuentren al Oriente del Meridiano de Greenwich, reciben la denominación Este (E); y todos los puntos ubicados al Occidente del Meridiano de Greenwich, reciben la denominación Oeste (W). La Longitud se mide desde los 0° a los 180°, mientras que los polos Norte y Sur no tienen Longitud.

e. **Coordenadas proyectadas o Universal Transversal de Mecator**

De acuerdo a Ibañez, Gisbert, & Moreno, (2006) el sistema de coordenadas UTM (Universal Transversal Mecator) “es un sistema de proyección cartográfico basado en cuadrículas con el cual se pueden referenciar puntos sobre la superficie terrestre.

Por tanto, en el sistema UTM la Tierra se divide en 60 husos de 6° de longitud que completan su 360°. Cada huso se numera con un número entre el 1 y el 60, siendo el huso 1 el limitado entre las longitudes 180° y 174° W”.

f. **Datum**

Fernández Coppel, (2001) en su texto Localizaciones Geográficas menciona que:

El Datum es el punto tangente al elipsoide y al geoide, donde ambos son coincidentes. Cada Datum está compuesto por:

- Un elipsoide, definido por a, b, aplastamiento
- Un punto llamado “Fundamental” en el que el elipsoide y la tierra son tangentes. Este punto “Fundamental” se le define por sus coordenadas geográficas longitud y latitud.

g. **Mapa**

Los mapas son representaciones gráficas en una superficie plana y en dos dimensiones: largo y ancho. Un mapa geográfico puede representar toda la superficie terrestre como también solo un fragmento de ella, esto dependerá del territorio que se quiera visualizar. (Vilá Valentí, 1988)

1) **Tipos de mapas**

Los mapas pueden clasificarse de acuerdo al interés particular y por los diversos criterios sobre ellos es por eso que el (Instituto Geografico Militar de Esapaña, 2014) incluye ocho tipos de clasificación, sin embargo, a continuación, se describen únicamente los más utilizados:

a) **Según la escala de trabajo**

i. **Mapas de pequeña escala**

Son los mapas que representan amplias zonas de la superficie terrestre, por lo que es imprescindible tener en cuenta la esfericidad de la Tierra. En estos mapas el nivel de detalle es pequeño. Se suelen denominar mapas de pequeña escala aquéllos cuya escala es menor de 1:100.000. Algunos ejemplos de este tipo de mapas son los que representan países, continentes, hemisferios, etc.

ii. **Mapas de gran escala**

Son los que representan pequeñas zonas de la Tierra. En estos mapas el detalle de los elementos cartografiados es mayor. Se suelen llamar mapas de gran escala aquéllos de escala mayor de 1:10.000. Se denominan planos a partir de 1:2.000, al no considerar la esfericidad de la Tierra.

b) Según el propósito para el que ha sido creado

i. Mapas topográficos

Un mapa topográfico o de propósito general es el que representa gráficamente los principales elementos que conforman la superficie terrestre, como vías de comunicación, entidades de población, hidrografía, relieve, con una precisión adecuada a la escala.

ii. Mapas temáticos

Un mapa temático o de propósito particular es aquel cuyo objetivo es localizar características o fenómenos particulares. El contenido puede abarcar diversos aspectos: desde información histórica, política o económica, hasta fenómenos naturales como el clima, la vegetación o la geología.

El mapa base utilizado en la elaboración de los mapas temáticos es el topográfico o de propósito general simplificado.

4. Teledetección

De acuerdo a Gutiérrez & Nieto, (2006) se entiende como teledetección al procesamiento o técnica de adquisición de información sin tener contacto directo con ella. Sin embargo, de un modo más restringido, y en el ámbito de las ciencias de la Tierra, la Teledetección es entendida como una técnica que tiene por objeto la captura, tratamiento y análisis de imágenes digitales tomadas desde satélites artificiales.

a. Tipos de satélites de teledetección

Como menciona Moyota, (2015) “los satélites se caracterizan por el tipo de resolución por lo que puede ser de tres tipos: espectral, temporal y espacial”. En donde la resolución espectral se refiere al número de bandas o capas de almacenamiento, la resolución temporal se refiere al periodo de adquisición de datos del satélite y la espacial menciona al nivel de detalle que puede ser obtenido por el satélite y generalmente se representa mediante la dimensión del píxel.

La siguiente tabla, presenta las características de los distintos tipos de satélites que permiten localizar los recursos naturales:

Tabla 5.3 Tipos de satélites

SATÉLITE	CARACTERÍSTICAS
Landsat	Los satélites Landsat disponen de dos sensores, MSS (<i>Multispectral scanner</i>) y TM (<i>Thematic mapper</i>). El sensor TM tiene mayor resolución radiométrica (8 bits) que el MSS (6 bits). Su órbita se sitúa a 705 Km de altitud, y sobrevuela la misma zona cada 16 días.

SATÉLITE	CARACTERÍSTICAS
POT (<i>System Probatoire d'Observation de la Terre</i>)	Existen cinco satélites en órbita, con una frecuencia de paso en 26 días. Los satélites 1, 2 y 3 están dotados del sensor HRV (<i>High Resolution Visible</i>) que proporciona imágenes en las zonas visibles e infrarrojo cercano del espectro electromagnético. Su principal ventaja respecto a Landsat es su mayor resolución espacial. Las imágenes de los SPOT 1, 2 y 3 son de 60 Km de ancho y con una resolución de 10-20 metros/píxel. En el satélite SPOT-5 la resolución espacial de las imágenes es de (1 píxel = 5m).
Envisat	Es actualmente el satélite medioambiental más avanzado del mundo. Envisat detecta miles de parámetros, entre los que destacan: presencia de gases en la atmósfera, concentración de fitoplancton en los mares y corrientes submarinas o incendios en zonas muy alejadas.
IRS (<i>Indian Remote Sensing Satellite</i>)	Tienen una órbita helio síncrona, de 907 km de altitud y frecuencia de paso de 24 días. Disponen de los sensores LISS (4 bandas espectrales) y WiFS (Wide Field Sensor) especializado en estudios de vegetación
ASTER (<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>)	Se utiliza para obtener mapas detallados de la temperatura, reflectancia y elevación de la superficie terrestre.
CERES (<i>Clouds and the Earth's Radiant Energy System</i>)	Mide el balance global de radiación de la Tierra. Aportando datos sobre las propiedades de las nubes y su papel en los flujos de radiación desde la superficie terrestre hasta las zonas altas de la atmósfera
MISR (<i>Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer</i>)	Explora la superficie terrestre con nueve cámaras, cada una de ellas apunta a un ángulo de observación diferente. Las imágenes que toma son en cuatro bandas: azul, verde, rojo, e infrarrojo próximo. Este modelo de captación permite al MISR distinguir los diferentes tipos de nubes, los aerosoles y las cubiertas de la superficie terrestre.
MODIS (<i>Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer</i>)	Escanea cada punto del planeta cada 1-2 días en 36 bandas espectrales. Gracias a esta amplia capacidad de captación, este sensor percibe más datos de los signos vitales de la Tierra. Entre otros aspectos, MODIS mide cada día el porcentaje de la superficie de la Tierra cubierta por nubes.

Nota: (USGS/NASA, 2015)

b. Satélite Landsat

Según Fernández, (2001) este satélite, se encuentra dotado de sensores empleados en teledetección y fue diseñado con el fin de obtener datos de los recursos terrestres. A la vez (Instituto Nacional de estadística y geografía de México, 2015) menciona que las imágenes LANDSAT están compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, que al combinarse producen una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones.

Dependiendo del satélite y el sensor se incluye un canal pancromático y/o uno térmico; asimismo las resoluciones espaciales varían de 15, 30, 60 y 120m.

1) Landsat 8

De acuerdo a National Space and Space Administration, (2016)

Las imágenes Landsat 8 poseen un satélite óptico de resolución media cuyo objetivo es proporcionar información para actividades relacionadas con la agricultura, la educación, los negocios, la ciencia y también en el ámbito estatal. Este satélite contiene dos sensores: The satellite comprises two sensors: the Sensor operacional de imágenes de tierra (OLI) y un sensor Infrarrojos Térmico (TIRS).

En donde el OLI está formado por 9 bandas espectrales que van desde lo visible pasando por los infrarrojos hasta el espectro de radiación de bajas ondas. Con las imágenes de resolución espaciales, que oscilan entre los 15 y los 30m, LANDSAT-8 proporciona imágenes de satélite de calidad que podrían demostrar los diferentes usos que se le podría dar a la tierra desde el espacio.

TIRS está compuesto por dos bandas espectrales, las cuales detectan infrarrojos térmicos, una herramienta imprescindible para medir la temperatura de la superficie de la Tierra.

2) Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)

Como menciona National Space and Space Administration, (2016):

Una imagen LANDSAT 7 ETM+ está compuesta por 8 bandas espectrales que pueden ser combinadas de distintas formas para obtener variadas composiciones de color u opciones de procesamiento. Entre las principales mejoras técnicas respecto de su antecesor, el satélite Landsat 5, se destaca la adición de una banda espectral (Banda Pancromática) con resolución de 15 metros. También, cuenta con mejoras en las características geométricas y radiométricas y una mayor resolución espacial de la banda térmica para 60 m. Estos avances tecnológicos permiten calificar al LANDSAT 7 como el satélite más interesante para la generación de imágenes con aplicaciones directas hasta una escala de 1:25.000, principalmente, en áreas rurales o territorios de grandes extensiones. El Landsat7 puede adquirir imágenes en un área que se extiende desde los 81° de latitud norte hasta los 81° de latitud sur y, obviamente, en todas las longitudes del globo terrestre

3) Landsat 5 (TM)

El Instituto Nacional de estadística y geografía de México, (2015) menciona que:

El sensor TM de las imágenes Landsat 5 es un avanzado sensor de barrido multispectrales, concebido para proporcionar una mayor resolución espacial, mejor discriminación espectral entre

los objetos de la superficie terrestre, mayor fidelidad geométrica y mayor precisión radiométrica en relación con el sensor MSS.

Opera simultáneamente en siete bandas espectrales, siendo tres en el visible, una en el infrarrojo cercano, dos en el infrarrojo medio y una en el infrarrojo termal. Tiene una resolución espacial de 30 metros en las bandas del visible e infrarrojo medio y 120 metros en la banda del infrarrojo termal.

El siguiente cuadro comparativo ilustra las diferencias de resolución espectral entre el sensor TM del Landsat5 y el sensor ETM+ del Landsat 7. Los valores, expresados representan los límites de longitudes de onda a los que es sensible cada banda espectral.

Tabla 5.4 Diferencia de resoluciones espectrales

SENSOR	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7	Banda 8
TM	0.45	0.52	0.63	0.76	1.55	10.4	2.08	
	0.52	0.60	0.69	0.90	1.75	12.5	2.35	
ETM+	0.45	0.53	0.63	0.78	1.55	10.4	2.09	0.52
	0.52	0.61	0.69	0.90	1.75	12.5	2.35	0.90

Nota: (National Space and Space Administration, 2016)

c. Combinación de Bandas Landsat

Según Instituto Nacional de estadística y geografía de México, (2015) la combinación de bandas Landsat son:

Transformaciones de relación de los datos obtenidos por teledetección se pueden aplicar para reducir los efectos del medio ambiente. Porcentajes también proporcionan información única y reflectancia espectral o el color diferencias sutiles entre los materiales de la superficie que son a menudo difíciles de detectar en una imagen estándar. También es útil para discriminar entre el suelo y la vegetación.

- **TM4/TM5:** Aumenta la masa de agua, la vegetación y la presencia de humedad en las tierras de cultivo. Cuerpo de agua ha aparecido como tono oscuro y la vegetación como el tono más claro. Dado que el agua es un fuerte absorbente en la región de IR cercano (band4) y mayor reflectancia en la banda de 5 región. Puede ser útil para discriminar los cuerpos de agua de la tierra.
- **TM5/TM4:** Se ha separado del cuerpo de agua de los bosques, tierras y vegetación estériles. En esta relación de agua ha aparecido como el tono oscuro y bosques, tierras áridas, las tierras de cultivo al descubierto todos han mostrado un tono más brillante.

d. Índices de Vegetación

Como menciona Esperanza & Zerda, (2002) “los índices de vegetación son transformaciones que implican efectuar una combinación matemática entre los niveles digitales almacenados en dos o más bandas espectrales de la misma imagen”. Mismas que están basados en la diferencia

espectral entre la banda roja y el infrarrojo cercano, siendo esta máxima en zonas de vegetación y mínima en zonas de suelo sin vegetación.

A continuación se detallan los índices de vegetación con los que se van a trabajar:

1) Índice de vegetación (NDVI) Índice Normalizado Diferencial de Vegetación

Es un índice que permite identificar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial. Se calcula como la diferencia normalizada entre la banda del rojo (R) y del infrarrojo cercano (NIR). (CONAE, 2016)

A la vez Sánchez, (2000) menciona que al respecto a otros índices de vegetación más complejos, el NDVI tiene las ventajas de tener una gran sencillez de cálculo y de facilitar la interpretación directa de los parámetros biofísicos de la vegetación. Además permite la comparación entre datos obtenidos por diferentes investigadores. Por otro lado, tiene el inconveniente de que posee poca capacidad de minimizar la influencia del suelo y de la atmósfera.

El NDVI permite identificar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial, así como, la evolución de su estado a lo largo del tiempo. El índice de vegetación de diferencia normalizada se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R})$$

Dónde:

NIR= reflectancia corregida atmosférica correspondiente al infrarrojo cercano.

R= reflectancia corregida atmosférica correspondiente al rojo. (CONAE, 2016)

“Los valores de este índice fluctúan entre -1 y 1. Diversos estudios y publicaciones señalan que valores por encima de 0.1 indican presencia de vegetación, y cuanto más alto sea el valor de este índice, las condiciones de vigor son mejores.” (Díaz, 2015).

ENVI 5 utiliza la siguiente ecuación para generar el resultado $\text{NDVI} = ((\text{IR} - \text{R}) / (\text{IR} + \text{R})) * 100$

2) Índice de vegetación (SAVI) Índice de Vegetación ajustado con el suelo

De acuerdo a (Huete, 1985) “Entre los factores que modifican el comportamiento del NDVI está la proporción de vegetación/suelo observada por el sensor. Para incluir explícitamente el factor suelo, clave cuando se trabaja en zonas áridas.”

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.

El Índice de vegetación ajustado al suelo se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{SAVI} = [(\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R} + \text{L})] * (1 + \text{L})$$

Donde:

NIR = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano

R = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al rojo

L = es un parámetro que varía según la densidad de la vegetación, para densidades intermedias, como en el caso de las imágenes de satélite, se toma 0,5 o 0.15 (CONAE, 2016)

3) Índice de vegetación (NDWI) El índice de Agua de Diferencia Normalizada

Según SNIA, (2016) “El NDWI provee información del estrés hídrico de la vegetación. Por lo cual utiliza la combinación de las reflectancia a 0.86 μm y 1.24 μm eliminando las variaciones inducidas por la estructura interna de los tejidos vegetales y su contenido de materia seca, mejorando la precisión en la determinación del contenido de agua de la vegetación”

Los valores del índice poseen un rango de -1 a +1, estando los valores menores a 0 asociados a superficies brillantes sin presencia de vegetación o agua y los mayores a 0 asociados a presencia de agua y vegetación. Cuanto más se acerca a 1, mayor es el contenido de agua. El índice de agua de diferencia normalizada se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{NDWI} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$$

Donde:

NIR = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano

SWIR = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente a la banda verde 6 o 3 dependiendo el tipo de imagen satelital Landsat. (McFeeters, 1996)

En conclusión los índices de vegetación, son pues imágenes calculadas a partir de operaciones algebraicas entre distintas bandas espectrales. Por ende el resultado permite obtener una nueva imagen donde se destacan gráficamente determinados píxeles relacionados con parámetros de las coberturas vegetales: densidad, índice de área foliar y actividad clorofílica.

C. RANDOM FOREST

De acuerdo a Debreuve, (2015) Random Forest es 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. A la vez (Breiman, Machine Learning, 2001) menciona 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 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 nos presentará resultados futuros como modelos precisos de las áreas de estudio.

1. Algoritmo Random Forest

Como menciona Tirados, (2014)

El algoritmo Random Forest, es uno de los mejores algoritmos de clasificación, capaz de organizar grandes cantidades de datos con exactitud, este algoritmo mejora la precisión en la clasificación mediante la incorporación de aleatoriedad en la construcción de cada clasificador individual. 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”, que, en cuanto al conjunto, 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.

2. Etapas de entrenamiento

Montes, (2015) Señala seis etapas de entrenamiento del software las mismas que se detallan a continuación:

- a. Aleatoriamente se crea un conjunto de datos de entrenamiento. Al seleccionarse aleatoriamente la información no todos los datos del conjunto general estarán en el conjunto de entrenamiento. La probabilidad de que un dato particular esté en el conjunto de entrenamiento es apropiadamente 66%.
- b. Los datos que no forman parte del conjunto de entrenamiento forman el conjunto de validación o auto of bag data (OOB data).
- c. En cada punto de división del árbol o nodo, la búsqueda de la mejor variable para dividir los datos no se realiza sobre todas las variables sino sobre un subconjunto, m , de las mismas. La elección del subconjunto de variables se realiza de forma aleatoria.
- d. Se busca la mejor división de los datos de entrenamiento teniendo en cuenta solo al m variable seleccionadas. Para esta tarea se debe implementar una función objetivo. Habitualmente ésta es la entropía o el índice de Gini.
- e. Los anteriores procesos son repetidos varias veces, de forma que se tienen un conjunto de árboles de decisión entrenados sobre diferentes conjuntos de datos y de atributos.
- f. Una vez el algoritmo entrenado, la evaluación de cada nueva entrada es realizado con el conjunto de árboles. La categoría final de la clase (clasificación) es realizado por el voto mayoritario del conjunto de árboles, y en caso de regresión por el valor promedio de los resultados.

3. Árboles predictores

De acuerdo a Montes, (2015) los árboles de decisión o predictores son estructuras lógicas con amplia utilización en la toma de decisión, la predicción y la minería de datos permiten descubrir y explorar patrones en grandes volúmenes de conjuntos de datos. En este sentido, son una herramienta clave en el proceso de toma de decisiones basadas en la información.

Random Forest trabaja con un mínimo de 3 árboles, por defecto 500, si hay muchos datos se manejan árboles entre 100-150.

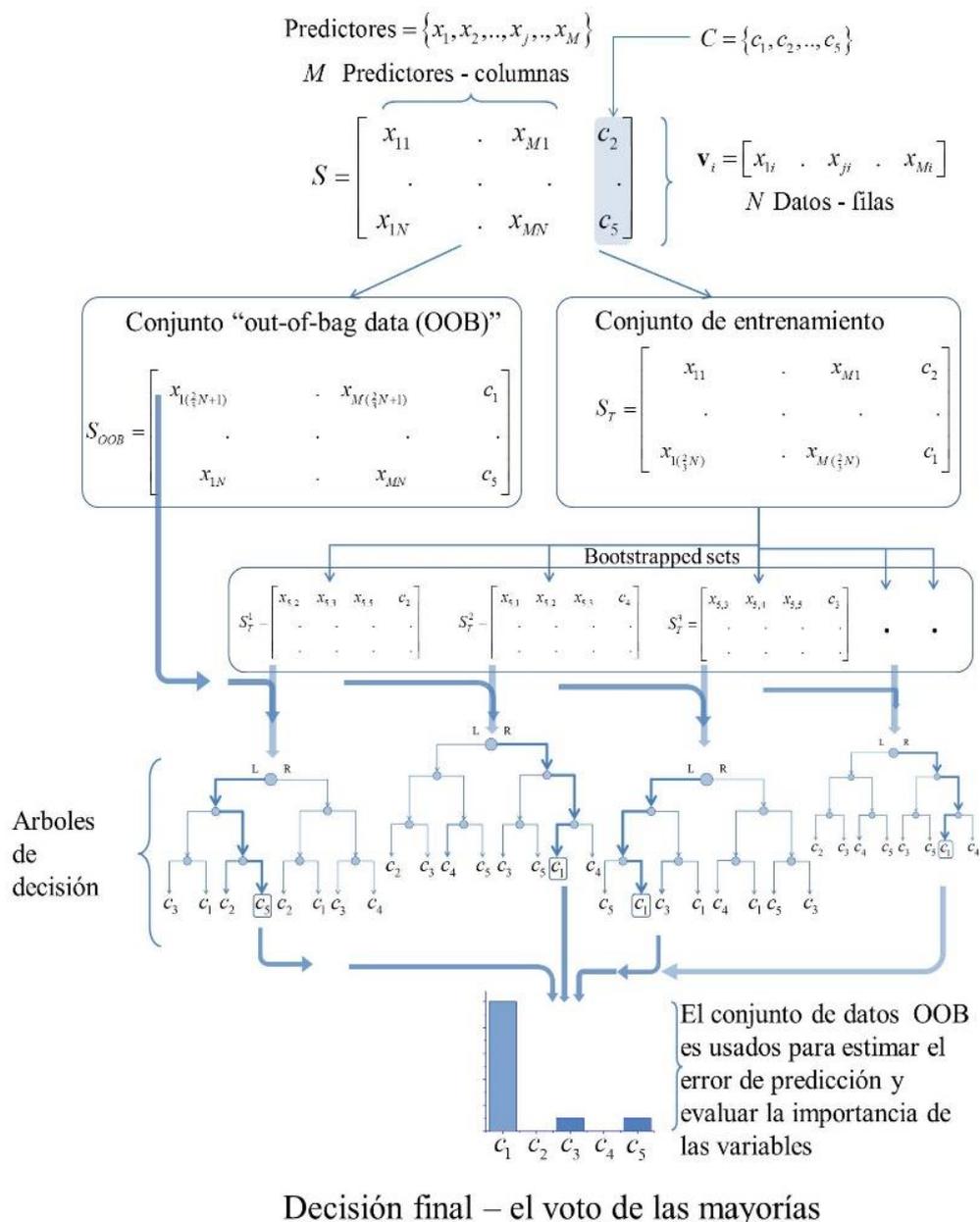


Figura 5.1 Flujo de información en el algoritmo del "Random Forest"
Nota: (Ayala, 2017)

El RF realiza su mejor predicción al contar el número de árboles cuyo resultado es similar y selecciona como su predicción el resultado que fue predicho por el mayor número de árboles. Uno de los aspectos relevantes del algoritmo RF es el muestreo aleatorio del espacio de datos de entrenamiento.

D. MODELO PREDICTIVO

De acuerdo a Breiman, (1996) un modelo predictivo es un proceso utilizado en el análisis para crear un modelo estadístico de comportamiento futuro. A la vez (Bourel, 2012) menciona que un modelo predictivo se compone de un número de predictores, que son factores variables que pueden influir en el comportamiento o resultados futuros.

Por ende, los modelos predictivos, recopilan datos para los indicadores relevantes, formulando un modelo estadístico, en el cual se hacen las predicciones y se valida el modelo con los datos adicionales que estén disponibles.

El RF realiza su mejor predicción al contar el número de árboles cuyo resultado es similar y selecciona como su predicción el resultado que fue predicho por el mayor número de árboles. Uno de los aspectos relevantes del algoritmo RF es el muestreo aleatorio del espacio de datos de entrenamiento. Los AD pueden manejar datos heterogéneos de diferente naturaleza (Louppe, Modelo Random Forest, 2014). Solo se ha considerado el flujo de información con una porción de los registros, la cual se divide en un conjunto de datos para el entrenamiento de los AD y otro conjunto de éstos para la validación (subconjunto de datos “out-of-bag” OOB), cálculo de errores y estimación de la importancia de las variables.

En general, el algoritmo RF realiza clasificaciones muy precisas, aporta información sobre la importancia de los predictores (variables), clasifica objetos anormales (outliers), estima los datos ausentes y provee una estimación de la tasa de error asociada al pronóstico.

El algoritmo de RF tiene la ventaja de que no se necesita podar los AD, la precisión e importancia de los predictores (variables) se genera automáticamente, el sobre ajuste (overfitting) no es un problema, no es muy sensitivo a valores extremos en los datos de entrenamiento y tiene un conjunto de parámetros que es fácil de inicializar.

El algoritmo RF cuantifica la importancia de las variables de dos maneras: (1) La primera está relacionada con la ganancia de información que se logra cuando se realiza la partición en cada nodo de cada árbol. Este valor se acumula para cada predictor en todos los AD. Mientras más alto sea este valor, más relevante es el predictor para realizar la partición y, por consiguiente, la clasificación. (2) El algoritmo también recurre a las muestras en el subconjunto OOB para elaborar una medida de la importancia de los predictores y así estimar la fortaleza predictiva de cada predictor.

Una vez que los AD se han entrenado, se pasan todos los datos del subconjunto OOB a través de todos los AD y se registra la precisión de la predicción. Luego los valores del predictor j se permutan aleatoriamente en el subconjunto OOB y se pasan todos los datos por los AD, y se registra otra vez la precisión de la predicción. Esta permutación induce una disminución de la precisión en todos los AD, todas las disminuciones son promediadas y el valor que resulta se usa como un indicador de la importancia por permutaciones del predictor j .

El efecto de la permutación aleatoria efectivamente anula el efecto de la variable de una manera similar a lo que ocurre cuando hacemos cero un coeficiente en un modelo lineal.

1. Análisis predictivos

Los análisis predictivos son parte de la rama de minería de datos que tiene relación con la predicción de las probabilidades y tendencias futuras. El cual permite extraer conclusiones confiables sobre eventos futuros, a través de la aplicación de métodos estadísticos, matemáticos y de reconocimiento de patrones. (Breiman, 1996)

2. Tipos de modelo predictorio

Saberian, (2015) Propone tres tipos de modelos predictivos, los cuales se detallan a continuación:

- a. **Los modelos propiamente predictivos:** su objetivo principal es detectar factores críticos de riesgo y nuevas oportunidades de negocio, mediante el análisis de datos históricos y, sobre todo, actuales, en tiempo real, mientras se lleva a cabo una determinada operación o proceso.
- b. **Los modelos de descripción:** su cometido básico es detectar vínculos entre servicios y/o productos, y el cliente (actual o potencial), estableciendo una relación de función entre ambos según los datos y las informaciones obtenidas sobre las preferencias del consumidor.
- c. **Los modelos orientados a la toma de decisiones:** si los anteriores modelos poseen una naturaleza técnica, el cariz de este tipo de modelo de análisis predictivo es eminentemente ejecutivo, es decir, toma los resultados obtenidos tras llevar a cabo operaciones de analítica predictiva poniéndolos al servicio de los responsables en la toma de decisiones corporativas.

3. Modelo matemático de Random Forest

De acuerdo a Breiman, Random Forest, (2006):

Random Forest es un método de agregación de modelos homogéneos que se basa sobre el voto mayoritario o el promedio según el caso. El método consiste en hacer varias muestras del conjunto de datos iniciales y promediar las predicciones hechas por los distintos $L = \{(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)\}$ clasificadores. Precisamente, a partir de un conjunto de datos se realiza, mediante el procedimiento bootstrap, un tiraje con reposición de n observaciones de obteniéndose una nueva muestra.

Cada elemento de L tiene una probabilidad de $1 - (1 - \frac{1}{n})^n \approx 0,63$ (si n es grande) de salir sorteado y por lo tanto de aparecer en L . A esta nueva muestra se le aplica el algoritmo deseado. Se repite este procedimiento M veces obteniendo de esta manera M modelos g_1, \dots, g_m y el predictor final es el voto mayoritario de los M estimadores en clasificación o el promedio en el caso de la regresión, es decir:

$$f_{bag}(x) = \underset{y}{\text{Arg max}}(\#\{m: g_m(x) = y\}) \quad (\text{clasificación}) \quad \text{o} \quad f_{bag}(x) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M g_m(x) \quad (\text{regresión})$$

Este método reduce el error al combinar varios clasificadores con alta varianza, como, por ejemplo, los árboles de clasificación, y se han mostrado en varios trabajos las mejoras obtenidas en las performances en problemas de clasificación y de regresión. El fundamento teórico se basa en que el error promedio que se obtiene sobre la muestra de entrenamiento L es mayor o igual al error obtenido por el estimador Bagging.

En efecto se puede probar que si f es un predictor obtenido sobre L y f_{bag} el obtenido por Bagging entonces es:

$$E_L(E_{(X,Y)}(Y - f(X))^2) \geq E_{(X,Y)}(Y - f_{\text{bag}}(X))^2$$

Por ende (Breiman, Machine Learning, 2001) propone el algoritmo Random Forest (árboles aleatorios) que combina las técnicas de CART y Bagging. El cual tiene como propósito incorporar la aleatoriedad en las distintas etapas de la construcción de un árbol obtenido por CART. Al igual que en Bagging, se sortean M muestras bootstrap del conjunto de datos originales L . Sobre las mismas se construyen M árboles para los cuales, en cada nodo, se elige la mejor subdivisión hecha por un subconjunto de variables explicativas seleccionadas aleatoriamente. Los árboles que se obtienen son maximales, es decir que en este caso no se podan.

En el caso de un problema de clasificación, la predicción de una observación hecha por Random Forest es la clase más votada entre las predicciones hechas por los M árboles y en regresión se hace un promedio de los valores asignados. Se ha mostrado que Random Forest es uno de los algoritmos con mejores performances en los problemas de aprendizaje, en particular en aquellos que cuentan con una cantidad importante de variables explicativas.

Sin embargo, si sólo algunas pocas son de relevancia, el Boosting suele ser más eficaz que Random Forest. Finalmente mencionamos que se cuenta con varios criterios que permiten obtener la importancia de cada una de las variables explicativas en el modelo agregado por Random Forest.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

A. CARACTERIZACIÓN DEL LUGAR

1. Localización

El presente trabajo de investigación se realizó en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo, específicamente en las zonas mejor conservadas de los bofedales Mechahuasca, Río Blanco, Cruz del Arenal, Pampas Salasaca y Los Hieleros presentes en las cuencas de río Llangana, río Chimbo y río Pastaza distribuidos en las provincias de Tungurahua, Bolívar y Chimborazo.

2. Ubicación geográfica

Coordenadas proyectadas UTM, DATUM WGS 84, ZONA 17 S

Noroeste X: 724588 Y: 9851177

Sureste X: 748675 Y: 9831139

Noreste X: 754275 Y: 9850907

Suroeste X: 731335 Y: 9830667

Altitud: 3800- 6310 msnm (Ministerio del Ambiente, 2013)

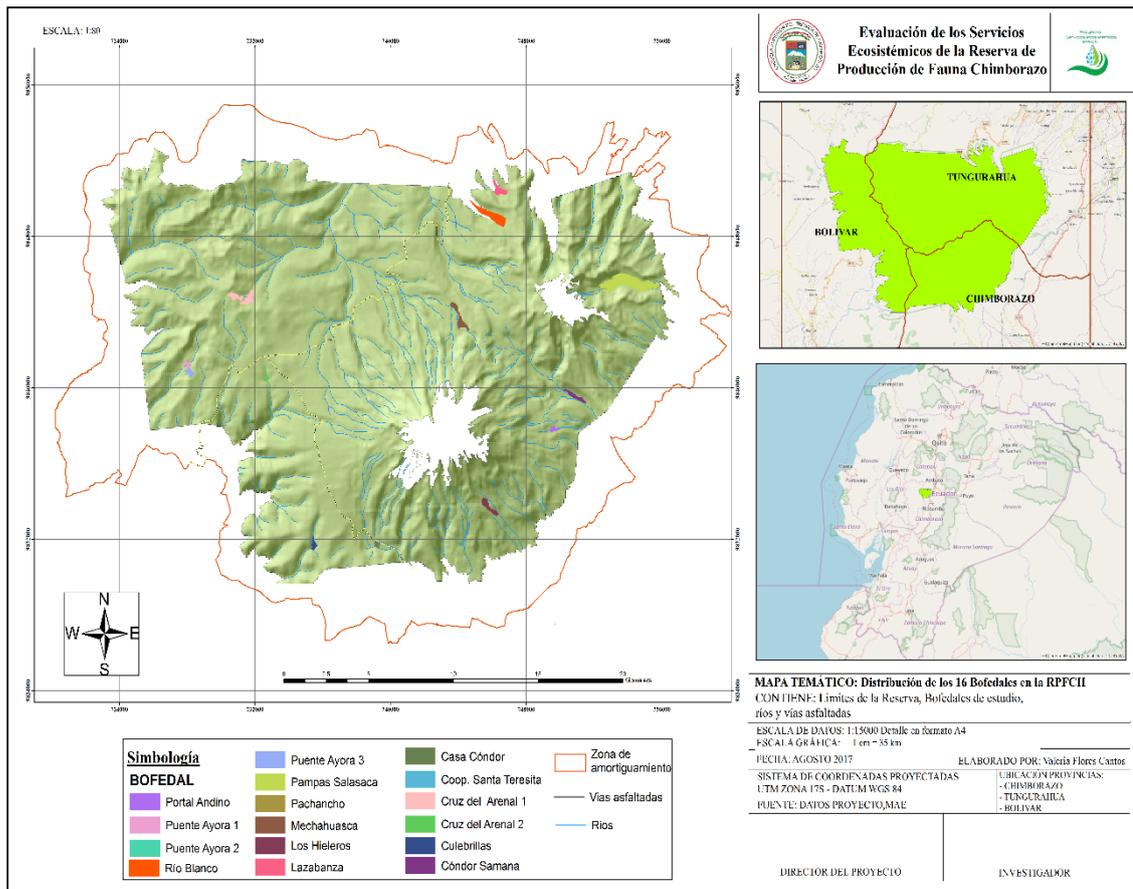


Figura 6. 2 Mapa de Macro localización de la RPFCH

Nota: IGM y MAE (2013)

Realizado por: Valeria Flores Cantos

3. Limites

Según el (Ministerio del Ambiente, 2014):

La Reserva de Producción de Fauna Chimborazo comprende los nevados Chimborazo y Carihuairazo y sus territorios de páramos contiguos, en todo su contorno, está comprendida dentro los siguientes límites:

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

a. **Temperatura**

La temperatura de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo 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, mientras que el mes de marzo y abril son los más lluviosos. (Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2016)

b. **Precipitación anual**

La zona oriental de la reserva tiene una alta influencia de los valles interandinos secos de la zona central de las provincias de Chimborazo y Tungurahua. La zona de mayor precipitación se ubica en el frente occidental de la RPFCH en la provincia Bolívar, con una influencia de las masas húmedas provenientes del Océano Pacífico.

De acuerdo al índice ombrotérmico desarrollado por el Ministerio del Ambiente del Ecuador (Ministerio del Ambiente, 2013), la reserva presenta cinco ombrotipos: Ultra húmedo, Hiperhúmedo superior, Hiperhúmedo inferior, Húmedo inferior y Húmedo superior. Los ombrotipos Ultra húmedo e Hiperhúmedo superior corresponden principalmente a las zonas glaciares el Chimborazo y el Carihuairazo.

Durante los días más fríos y húmedos suele ocurrir precipitación en forma de nieve o escarcha en las zonas más altas. Se registra un promedio anual de 998 mm que varía entre 809 mm en las zonas menos lluviosas y los 1.300 mm en las zonas más húmedas. (Ministerio del Ambiente, 2013)

5. Clasificación ecológica

La Reserva de Producción de Fauna Chimborazo posee 8 zonas de vida, que son:

Tabla 6. 5 Clasificación Ecológica de la RPFCH

TIPO DE ECOSITEMA	CARACTERISTICAS
Herbazal del Páramo (3400-4300 msnm)	<p>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.</p> <p>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</p>
Herbazal y Arbustal siempreverde subnival del Páramo (4100-4500 msnm)	<p>Son Arbustos bajos y matorrales Altoandino paramunos. Herbazal mezclado con arbustos esclerófilos semiprostrados son una altura entre 0,5 a 1,5, ocurre en morrenas, circos glaciares, escarpamientos rocosos, depósitos de rocas glaciares y pendientes pronunciadas de arena o quebradas estrechas. Este ecosistema se caracteriza por tener una vegetación fragmentada.</p>
Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo (3300-3900 msnm)	<p>Incluye al páramo de almohadillas, sector norte y centro de la cordillera oriental, subregión norte y centro. Pajonales arbustivos altimontano paramunos. Arbustales frecuentemente dispuestos en parches de hasta 3 m de altura, mezclados con pajonales amacollados de alrededor de 1,20 m.</p> <p>Consideran un ecosistema diferente localizado sobre la línea de bosque; sin embargo, otros autores consideran a éste como franja del ecosistema de bosque montano alto.</p>
Herbazal inundable del Páramo (3300-4500 msnm)	<p>Son herbazales inundables en los que existen especies que forman cojines o parches aislados de vegetación flotante; este ecosistema es zonal, en el que las condiciones edáficas o micro climáticas asociados al gradiente altitudinal.</p>
Herbazal ultra húmedo subnival del Páramo (4400-4900 msnm)	<p>Corresponde a vegetación dominada por arbustos postrados o almohadillas dispersas. Se encuentran en laderas abruptas y escarpadas cubiertas por depósitos glaciares y con suelos geliturbados.</p>

TIPO DE ECOSITEMA	CARACTERISTICAS
Bosque siempre verde del Páramo (3200-4100 msnm)	<p>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.</p> <p>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.</p>
Herbazal húmedo subnival del Páramo. (3400-4300)	<p>Generalmente se ubica en laderas peri glaciares 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.</p> <p>Este ecosistema se encuentra presente en los Illinizas, Pichincha, Cotopaxi y las vertientes occidentales del Chimborazo y Antisana.</p>
Herbazal húmedo montano alto superior del Páramo (3500-4200 msnm)	<p>Son herbazales abiertos, que se encuentran dominados por especies de los géneros Stipa, Senecio y Plantago; se encuentra en enclaves volcánicos localizados en fondos de valles glaciares llamados Glacis con litología de tipo: lapilli de pómez, toba y cenizas asociadas a efectos de sombra de lluvia, como en el flanco occidental del volcán Chimborazo.</p> <p>Debido a la humedad relativamente baja de estos ecosistemas la concentración de carbono orgánico en el suelo es menor que en los páramos más húmedos.</p>

Nota: (Ministerio del Ambiente, 2014)

Realizado por: Valeria Flores Cantos

6. Características del suelo

Los suelos de la Reserva son de origen volcánico, formados de rocas, sedimentos y tobas volcánicas pliocénicas y más antiguas. Al sur del volcán Chimborazo, la serranía de la Calera, su prolongación austral y el páramo de Puyal están desprovistos de andesitas pliocénicas.

El cerro negro Yanarumi de 4.156 m.s.n.m., vecino Chimborazo, exhibe los característicos conglomerados del cretáceo superior y marca el extremo septentrional del páramo Puyal. En el Fondo del valle del río Totorillas, entre el Chimborazo y el Yanarumi, aparecen pizarras y areniscas cretáceas.

Al norte del Chimborazo y Carihuairazo, los mantos volcánicos del plioceno, cubren en variable extensión, las alturas de la cordillera Occidental, originados por erupciones lineales a lo largo de una falla longitudinal, como en las demás regiones volcánicas de la cordillera. En el cruce de ambos sistemas rupturados, surgió con violencia la actividad volcánica del pleistoceno, creando este impresionante conjunto volcánico. (Chiscuet, 2009)

7. Equipos y materiales

a. Materiales

Papel bond, esferográficos, portaminas, borradores, carpetas y libreta de campo.

b. Equipos

1) Equipos de oficina

Computador portátil, Impresora, Pen drive, Pilas AA recargables, disco duro portátil.

2) Equipos de campo

Cámara digital de 16.1 megapíxeles, GPS, equipo de trekking

B. METODOLOGÍA

El presente trabajo es una investigación de tipo exploratoria, que se ejecutó a través de revisiones bibliográficas y de campo a nivel descriptivo, analítico y prospectivo. En donde la zona de estudio fue dividida en tres sectores correspondiendo a las provincias de ubicación de la Reserva; para lo que se tomó como referencia los 16 bofedales identificados en investigaciones pasadas.

De acuerdo a los objetivos específicos la investigación fue dividida en cuatro etapas:

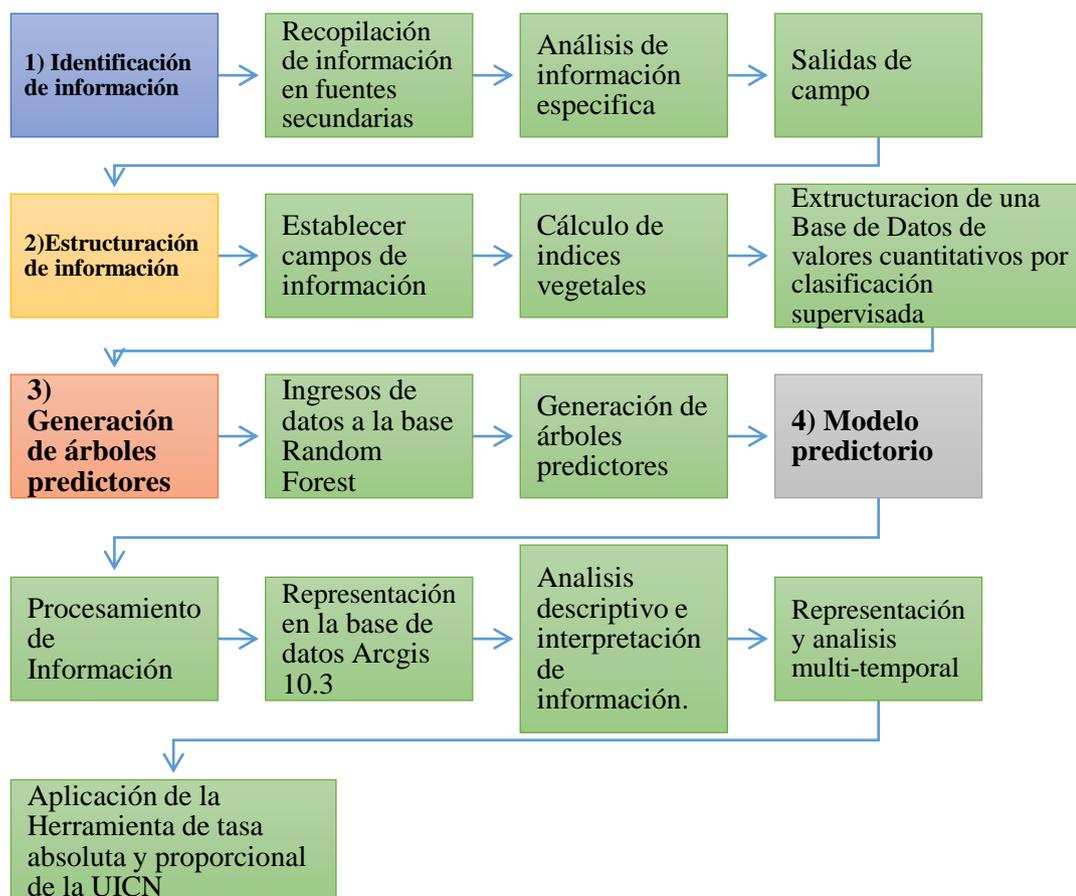


Figura 6.3. Propuesta metodológica para la predicción de bofedales de la RPFCH.
Realizado por: Valeria Flores Cantos

1. Para el cumplimiento del primer objetivo: Desarrollar indicadores potenciales para caracterizar bofedales en la Reserva, se procedió al cumplimiento de las siguientes fases:

- a. **Recopilación de información**

Considerando el estado actual y los distintos estudios ejecutados en los Bofedales de la Reserva, esta etapa se realizó en dos momentos:

1) Recopilación y diagnóstico de información secundaria

Utilizando el método de investigación documental y la técnica de síntesis se revisó la información de los distintos trabajos de investigación ejecutados en los bofedales de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo correspondientes a (Andrade, 2016) y (Díaz , 2015), para lo cual se seleccionó información representativa de la zona de estudio como: mapas, cartografía base (shapefiles, DEM, y coordenadas). Toda la información obtenida de los distintos trabajos de investigación fue revisada y seleccionada de acuerdo a las necesidades del caso de estudio.

2) Información satelital

Para esta etapa se trabajó con cuatro imágenes de la RPFCH, capturadas por los satelitales LANDSAT 8 OLI, Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) y Landsat 5 TM, obtenidas de la aplicación EarthExplorer del USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos) con las siguientes etiquetas:

Tabla 6.6 Características de imágenes satelitales

IMAGEN	FECHA DE CAPTURA	CARACTERISTICAS
Landsat 8 OLI	20 de noviembre del 2016	ID: (1)LC80100612016325LGN00. (2) CLOUD COVER: 21.64. (3) Date: 2016/11/20. (4) Qlty: 9. (5) Sensor_Id: OLI_TIRS. (6) Path 10 (7) Row 61 (USGS, 2016)
Landsat 7 ETM	09 de septiembre del 2010	ID: (1)LC80100612016325LGN00. (2) CLOUD COVER: 27.00 (3) Date: 2010/09/09 (4) Qlty: 9 (5) Sensor_Id: ETM (6) Path:010 (7) Row: 061 (USGS, 2016)
Landsat 7 ETM	2 de octubre del 2001	ID: (1) LE70100612001275EDC00 (2) CLOUD COVER: 40.00 (3) Date: 2001/10/02 (4) Qlty: 9 (5) Sensor_Id: ETM (6) Path:010 (7) Row: 061 (USGS, 2014)

IMAGEN	FECHA DE CAPTURA	CARACTERISTICAS
Landsat 5TM	15 de octubre de 1991	ID: (1) LT50100611991288XXX02 (2) CLOUD COVER: 30.00 (3) Date: 1991/10/15 (4) Qlty:9 (5) Sensor_Id: TM (6) Path: 010 (7) Row: 061 (USGS, 2014)

Nota: (USGS, 2017)

Realizado por: Valeria Flores Cantos

Mismas que se sometieron a un proceso de calibración y corrección atmosférica para eliminar el efecto de los aerosoles y la radiancia del sensor con la atmósfera a través del software *ENVI 5.1* en el cual se realizaron los siguientes procesos:

a) Calibración radiométrica

Se realizó una rectificación de las imágenes Landsat 8 OLI, 7 ETM+ y 5TM en donde se trabajó con los archivos multiespectrales de cada una de las imágenes asignándoles una escala con un valor de FLAASH de 0.10, debido a que las unidades de radiancia trabaja con:

$$\mu W/(cm^2 * sr * mn)$$

Donde:

μW : micro watts

cm^2 : centímetros cuadrados

sr: spacial radiance

mn: nanometro

Este paso fue necesario debido a que las imágenes Landsat presentan unidades en metros cuadrados y micrómetros. A la vez se consideró la información casi interrumpida que presenta las imágenes Landsat 7 ETM debido a que presenta un problema en el satélite a causa de una falla en el instrumento que corrige las líneas escaneadas. Todo este proceso se realizó con la herramienta Radiometric Calibration del programa *ENVI 5.1*, el cual corrigió al mismo tiempo las 8 bandas de las imágenes Landsat 8 OLI y las seis bandas de las imágenes Landsat 7 ETM y 5TM.

b) Corrección atmosférica

Esta corrección se realizó para convertir la información de cada uno de los pixeles de las imágenes a niveles de reflectancia es decir que permitió disminuir los efectos de dispersión y absorción causados por la presencia de partículas en la atmósfera; para este proceso se utilizó la herramienta FLAASH Atmospheric Correction Model Input Parameters del programa *ENVI 5.1* en donde se trabajó con la imagen de radiancia anteriormente tratada en una escala de 1:00000.

A la vez esta herramienta permitió establecer los parámetros del sensor, la altura de la zona de estudio, el modelo de atmósfera, la fecha y hora de captura de las imágenes, la corrección de neblina y/o el enmascaramiento de nubes. Después de obtener los resultados de reflectancia se comprobó que en el eje Y los valores se encontraron en una escala de 10000 o más, para lo cual estos se tuvieron que transformar en 0 y 1 con la herramienta “Band Math” aplicando la siguiente fórmula:

$$(b1 \text{ le } 0)*0+(b1 \text{ ge } 10000)*1+(b1 \text{ gt } 0 \text{ and } b1 \text{ lt } 10000)*\text{float}(b1)/10000$$

Donde:

BI=banda 1

le = less and equal (menor o igual)

ge= greater and equal (mayor o igual)

gt = greater than (más grande que).

Para la aplicación de la fórmula en todas las bandas se usó la opción “Map variable to input file” y se seleccionó el archivo generado de reflectancia. Con la herramienta “Spectral profile”, se pudo comprobar que los valores de reflectancia varían entre 0 y 1. Este proceso se realizó con cada una de las imágenes Landsat.

3) Recopilación de información primaria

a) Visitas de campo

Una vez identificadas las zonas de estudio se crearon itinerarios para visitar los bofedales de Mechahuasca, Río Blanco, Cruz del Arenal, Pampas Salasaca y Los Hieleros ubicados en las tres provincias (Chimborazo, Tungurahua y Bolívar) para lo cual se planificó cinco salidas de campo del 27 de Julio al 08 de Agosto del 2017, en cuyos recorridos se tomaron fotografías y se procedió a la georreferenciación y delimitación in-situ de las zonas mejor conservadas de cada bofedal mediante el uso de dos GPS Garmin eTrex Touch 35 (Datum WGS84).

Previa realización del trabajo de campo se tomó como referencia zonas con áreas de 30x30 metros o más, considerando la dimensión de los píxeles de las imágenes satelitales Landsat 8 OLI, 7 ETM y 5 ETM previamente tratadas con las que se procesó la información y con un margen de error de 5 metros de los GPS que se utilizaron.

b) Generación de información cartográfica

Posteriormente con ayuda del software SIG *ArcGis 10.3*, se digitalizó la información de las salidas de campo y se manejó la cartografía base del proyecto SIV25 para lo cual se extrajo shapefiles de los 16 bofedales identificados por (Andrade, 2016) de los cuales se consideraron 5 medianamente intervenidos y de ellos se crearon polígonos de las zonas en mejor estado, correspondientes a las salidas de campo.

A la vez se recortaron las imágenes satelitales previamente tratadas ajustándolas al área de estudio, en donde se identificaron puntos de referencia geográfica y se establecieron 239.436 puntos correspondientes al área total de la RPFCH, mismos que fueron empleados en los consecutivos procesos.

b. Desarrollar indicadores potenciales

Obtenidas y corregidas las imágenes satelitales se realizó una clasificación supervisada tomando como referencia el área total de la Reserva para lo cual se calculó índices espectrales de vegetación que expresan las características fisiológicas y biofísicas del área de estudio que son el resultado de reflectancia solar del material vegetal.

En este estudio se exploró el uso de múltiples índices espectrales que se utilizaron como indicadores potenciales para la predicción de bofedales a través del software *ENVI 5.1* como:

1) (NDVI) Índice Normalizado Diferencial de Vegetación

Para el cálculo de este índice se empleó la siguiente fórmula:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R})$$

Dónde:

NIR= reflectancia corregida atmosférica correspondiente al infrarrojo cercano.

R= reflectancia corregida atmosférica correspondiente al rojo.

ENVI a través de su herramienta Band Math utiliza el siguiente cálculo:

$$\text{Band Math } ((\text{IR} - \text{R}) / (\text{IR} + \text{R})) * 100$$

Dónde:

IR= corresponde al infrarrojo cercano.

R= corresponde al rojo.

Las imágenes Landsat 8 OLI realizan este proceso a través de la banda 5 que corresponde al **IR** y la banda 4 al **R**; mientras que las imágenes Landsat 7 ETM y 5 TM trabajaron con las bandas 3 y 4 correspondiendo al **IR** y **R** respectivamente.

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

Este índice se calculó 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.

El Índice de vegetación ajustado al suelo se realizó mediante la siguiente expresión:

$$\text{SAVI} = [(\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R} + \text{L})] * (1 + \text{L})$$

Donde:

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

ENVI a través de su herramienta Band Math utilizó los siguientes cálculos:

Tabla 6.7 Características de imágenes satelitales

INDICE	SATÉLITE	FÓRMULA	DETALLE
SAVI 5	Landsat 8 OLI	Band Math	IR = b5 R = b4
	Landsat 7 ETM y 5 TM	$((IR-R)/(IR+R+0.5))*(1+0.5)*100$	IR = b4 R = b3
SAVI 15	Landsat 8 OLI	Band Math	IR = b5 R = b4
	Landsat 7 ETM y 5 TM	$((IR-R)/(IR+R+0.15))*(1+0.15)*100$	IR = b4 R = b3

Nota: (USGS/NASA, 2015)

Realizado por: Valeria Flores Cantos

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

El índice de agua de diferencia normalizada se calculó mediante la siguiente expresión:

$$NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$$

Donde:

NIR = corresponde al infrarrojo cercano

SWIR = corresponde a la banda verde

ENVI a través de su herramienta Band Math utilizó los siguientes cálculos para los distintos tipos de imágenes satelitales con los que se trabajó:

Tabla 6.8 Fórmula para el cálculo del índice de Agua de Diferencia Normalizada

INDICE	SATÉLITE	FÓRMULA	DETALLE
NDWI	Landsat 8 OLI	Band Math	IR = b5 SWIR = b3
	Landsat 7 ETM y 5 TM	$((IR-SWIR)/(IR+SWIR))*100$	IR = b4 SWIR = b2

Nota: (USGS/NASA, 2015)

Realizado por: Valeria Flores Cantos

4) (WDRI) Índice de vegetación de rango dinámico amplio

Este índice a través del software ENVI para los distintos tipos de imágenes trabajó con la siguiente fórmula:

Tabla 6. 9 Fórmula para el cálculo del índice de vegetación de rango dinámico amplio

INDICE	SATÉLITE	FÓRMULA	DETALLE
WDRI	Landsat 8 OLI	Band Math	IR = b5 R = b4
	Landsat 7 ETM y 5 TM	$((0.05*(IR))-R)/(((0.05*IR)+R))*100$	IR = b4 R = b3

Nota: (USGS/NASA, 2015)

Realizado por: Valeria Flores Cantos

5) (DEM)

El DEM (Modelo de elevación digital) fue considerado como un indicador debido a que solamente no contiene información explícita acerca de la altitud en el área de estudio, sino que también aportó con información relativa a las relaciones (distancia y a proximidad) entre los distintos valores de altitud.

El DEM que se utilizó se realizó mediante las curvas de nivel pertenecientes a la RPFCH convirtiéndolo en un archivo TIN con el software *ArcGis 10.3* a partir de la herramienta “3D Analyst”, lo cual nos dio como resultado un archivo raster, del que se obtuvo la información requerida de las alturas pertenecientes al área de estudio.



Figura 6.4 DEM de la RPFCH

Nota: (SIG Tierras, 2015)

Realizado por: Valeria Flores Cantos

2. **Para el cumplimiento del segundo objetivo: Aplicar el algoritmo Random Forest para detectar bofedales en la Reserva, se procedió al cumplimiento de las siguientes fases:**

a. **Procesamiento de información**

Una vez obtenidos los índices espectrales de vegetación con ayuda del software *ArcGis 10.3*, se procedió a realizar la extracción de información de cada índice, para lo cual se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

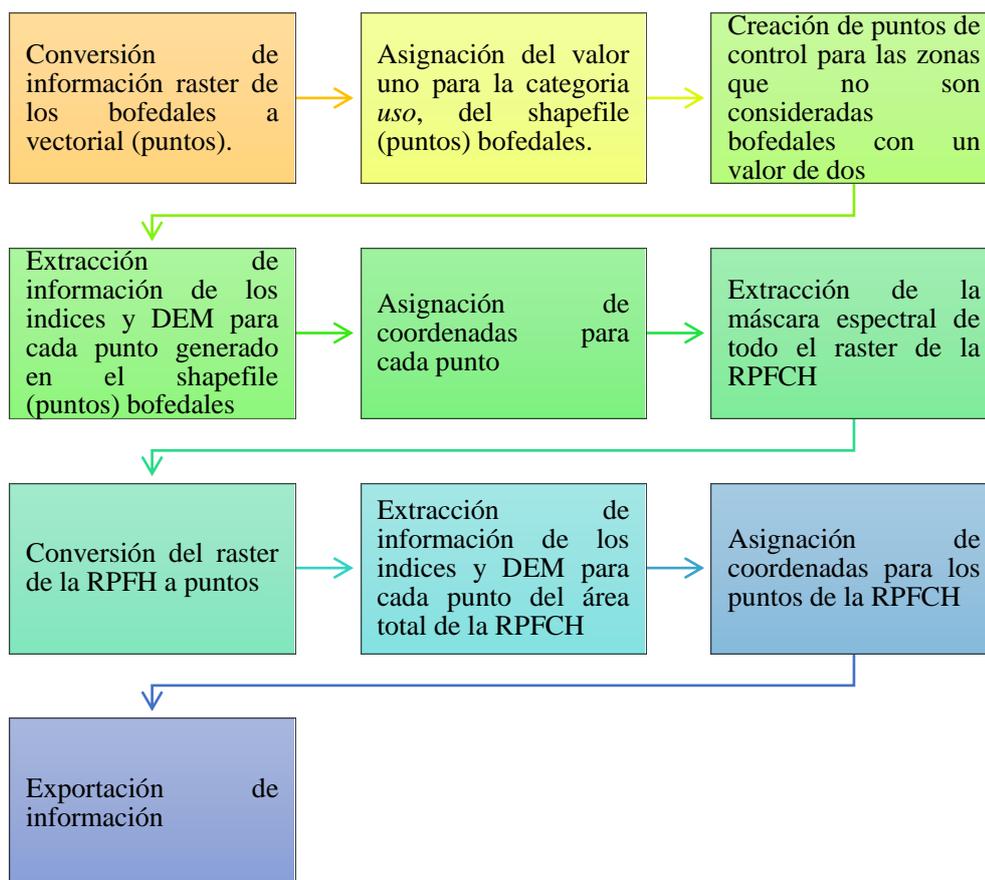


Figura 6. 5 Proceso metodológico para el procesamiento de información
Realizado por: Valeria Flores Cantos

b. **Algoritmo Random Forest**

La aplicación del algoritmo Random Forest se realizó en tres instancias:

1.- En el primer entrenamiento se aplicó el shapefile de los 16 bofedales identificados por (Andrade, 2016), pertenecientes a Cruz del arenal 1, Casa Cóndor, Cruz de Arenal 2, Culebrillas, Puente Ayora 1, Pachancho, Puente Ayora 2, Puente Ayora, Coop Santa Teresita, Cóndor Samana, Los Hieleros, Portal Andino, Lazabanza, Pampas Salasaca, Mechahuasca y Río Blanco.

2.- El segundo entrenamiento se realizó en base a los cinco bofedales medianamente intervenidos por actividades humanas y con áreas mayores a los 30.65 ha correspondientes a Mechahuasca, Río Blanco, Cruz del Arenal, Pampas Salasacas y Los Hieleros.

3.- Para el tercer entrenamiento se utilizó el shapefile generado a través de las salidas de campo en donde se identificó 20 zonas mejor conservadas en los cinco bofedales trabajados anteriores.

En este contexto la aplicación del algoritmo RF para los tres entrenamientos realizó un proceso de aprendizaje automático en el cual categorizó la información en dos clases; que sirvió para entrenar el ensamble de 500 árboles de decisión empleando un subconjunto de datos asociados a píxeles (puntos de referencia), en donde se asignó el valor uno a la categoría uso correspondiente a la clase bofedal y el valor dos a la clase distinto a bofedal.

A la vez se trabajó con variables predictoras pertenecientes a los índices espectrales de vegetación calculados anteriormente, los cuales permitieron entrenar el conjunto de 500 árboles, generando de esta manera un archivo grove con la información necesaria. Posteriormente se trabajó con un conjunto de píxeles del área total para el cual se estableció como predictores los datos generados en el archivo anterior en formato grove.

Para el cual el algoritmo RF sintetizó la información arrojando los datos finales.

3. Para el cumplimiento del tercer objetivo: Aplicar un modelo para predecir el colapso ecosistémico de los bofedales de Reserva, se procedió al cumplimiento de las siguientes fases:

a. Elaboración de mapas para Bofedales detectados

1) Mapa base

Este mapa se elaboró para reconocer la ubicación geográfica de los 16 bofedales en la RPFCH, a una escala de 1:150.000, en base a una imagen satelital del año 2016 obtenida del visualizador EarthExplorer del USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos), Landsat 8 OLI previamente tratada. El cual consta de los límites geográficos, cuerpos de agua, nevados o glaciares de la cartografía base del Ecuador y del proyecto SIV25.

2) Mapas de bofedales detectados

Los mapas temáticos se realizaron de acuerdo a la caracterización de los bofedales obtenidos de los entrenamientos del software *Random Forest*. Estos mapas contienen el detalle del resultado de los tres entrenamientos realizados con la imagen satelital Landsat 8 OLI del 20 de noviembre del 2016.

Al igual los mapas fueron realizados en escalas gráficas diferentes y en base a las normas de cartografía convencional.

b. Modelo predictorio para el colapso ecosistémico

1) Análisis multitemporal de los bofedales

En esta etapa se realizó un análisis multitemporal para lo cual se estableció periodos de entre nueve y diez años de diferencia de las imágenes satelitales, obtenido así imágenes del año 1991, 2001, 2010 y 2016 de los meses de agosto a noviembre, debido a que la zona de estudio se encuentra en un lugar en donde la mayor parte del año pasa nublado.

Para los periodos 1991, 2001 y 2010 las imágenes pasaron por el mismo proceso de corrección atmosférica y tratamiento de la información, que la imagen Landsat 8 OLI del 2016 pero en este caso la aplicación del algoritmo se realizó con el shapefile de las 20 zonas mejor conservadas de los bofedales, esto se realizó con el objetivo de tener una información más detallada y precisa de la extensión y tasa de reducción de los bofedales en la RPFCH. Una vez obtenido los datos se generaron mapas por cada período y en cada uno se calculó el área y porcentaje de extensión de los bofedales y se realizó un análisis de reducción en porcentajes.

La información de este análisis se complementó con datos proporcionados por antiguos y actuales funcionarios de la RPFCH, para lo que se elaboró una entrevista (Ver Anexo1) referente al plan de manejo del área y bofedales. A la vez esta información fue complementada con el análisis de los planes de manejo de 1992,2012, 2014 y el plan gerencial del 2006.

2) Análisis del modelo predictorio

La proyección de la disminución en la extensión de los bofedales se realizó utilizando la herramienta estimación del cambio en el área de disminución de un ecosistema de la UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (c), 2014), en donde para calcular la tasa de reducción absoluta, se trabajó con la información generada de los entrenamientos del RF de los resultados obtenidos de los años 1991 y 2016.

En este contexto se utilizó el criterio A. Disminución en la distribución geográfica, del protocolo de evaluación de riesgo, de la LRE (lista roja de ecosistemas) el cual identifica los ecosistemas que están sufriendo disminuciones de área, con gran frecuencia debido a amenazas que resultan en la pérdida y fragmentación de los mismos. (UICN, Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, 2016). Este análisis plantea tres periodos de tiempo que definen los siguientes subcriterios:

Tabla 6.10. Subcriterios de disminución en la distribución geográfica

Subcriterio	Periodo del tiempo	CR	EN	VU
A1	Pasado (durante los últimos 50 años)	≥ 80%	≥ 50%	≥ 30%
A2a	Futuro (durante los próximos 50 años)	≥ 80%	≥ 50%	≥ 30%
A2b	Cualquier período de 50 años (incluyendo el pasado, presente y futuro)	≥ 80%	≥ 50%	≥ 30%
A3	Histórico (desde aproximadamente 1750)	≥ 80%	≥ 70%	≥ 50%

Nota: (UICN, Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, 2016)

Mediante los subcriterios establecidos en la Tabla 6.10, se aplicó el subcriterio A2b, para lo cual se realizó una estimación basada en una proyección de la tasa de pérdida reciente calculada en los últimos 25 años (1991-2016). Aquí se calculó la superficie del ecosistema considerado como bofedal para ambos años obtenidos de los entrenamientos del algoritmo RF.

De acuerdo a la (UICN, Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, 2016), al aplicar la herramienta estimación del cambio en el área de disminución de un ecosistema, nos arroja dos escenarios alternativos de disminución, el (PRD) Tasa de reducción proporcional, el cual indica que el área perdida se reduce con el tiempo y el otro escenario (ARD) Tasa de disminución absoluta, indica que una área constante se pierde cada año, produciendo un patrón lineal de disminución.

Estos escenarios pueden ser modelados usando funciones exponenciales (PRD) y lineales (ARD), respectivamente. Los cambios predichos por estos modelos alternativos se vuelven más diferentes mientras son extrapolados más lejos en el futuro.

VII. RESULTADOS

A. INDICADORES POTENCIALES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE BOFEDALES EN LA RESERVA

En este capítulo se presenta los resultados de la recopilación de información, obtención de las imágenes satelitales, georreferenciación de la zona de estudio, corrección de las imágenes, procesamiento de información satelital y cálculos de índices espectrales de vegetación de la RPFCH y sus bofedales.

1. Recopilación de información

a. Recopilación de información secundaria

En base al método de investigación documental se recopiló los resultados obtenidos por (Andrade, 2016) en donde se identificó 16 zonas de estudio con las siguientes características:

Tabla 7. 11 Bofedales de la RPFCH

ID	Altitud	Área de estudio	U. Hidrográfica	Localización
01	4081	Cruz del Arenal 1	Río Llangana	Com. Cruz del Arenal/Guaranda/Bolívar
02	4043	Casa cóndor	Río Llangana	San Juan/Riobamba/Chimborazo
03	4312	Cruz del Arenal 1	Río Llangana	Com. Cruz del Arenal/Guaranda/Bolívar
04	4159	Culebrillas	Río Llangana	Com. Cruz del Arenal/Guaranda/Bolívar
05	3867	Puente Ayora	Río Chimbo	Com. Puente Ayora/Guaranda/Bolívar
06	4079	Pachancho	Río Chimbo	Com. Rincón de los Andes/Salinas de Guaranda/Bolívar
07	4145	Puente Ayora 1	Río Chimbo	Com. Puente Ayora/Guaranda/Bolívar
08	4108	Puente Ayora 2	Río Chimbo	Com. Puente Ayora/Guaranda/Bolívar
09	3839	Coop Santa Teresita	Río Chambo	San Juan/Riobamba/Chimborazo
10	4059	Cóndor Samana	Río Chambo	San Andrés/Guano/Chimborazo
11	4233	Los hieleros	Río Chambo	San Andrés/Guano/Chimborazo
12	4134	Portal Andino	Río Chambo	San Andrés/Guano/Chimborazo
13	4039	Lazabanza	Río Pastaza	Com. Lasabanza/Ambato/Tungurahua
14	3840	Pampas Salasaca	Río Pastaza	Tisaleo / Tungurahua
15	4314	Mechahuasca	Río Pastaza	Com. Rio Colorado/Ambato/Tungurahua
16	4153	Río Blanco	Río Pastaza	Com. Río Blanco/Ambato/Tungurahua

Fuente: (Andrade, 2016)

Cabe recalcar que de las 16 zonas de estudio se seleccionaron cinco bofedales poco intervenidos correspondientes a Mechahuasca, Río Blanco, Cruz del Arenal 2, Pampas Salasaca y Los hieleros. Para lo cual se identificó y georreferenció in-situ las zonas mejor conservadas de estos cinco bofedales mediante el Sistema de Posicionamiento Global GPS (Garmin eTrex Touch 35). Con una proyección UTM, Datum WGS84 y huso 17 Sur.

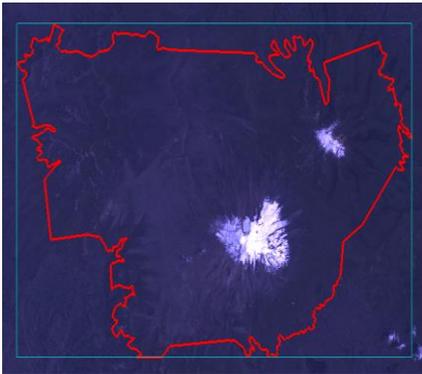
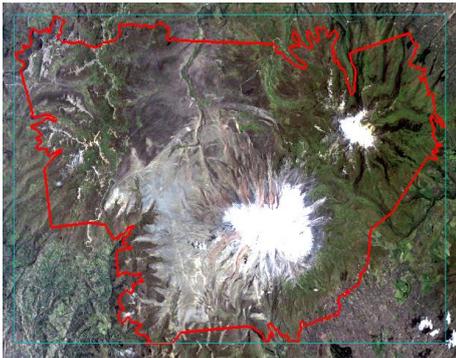
Con esta información y los shapefiles obtenidos del trabajo de investigación de (Andrade, 2016) se elaboró el mapa de ubicación de los bofedales de la RPFCH, a la vez que el mapa de los cinco bofedales estudiados para lo que se trabajó con las imágenes satelitales Landsat, obtenidas del Earthexplorer donde se extrajo la zona de la Reserva (Figura 7.45)

1) Información satelital

Una vez identificadas las zonas de estudio se obtuvieron cuatro imágenes de la RPFCH, capturadas por los satelitales LANDSAT 8 OLI, Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) y Landsat 5 TM, mismas que se sometieron a un proceso de calibración y corrección atmosférica a través del software *ENVI 5.1*

a) Calibración radiométrica

Tabla 7. 12 Calibración radiométrica imagen Landsat 5 TM año 1991

IMAGEN	Landsat 5 TM	CALIBRACIÓN RADIOMETRICA-MULTIBANDAS
Date: 15/10/1991		
Spatial Resolution : 30 x30 m		
Spatial Reference : WGS84 UTM ZONE 17S		
Sensor_Id : TM		
Cloud cover: 30.00		
	Figura 7.6 Imagen Landsat 5 TM año 1991	Figura 7.7 Imagen Landsat 5 TM año 1991 calibrada radiométricamente

Realizado por: Valeria Flores Cantos

Tabla 7.13 Calibración radiométrica imagen Landsat 7 ETM año 2001

IMAGEN	Landsat 7 ETM	CALIBRACIÓN RADIOMETRICA- MULTIBANDAS
Date: 02/10/2001		
Spatial Resolution 30 x30 m		
Spatial Reference: WGS84 UTM ZONE 17S		
Sensor_Id: ETM		
Cloud cover: 40.00		
	Figura 7.8 Imagen Landsat 7 ETM año 2001	Figura 7.9 Imagen Landsat 7 ETM año 2001 calibrada radiométricamente

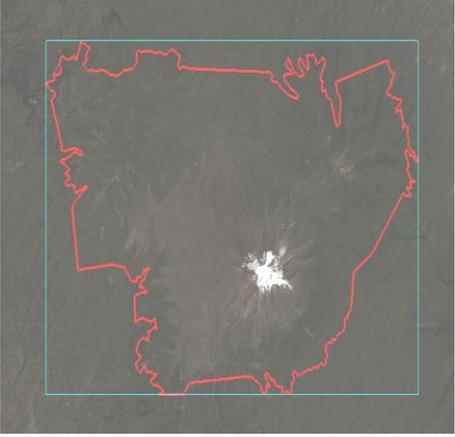
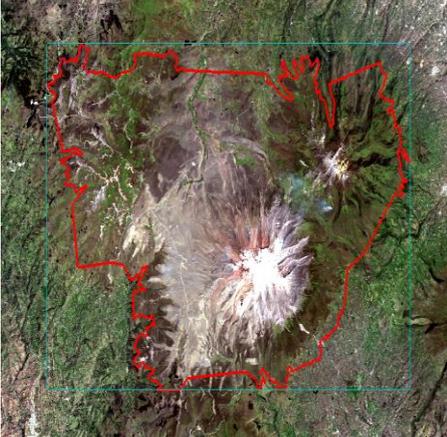
Realizado por: Valeria Flores Cantos

Tabla 7.14 Calibración radiométrica imagen Landsat 7 ETM año 2010

IMAGEN	Landsat 7 ETM	CALIBRACIÓN RADIOMETRICA- MULTIBANDAS
Date: 09/09/2010		
Spatial Resolution 30 x30 m		
Spatial Reference: WGS84 UTM ZONE 17S		
Sensor_Id: ETM		
Cloud cover: 27.00		
	Figura 7.10 Imagen Landsat 7 ETM año 2010	Figura 7.11 Imagen Landsat 7 ETM año 2010 calibrada radiométricamente

Realizado por: Valeria Flores Cantos

Tabla 7.15 Calibración radiométrica imagen Landsat 8 OLI año 2016

IMAGEN	Landsat 8 OLI	CALIBRACIÓN RADIOMETRICA- MULTIBANDAS
Date: 20/11/2016		
Spatial Resolution 30 x30 m		
Spatial Reference: WGS84 UTM ZONE 17S		
Sensor_Id: OLI_TIRS		
Cloud cover: 21.64.		

Realizado por: Valeria Flores Cantos

A través de los resultados de la calibración radiométrica se pudo rectificar las unidades de radiancia de los archivos multiespectrales de cada imagen, pasando de micrómetros y metros cuadrados a nanómetros y centímetros cuadrados con un valor de flash de 0,10. Este proceso se realizó principalmente para las dos imágenes Landsat 7 ETM cuya información se encuentra casi interrumpida debido a una falla de un instrumento del satélite por lo cual la información recolectada presenta una pérdida de un 22% de la información de cada imagen.

En el caso de las imágenes Landsat 8 OLI y 5 TM la corrección radiométrica se realizó para obtener una mejor calidad espectral y uniformidad en procesamiento de información.

b) Corrección atmosférica

Tabla 7. 16 Corrección Atmosférica imagen Landsat 5 TM - 1991

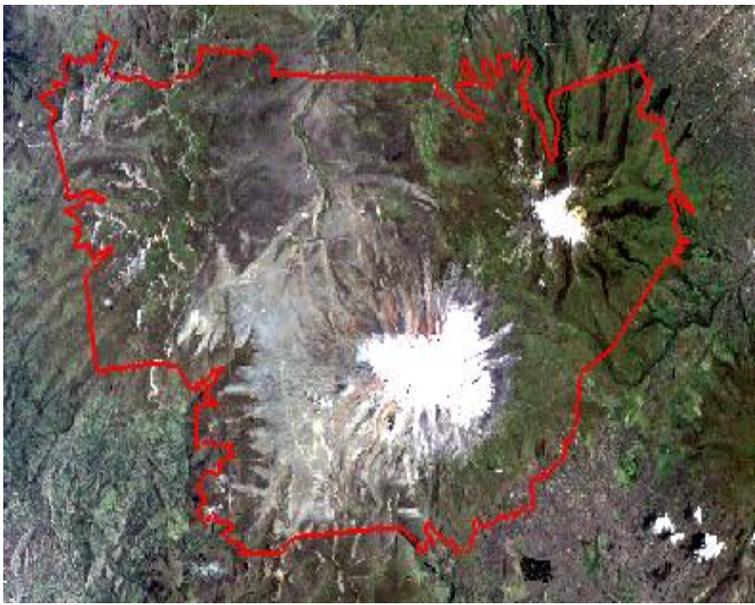
IMAGEN LANDSAT 5 TM – 1991	
Date: 15/10/1991	
Spatial Resolution 30 x30 m	
Spatial Reference: WGS84 UTM ZONE 17S	
Bandas: 6	
Color Verdadero: (4-3-2)	

Figura 7. 14 Color verdadero imagen Landsat 5 TM de 1991 (Corrección Atmosférica)

Realizado por: Valeria Flores Cantos

Según la corrección atmosférica de la imagen Landsat 5 TM de 1991, la vegetación de la RPFCH aparece en tonos verdes oscuros y los suelos varían entre una gama de colores marrones, mientras que la parte de los glaciares es representada de un color blanco. Según esta composición de bandas (color verdadero) llama la atención que la cobertura perteneciente a los bofedales se encuentra en su mayoría en la Provincia de Tungurahua y en partes homogéneas en las Provincias de Chimborazo y Bolívar. También se aprecia que existe mayor extensión del factor suelo.

Tabla 7.17 Corrección Atmosférica imagen Landsat 7 ETM - 2001

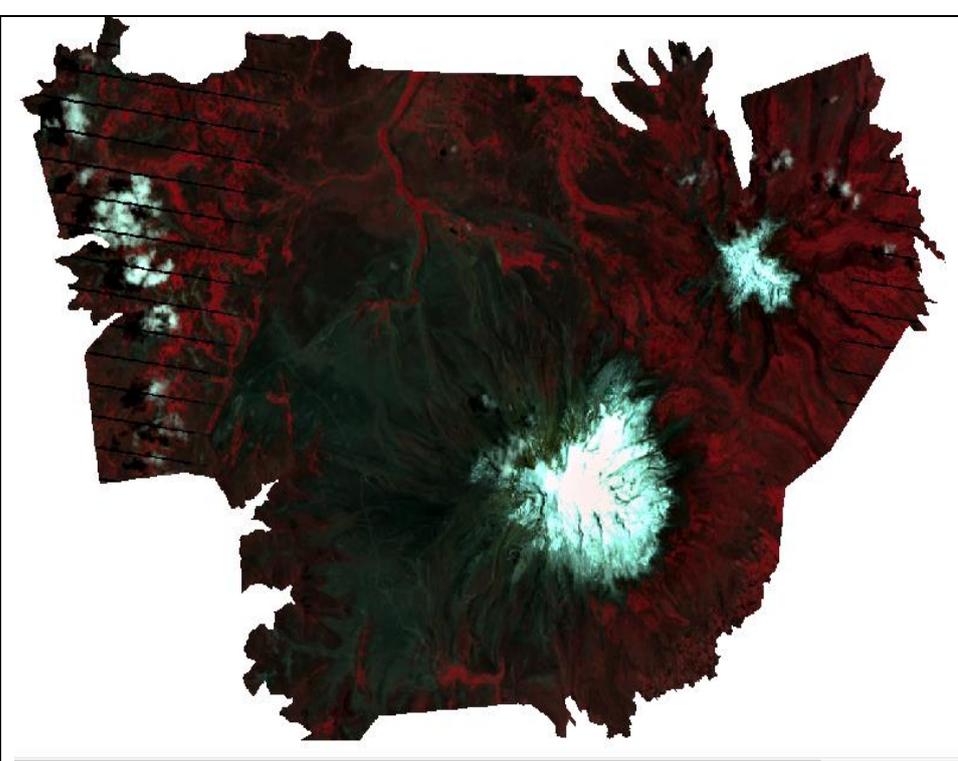
IMAGEN LANDSAT 7 ETM – 2001	
Date: 02/10/2001	
Spatial Resolution 30 x30 m	
Spatial Reference: WGS84 UTM ZONE 17S	
Bandas: 6	
Color Verdadero: (4-3-2)	
<p>Figura 7.15 Color verdadero imagen Landsat 7 ETM del 2001 (Corrección Atmosférica)</p>	

Realizado por: Valeria Flores Cantos

La corrección atmosférica de la imagen Landsat 7 ETM del 2001, muestra que el estado de vegetación de la RPFCH aparece en tonos rojizos y sus suelos varían entre una gama de colores azules y verdes. Según esta composición de bandas (color verdadero) nos indica que en la parte de la provincia de Bolívar y Tungurahua existe una cobertura boscosa en donde se puede registrar presencia de bofedales.

A la vez en la Figura 7.15 se puede valorar que no existe presencia de error de corrección de bandas por lo que no existe pérdida de información de la imagen satelital.

Tabla 7.18 Corrección Atmosférica imagen Landsat 7 ETM – 2010

IMAGEN LANDSAT 7 ETM – 2010	
Date: 09/09/2010	
Spatial Resolution 30 x30 m	
Spatial Reference: WGS84 UTM ZONE 17S	
Bandas: 6	
Color Verdadero: (4-3-2)	<p>Figura 7.16 Color verdadero imagen Landsat 7 ETM del 2010 (Corrección Atmosférica)</p>

Realizado por: Valeria Flores Cantos

Según la corrección atmosférica de la imagen Landsat 7 ETM del 2010, la vegetación de la RPFCH aparece en tonos rojos y los suelos varían entre una gama de colores verdes. Mientras que la parte de los glaciares y la poca presencia de nubes son representadas de un color blanco.

Según esta composición de bandas (color verdadero) nos indica que existe una pequeña pérdida de información en la zona correspondiente a Bolívar, pese que no es mucha la presencia de este error de corrección de bandas, se puede distinguir que la distribución de los bofedales se presenta en una gama de color rojo oscuro.

Tabla 7. 19 Corrección Atmosférica imagen Landsat 8 OLI 2016

IMAGEN LANDSAT 8 OLI – 2016	
Date: 20/11/2016	
Spatial Resolution 30 x30 m	
Spatial Reference: WGS84 UTM ZONE 17S	
Bandas: 7	
Color Verdadero: (4-3-2)	
<p>Figura 7.17 Color verdadero imagen Landsat 8 OLI del 2016 (Corrección Atmosférica)</p>	

Realizado por: Valeria Flores Cantos

De acuerdo a la corrección atmosférica de la imagen Landsat 8 OLI del 2016, el estado de vegetación de la RPFCH aparece en tonos verdes obscuro y los suelos varían entre la gama de colores cafés y negros. Según esta composición de bandas (color verdadero) nos indica que la distribución de los bofedales en su mayoría se encuentra en la provincia de Tungurahua.

b. Recopilación de información primaria

Se realizó cinco salidas de campo del 27 de Julio al 08 de Agosto del 2017, en cuyos recorridos se tomaron fotografías de cada bofedal y se realizó una delimitación in-situ de las zonas mejor conservadas de cada uno, tomando como referencia zonas con áreas de 30 x 30 metros o más. Obteniendo así veinte áreas cuyas características más importantes se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 7. 20 Zonas mejor conservadas

Cuadrante	Bofedal	Área de estudio	Provincia	U. Hidrográfica	Perímetro	Área	X	Y
1	Cruz del arenal 1	Cruz del arenal 1	Bolívar	Río Llangana	492.451	5548.75	730779	9844910
2		Cruz del arenal 2	Bolívar	Río Llangana	138.2	1136.5	731193	9844650
3		Cruz del arenal 3	Bolívar	Río Llangana	545.992	5467.93	731486	9844740
4		Cruz del arenal 4	Bolívar	Río Llangana	704.818	18523.2	731677	9844620
5		Cruz del arenal 5	Bolívar	Río Llangana	312.763	2676.09	731820	9844740
6		Cruz del arenal 6	Bolívar	Río Llangana	908.176	10920.1	731847	9844930
7		Cruz del arenal 7	Bolívar	Río Llangana	255.874	1991.34	731890	9845110
8		Cruz del arenal 8	Bolívar	Río Llangana	486.321	4879.77	731827	9845140
9	Los Hieleros	Los Hieleros	Chimborazo	Río Chambo	217.001	561.75	746260	9833230
10	Pampas Salasacas	Pampas Salasacas 1	Tungurahua	Río Pastaza	847.742	10412.3	755716	9845360
11		Pampas Salasacas 2	Tungurahua	Río Pastaza	110.303	477	755737	9845520
12		Pampas Salasacas 3	Tungurahua	Río Pastaza	559.992	9765.06	755298	9845420
13		Pampas Salasacas 4	Tungurahua	Río Pastaza	132.652	1010.41	755170	9845410
14		Pampas Salasacas 5	Tungurahua	Río Pastaza	480.354	10098.1	754849	9845400
15		Pampas Salasacas 6	Tungurahua	Río Pastaza	147.508	1106.26	754606	9845680
16		Pampas Salasacas 7	Tungurahua	Río Pastaza	305.796	3780.6	754490	9845790
17	Rio Blanco	Rio Blanco 1	Tungurahua	Río Pastaza	1231.65	48043.6	746338	9848920
18		Rio Blanco 2	Tungurahua	Río Pastaza	362.258	5886.07	746010	9848960
19		Rio Blanco 3	Tungurahua	Río Pastaza	425.663	6925.78	745659	9849140
20	Mechahuasca	Mechahuasca	Tungurahua	Río Pastaza	157.51	1197.59	744615	9843080

Nota: Trabajo de campo, 2017

Realizado por: Valeria Flores Cantos

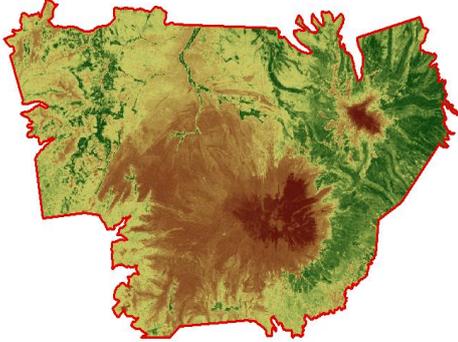
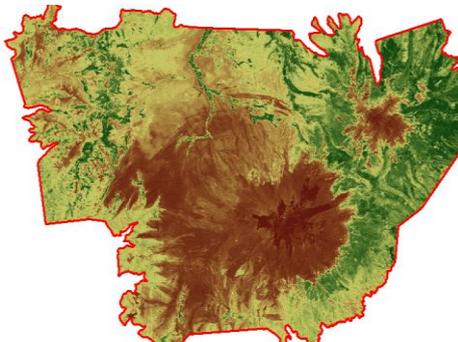
De acuerdo a la tabla 7.20 se evidencia que existen 20 zonas en mejor estado de conservación en donde se identifica 8 áreas pertenecientes al bofedal Cruz del Arenal 1 en la provincia de Bolívar, 11 áreas en Tungurahua de las cuales siete pertenecen al bofedal Pampas Salasacas, tres al bofedal Río Blanco y una al bofedal Mechahuasca. Mientras que en la provincia de Chimborazo solo se identificó un área en mejor estado perteneciente al bofedal los Hieleros en la cuenca hidrográfica Río Chambo.

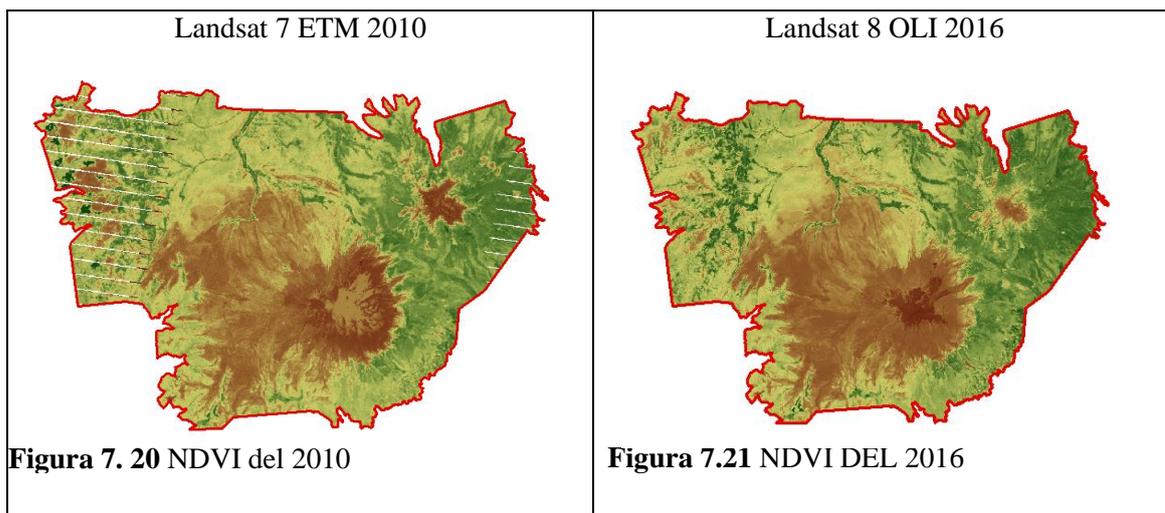
2. Desarrollo de indicadores potenciales

Para el cumplimiento de esta fase, en primera instancia, se calcularon los 5 índices de vegetación espectral (NDVI, SAVI5, SAVI15, NDWI y SWIR) con sus fórmulas respectivamente en el software *ENVI 5.1* y se creó un DEM en el software *ArcGis 10.3*. Por lo cual este grupo de variables nos sirvieron como indicadores potenciales para la predicción de bofedales; a continuación se realiza una comparación gráfica de los índices espectrales de las cuatro imágenes satelitales tratadas con su respectiva descripción e importancia para ser consideradas como variables predictoras:

a. (NDVI) Índice Normalizado Diferencial de Vegetación

Tabla 7.21 Cálculo del NDVI en la RPFCH

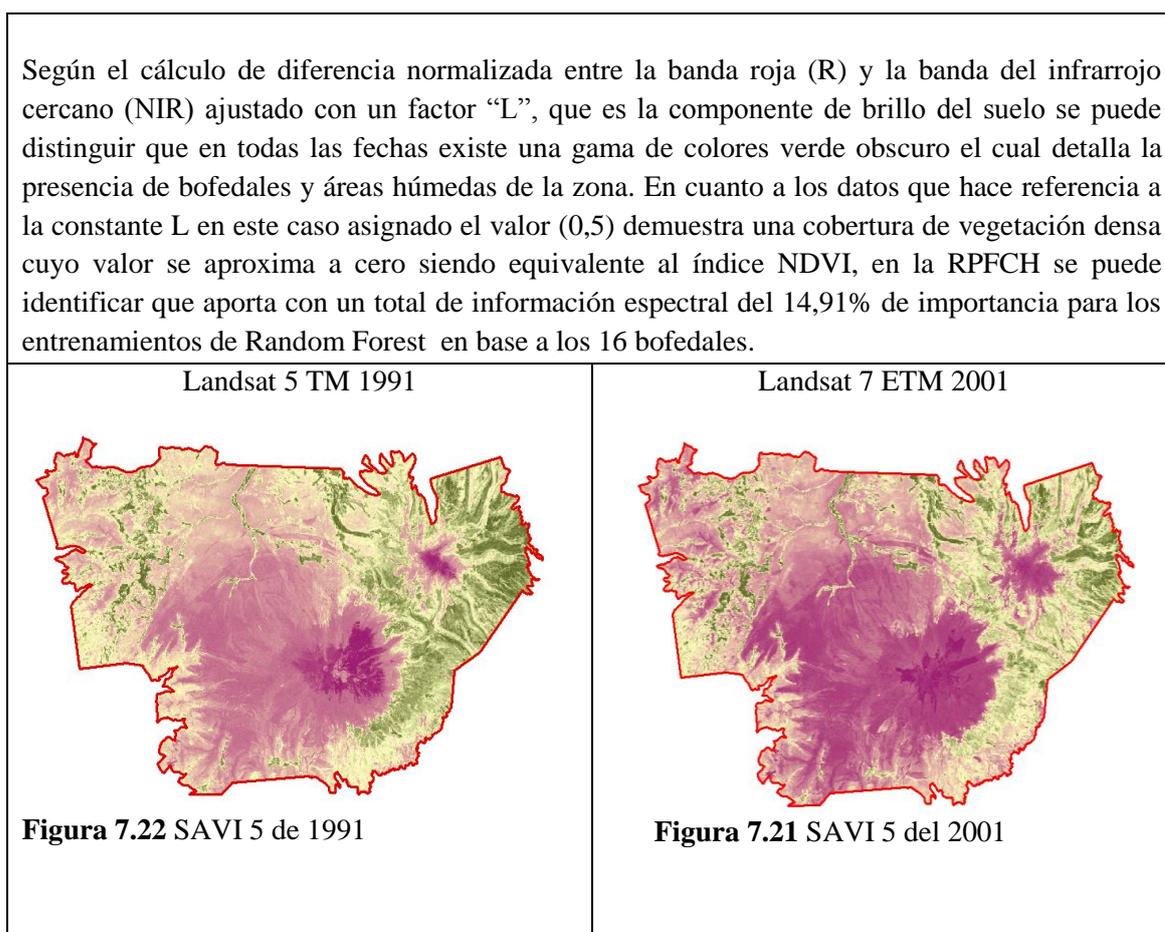
<p>De acuerdo al cálculo de la banda roja y el cercano infrarrojo de las imágenes se puede mostrar que en todas las fechas existe una buena presencia del color verde que detalla los bofedales y áreas húmedas de la RPFCH a la vez se puede distinguir que existe mayor presencia de zonas de poca vegetación o vegetación dispersa que está representada por la gama de colores marrones. Mientras que el color marrón oscuro muestra la dimensión de expansión de los glaciares del nevado Chimborazo y Carihuairazo. El NDVI está directamente relacionado a producción primaria (fotosíntesis-clorofila), en la RPFCH se puede identificar que aporta con un total de información espectral del 75,66% de importancia para los entrenamientos de Random Forest en base a los 16 bofedales.</p>	
<p>Landsat 5 TM 1991</p> 	<p>Landsat 7 ETM 2001</p> 
<p>Figura 7.18 NDVI de 1991</p>	<p>Figura 7.19 NDVI del 2001</p>

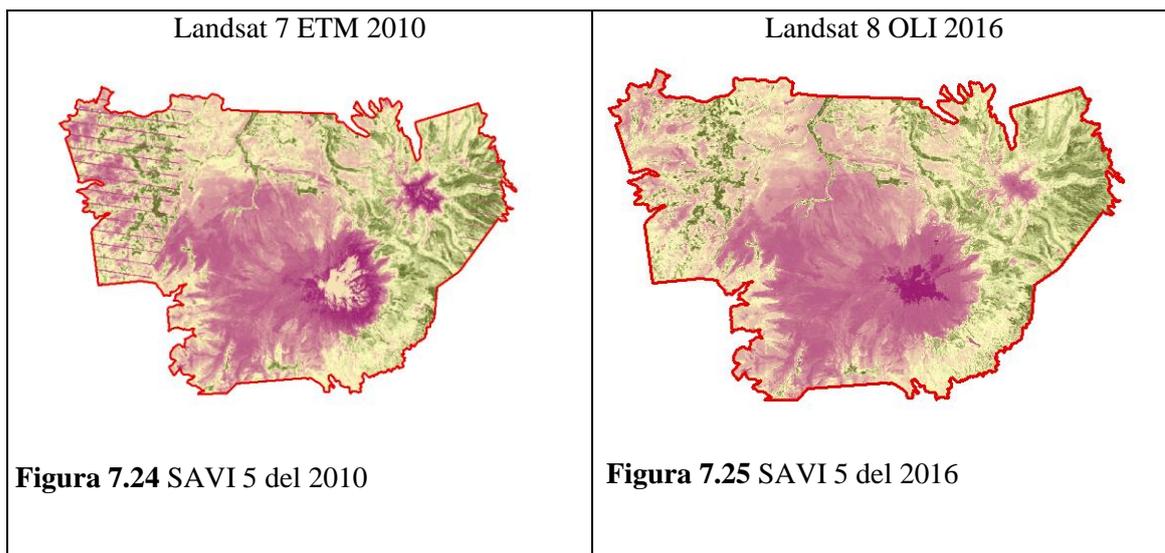


Realizado por: Valeria Flores Cantos

b. (SAVI 5) Índice de Vegetación ajustado con el suelo

Tabla 7.22 Cálculo del SAVI5 en la RPFCH



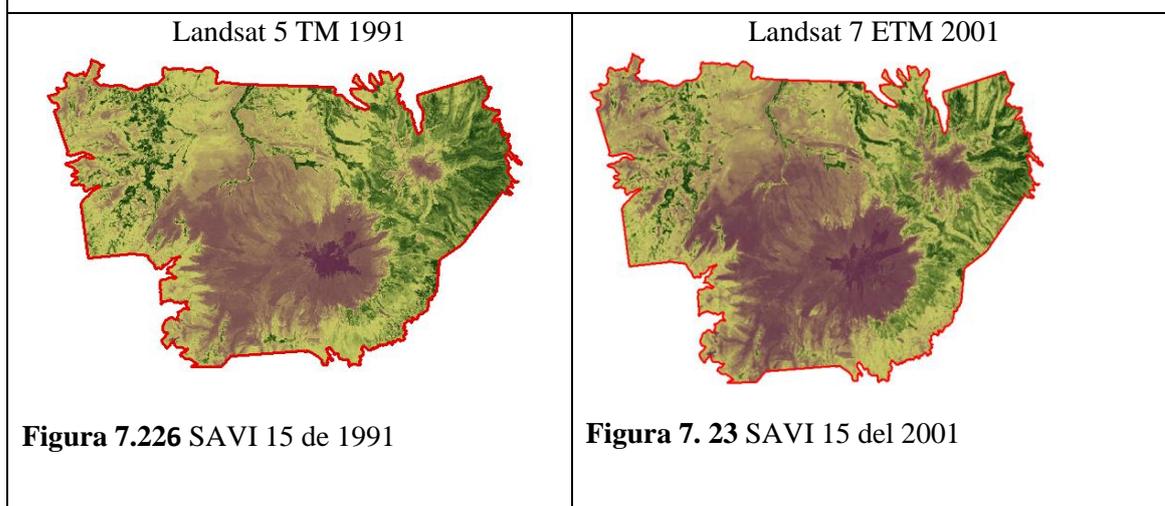


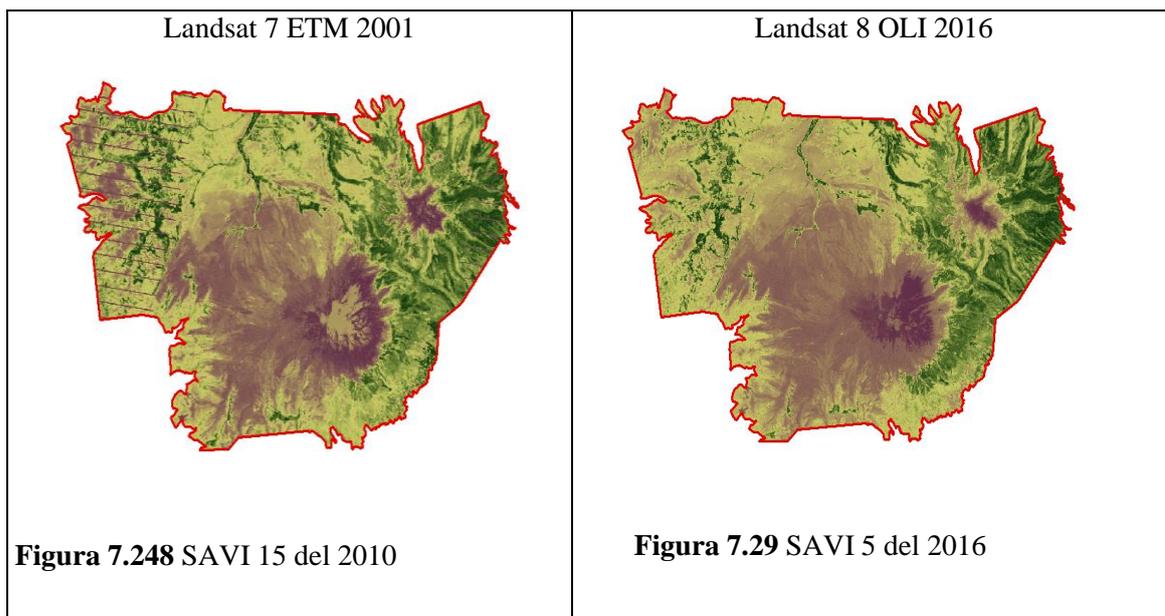
Realizado por: Valeria Flores Cantos

c. (SAVI 15) Índice de Vegetación ajustado con el suelo

Tabla 7.23 Cálculo del SAVI 15 en la RPFCH

Como se puede identificar según el cálculo de 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 se puede distinguir que en las 4 fechas existe poca extensión de color verde oscuro el cual detalla la presencia de bofedales y gran parte de color verde claro que detalla las áreas húmedas de la zona. En cuanto a los datos que hace referencia a la constante “L” en este caso asignado el valor (0,15) demuestra una cobertura de vegetación perteneciente a un terreno semidesnudo con poca o ninguna cobertura vegetal. Por ende la constante “L” en la expresión del indicador SAVI debe poseer un valor de 0,15 para que la importancia del SAVI en la RPFCH pueda contribuir con un total de información espectral del 32,93% en base a los 16 bofedales. Con el valor de $L = 0,15$ el índice espectral SAVI aporta la mayor información al clasificador y contribuye a una disminución de la entropía de Shannon.

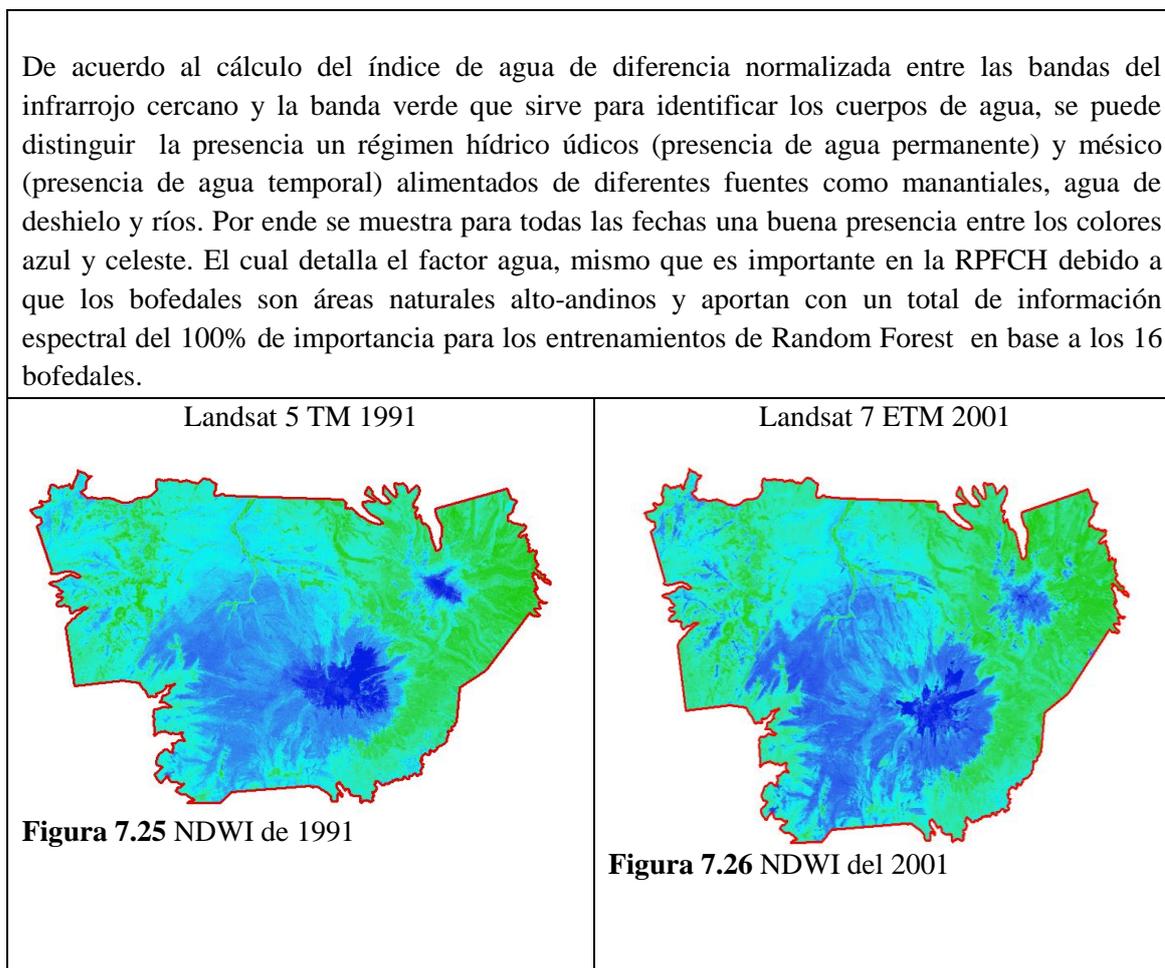


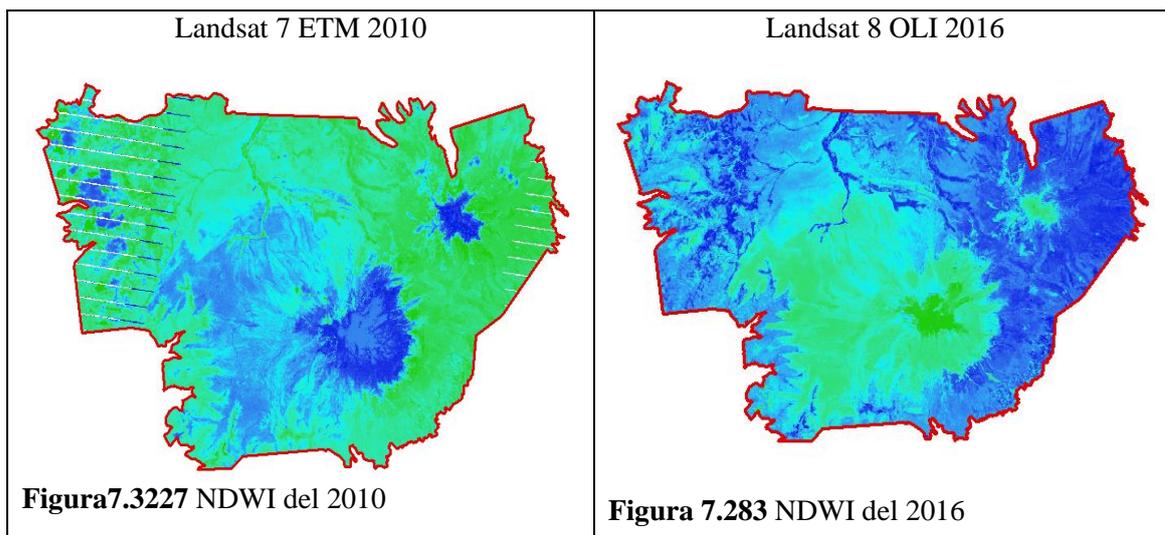


Realizado por: Valeria Flores Cantos

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

Tabla 7.24 Cálculo del NDWI en la RPFCH

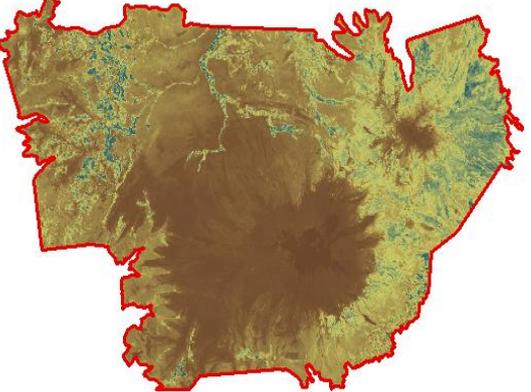
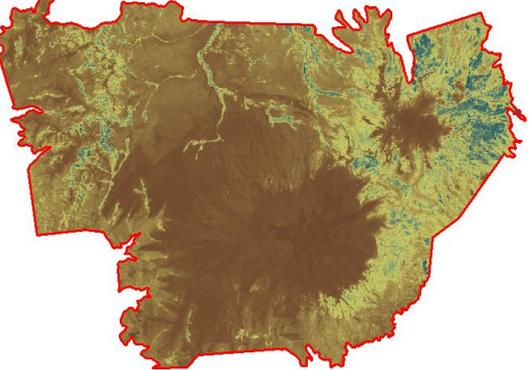


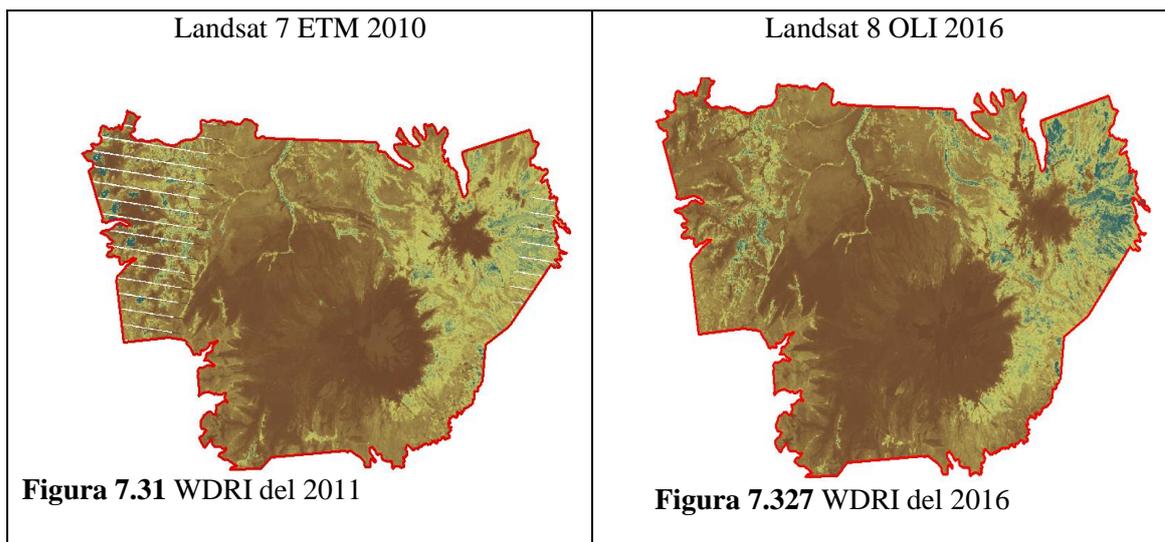


Realizado por: Valeria Flores Cantos

e. **(WDRI) Índice de vegetación de rango dinámico amplio**

Tabla 7.25 Cálculo del WDRI en la RPFCH

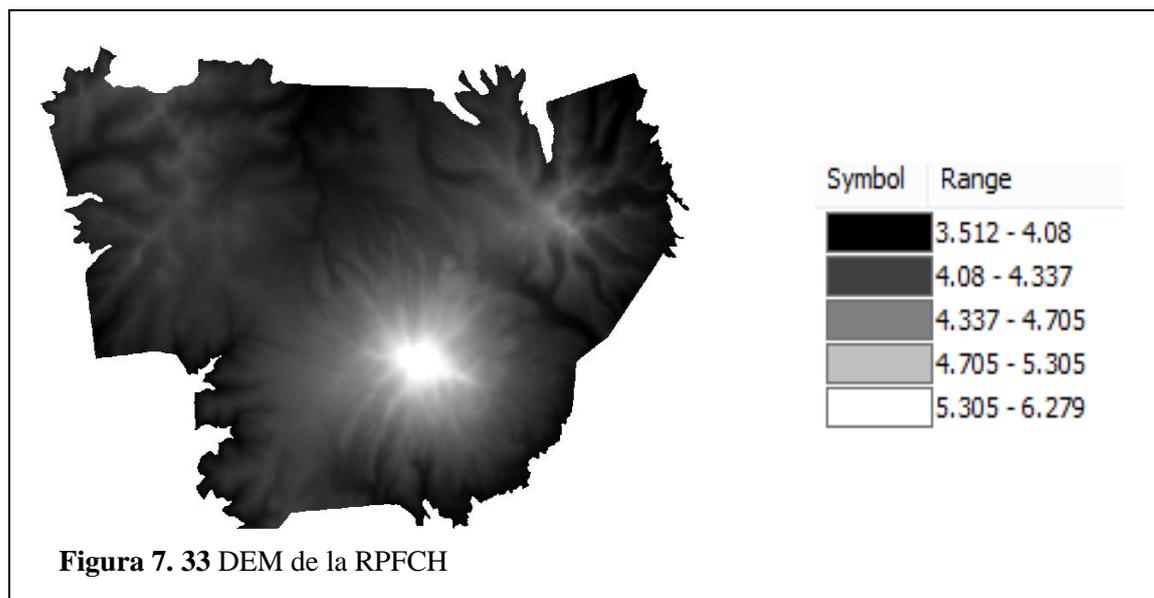
<p>El WDRI es una transformación algebraica del NDVI por lo tanto el cálculo entre las bandas del infrarrojo cercano y la banda roja muestra para las cuatro imágenes la presencia de mayor sensibilidad al índice de área floreal. A la vez esta fórmula aplica la constante “a” que posee un valor de 0.05 que es importante en la RPFCH debido a que contribuye con un factor de información espectral de (58,69%) de importancia para los entrenamientos de Random Forest en base a los 16 bofedales.</p>	
<p style="text-align: center;">Landsat 5 TM 1991</p>  <p>Figura 7.29 WDRI de 1991</p>	<p style="text-align: center;">Landsat 7 ETM 2001</p>  <p>Figura 7.305. WDRI del 2001</p>



Realizado por: Valeria Flores Cantos

f. (DEM) Modelo de elevación digital

Tabla 7.26 Valores de clasificación del DEM



Nota: (SIG Tierras, 2015)

Realizado por: Valeria Flores Cantos

De acuerdo a las altitudes registradas en los 16 bofedales identificados por (Andrade, 2016) existe una variancia entre los 3839 msnm a los 4314 msnm, por ende el DEM que se generó a través de las curvas de nivel de toda el área de la RPFCH registra altitudinales de 6279 msnm a 3512 msnm, mismos que fueron considerados como un indicador de información espectral debido a que es un variable que aporta con un 0,65% de importancia para los entrenamientos de Random Forest en base a los 16 bofedales.

B. ALGORITMO RANDOM FOREST PARA DETECTAR BOFEDALES EN LA RESERVA

Después de identificar los índices espectrales de vegetación de las imágenes satelitales y el DEM de la RPFCH, se realizaron tres entrenamientos en el software *Random Forest* con la imagen satelital Landsat 8 OLI correspondiente al 20 de noviembre 2016 para lo cual se consideró la información obtenida del procesamiento de información en el software *ArcGis 10.3* de los shapefiles de los 16 bofedales identificados por (Andrade, 2016), de los 5 bofedales bajo intervenidos y de las 20 zonas en mejor estado de conservación, correspondientes a los bofedales de Mechahuasca, Río Blanco, Cruz del Arenal, Pampas Salasacas y Los Hieleros.

A continuación se detalla los resultados y discusión de los tres entrenamientos aplicando el algoritmo de aprendizaje automático Random Forest:

1. Aplicación del algoritmo de clasificación Random Forest en base a los 16 bofedales (primer entrenamiento)

Las variables a utilizarse en el primer entrenamiento corresponde a la variable topográfica “Altitud” *DEM_30* y los índices espectrales de vegetación: *NDWI*, *WDRI*, *NDVI*, *SAVI15* y *SAVI5*. Con este grupo de variables predictoras el porcentaje global de categorizaciones correctas realizadas con el subconjunto de datos OOB (Porcentaje global de correctas) fue de 97.88 % (Tabla 7.26).

Este valor es bastante aceptable si se considera las dificultades que ofrece la región de estudio y que solo se usa 7396 píxeles para el entrenamiento del algoritmo. El porcentaje de clasificaciones correctas de píxeles pertenecientes a las dos categorías: bofedal (1) y distinto de bofedal (2); fue de 97,44% y 99,44%, respectivamente, de 5777 y 1619 píxeles asociados a cada una de las clases; el clasificador categorizó correctamente 5629 datos pertenecientes a bofedal y 1610 de distinto a bofedal.

Tabla 7.27 Matriz de confusión primer entrenamiento

Clase	Total de píxeles	Porcentaje de correctas	Predicción – Clases	
			Bofedal N = 5638	Distinto a Bofedal N = 1758
(1) Bofedal	5777	97.44 %	5629	148
(2) Distinto a Bofedal	1619	99.44 %	9	1610
Total puntos (píxeles)	7396			
Porcentaje promedio de correctas		98,44 %		
Porcentaje global de correctas		97,88 %		

Nota: Trabajo de campo (Random Forest, 2017)

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	
NDWI_FUL_2	100.00	
NDVI_FUL_2	75.66	
WDRI_FUL_2	58.69	
SAVI15_F_2	32.93	
SAVI5_FU_2	14.91	
DEM_30_32	0.65	

Figura 7.349 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, 2017)

Como se puede apreciar en la Figura 7.39, los índices o variables que aportan con más información para la categorización u predicción de bofedales en la RFCH corresponde al NDWI con una importancia relativa del 100%. Así, la Altitud del DEM no contribuye significativamente a incrementar la precisión de la categorización de bofedales. Por ende el índice espectral NDWI usa los valores de reflectancia medidos en las bandas del cercano infrarrojo y del verde para cuantificar la presencia de los cuerpos de agua pertenecientes a los 16 bofedales.

A la vez los índices que aportan con menor información corresponden al NDVI con una importancia relativa del 75,66%; el índice WDRI que tiene una importancia relativa de 58,69%; el índice SAVI al 0,15 de la constante L obtuvo un valor de 32,93%, más del doble del valor obtenido por SAVI al 0,5 que obtuvo 14,91%.

Con este aporte de los índices como variables predictoras, se pudo representar los resultados arrojados por RF del primer entrenamiento realizado en base a los 16 bofedales en el siguiente mapa:

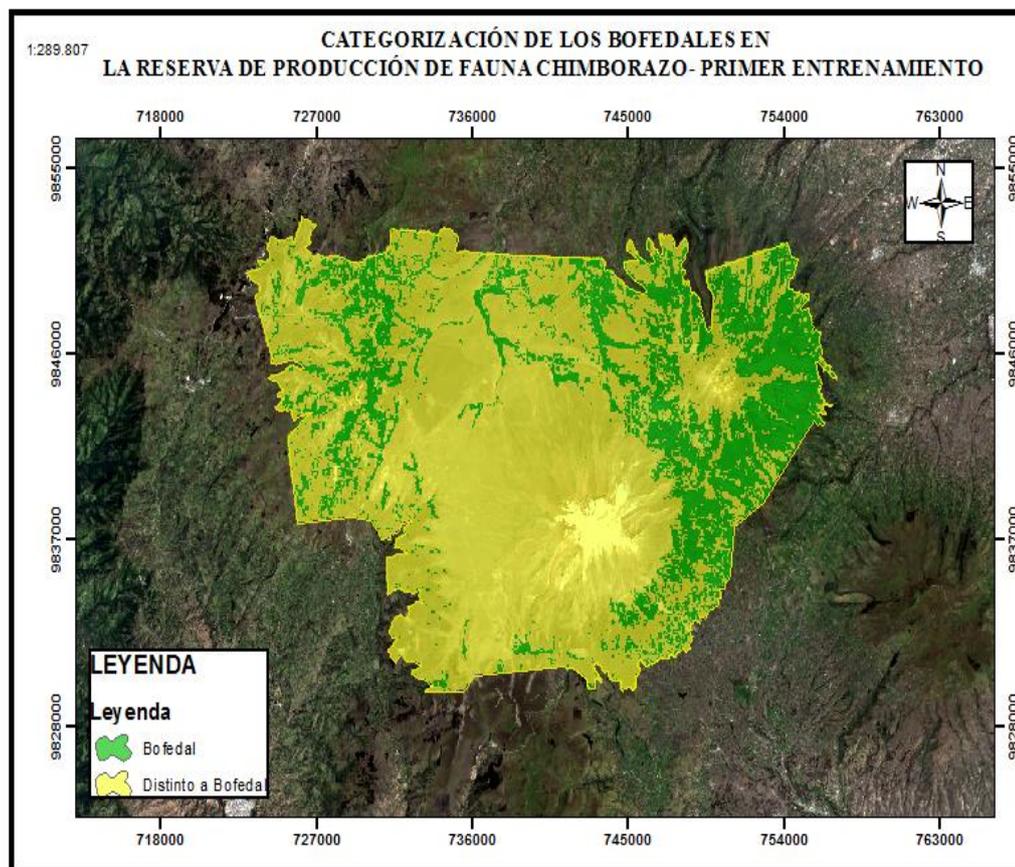


Figura 7.40 Mapa que resulta de la categorización realizada por el algoritmo de clasificación RF de todos los pixel asociados a la región de estudio (primer entrenamiento)
Nota: Trabajo de campo (Random Forest, 2017)

En la Figura 7.40 correspondiente al mapa que resulta de la categorización realizada por el algoritmo de clasificación RF en base al primer entrenamiento se puede apreciar la distribución de las variables categorizadas como bofedal de color verde oscuro y de color amarillo a las zonas no consideradas como bofedales.

A través de la Tabla 7.28 se puede observar los valores relativos expresados en valores porcentuales del área de terreno cubierta por cada categoría, así como el área en ha.

Tabla 7.28 Área relativa y absoluta ocupada por Bofedal y Distinto de Bofedal definida en el primer entrenamiento

Cobertura	Área relativa, %	Área, ha
Bofedal	36,74	19.353,24
Distinto de Bofedal	63,26	33.329,25
Total	100	52.682,49

Nota: Trabajo de campo, 2017

Según los resultados obtenidos, la RPFCH en base al primer entrenamiento presenta un total del 36,74% de área perteneciente a bofedales y el 63,26% restante a zonas distintas a bofedales los cuales equivalen a un 19353,24 ha y 33329,49 ha respectivamente.

2. Aplicación del algoritmo de clasificación Random Forest en base a 5 bofedales medianamente intervenidos (segundo entrenamiento)

El segundo entrenamiento se realizó en base a cinco bofedales que son considerados como medianamente intervenidos y corresponden a Mechahuasca, Río Blanco, Cruz del Arenal, Pampas Salasacas y Los Hieleros distribuidos en las provincias de Tungurahua, Bolívar y Chimborazo. Para este entrenamiento se volvió a trabajar con la imagen capturada por el satélite Landsat 8 OLI, del 20 de noviembre del 2016.

A partir de esta información se trabajó con los cinco shapefiles de los bofedales para lo que se realizó el procesamiento de información generado en el software *ArcGis* 10.3 en donde se identificó 2825 puntos de referencia geográfica, 1584 puntos corresponden a la clase bofedal y 1241 correspondientes a la clase distinto a bofedal, estos puntos fueron distribuidos homogéneamente en la imagen. Los resultados obtenidos en el entrenamiento del algoritmo RF se detallan en la siguiente matriz de confusión:

Tabla 7.29 Matriz de confusión segundo entrenamiento

Clase	Total de píxeles	Porcentaje de correctas	Predicción – Clases	
			Bofedal N = 1414	Distinto a Bofedal N = 1411
(1) Bofedal	1584	85.23%	1350	234
(2) Distinto a Bofedal	1241	94.84 %	64	1177
Total puntos (píxeles)	2825			
Porcentaje promedio de correctas		90.04 %		
Porcentaje global de correctas		89.45 %		

Nota: Trabajo de campo (Random Forest, 2017)

De acuerdo al porcentaje global de categorizaciones correctas realizadas con el subconjunto de datos OOB (Porcentaje global de correctas) como se indica en la Tabla 7.29. Se obtuvo un valor aceptable del 89.45 % el cual es bastante considerable debido a que los cinco bofedales estudiados presentaron un total de 2825 píxeles y fueron distribuidos equitativamente para las dos variables de estudio bofedal (1) y distinto de bofedal (2).

Presentando así un porcentaje de clasificaciones correctas de píxeles de 85.23% y 94.84%, correspondientemente a 1584 píxeles a bofedal y 1241 píxeles distinto a bofedal; el clasificador categorizó correctamente 1414 datos pertenecientes a bofedal y 1411 de distinto a bofedal. Con esta información las variables que se utilizaron en el segundo entrenamiento, para la aplicación del algoritmo Random Forest corresponden a la variable topográfica “Altitud” *DEM_30* y los índices espectrales de vegetación: *NDWI*, *WDRI*, *NDVI*, *SAVI15* y *SAVI5*. Mismos que representaron los siguientes porcentajes:

Variable Importance		
Variable	Score	
SAVI15	100.00	
SAVI5	83.53	
NDWI	57.80	
NDVI	17.90	
WDRI	16.13	
DEM_30	4.19	

Figura 7.4135 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, 2017)

La importancia de las variables predictoras en términos de la distribución promedio muestra que los índices o variables que aportan con mayor información para la categorización o predicción de bofedales en la RFCH en el segundo entrenamiento, corresponden al índice SAVI al 0,15 de la constante L el cual obtuvo un valor de 100%, en donde la diferencia del valor obtenido por SAVI al 0,5 con 83.53% no varía mucho.

Mientras que los índices que aportan con menor información para la predicción de bofedales corresponden al NDWI con una importancia relativa del 57.80%, NDVI con una importancia del 17.90%, WDRI con un importancia relativa del 16,13%, y el Así, la Altitud del DEM no contribuye significativamente a incrementar la precisión de la categorización de bofedales con una importancia del 4.19%. Con este aporte de los índices como variables predictoras, se pudo representar los resultados arrojados por RF del segundo entrenamiento en el siguiente mapa:

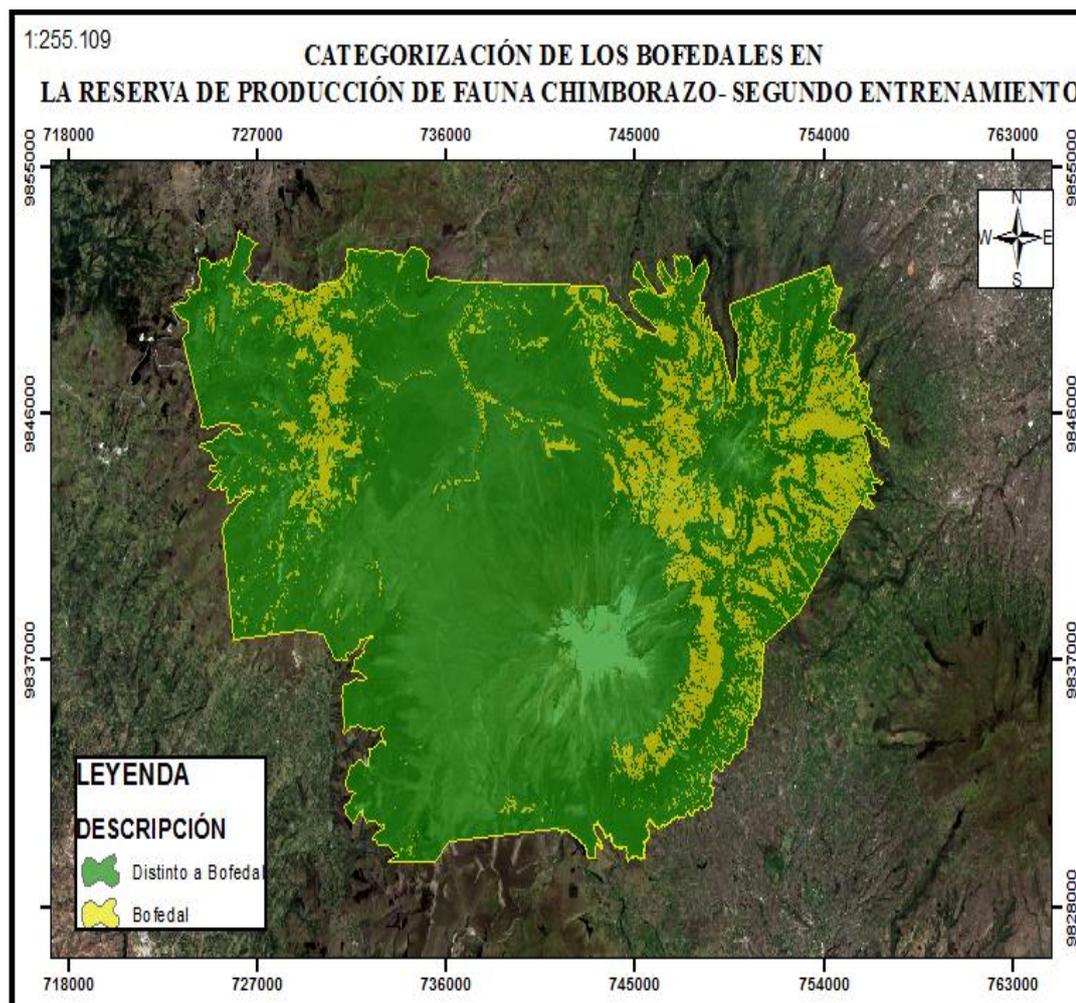


Figura 7.4236 Mapa que resulta de la categorización realizada por el algoritmo de clasificación RF de todos los pixel asociados a la región de estudio (segundo entrenamiento)

Nota: Trabajo de campo (Random Forest, 2017)

Tabla 7.30 Área relativa y absoluta ocupada por Bofedal y Distinto de Bofedal definida en el segundo entrenamiento

Cobertura	Área relativa, %	Área, ha
Bofedal	15.84%	8.341,65
Distinto de Bofedal	84.16%	44.323,92
Total	100	52.665,57

Nota: Trabajo de campo, 2017

Mediante la Figura 7.42 y la Tabla 7.30 se puede identificar que la aplicación del algoritmo RF en el segundo entrenamiento, arrojó como resultado que un 15,84% corresponde a las zonas de los bofedales representado por el color verde claro que representa un total de ha de 8.341,65,

mientras que el 84,16% restante corresponde a las zonas distintas a los bofedales representado por el color naranja con un total de 44.323,92 ha que corresponden a RPFCH.

3. Aplicación del algoritmo de clasificación Random Forest en base a las 20 zonas mejor conservadas (tercer entrenamiento)

El tercer entrenamiento se realizó en base a las salidas de campo en donde se georreferencio las zonas mejor conservadas de los 5 bofedales medianamente intervenidos pertenecientes a las provincias de Tungurahua, Bolívar y Chimborazo. Obteniendo así 20 zonas de estudio: 1) Los Hieleros (Chimborazo); (8) Cruz del arenal (Bolívar); (7) Pampas Salasacas, (3) Río Blanco y (1) Mechahuasca (Tungurahua). La generación de esta información in-situ fue importante para obtener resultados más depurados y certeros en el presente entrenamiento, el cual apporto para el análisis multitemporal de los bofedales en la RPFCH.

Por ende en las salidas de campo se tomó en cuenta cuadrantes de 30X30 metros correspondientes a las dimensiones de los pixeles de las imágenes y se volvió a trabajar con la imagen capturada por el satélite Landsat 8 OLI, del 20 de noviembre del 2016. A partir del levantamiento de esta información in-situ se generaron los polígonos correspondientes que se emplearon para el procesamiento de información en el software *ArcGis 10.3* en donde se generó un total de 346 puntos de referencia geográfica de las zonas mejor conservadas, 178 puntos corresponden a la clase bofedal y 168 correspondientes a la clase distinto a bofedal, estos puntos fueron distribuidos homogéneamente en la imagen.

Los resultados arrojados por el algoritmo RF se detallan a continuación:

Tabla 7.31 Matriz de confusión tercer entrenamiento

Clase	Total de pixeles	Porcentaje de correctas	Predicción - Clases	
			Bofedal N = 170	Distinto a Bofedal N = 176
(1) Bofedal	178	93.82%	167	11
(2) Distinto a Bofedal	168	98.21 %	3	165
Total puntos (pixeles)	346			
Porcentaje promedio de correctas		96,02%		
Porcentaje global de correctas		95.95 %		

Nota: Trabajo de campo (Random Forest, 2017)

Según el porcentaje global de categorizaciones correctas realizadas el subconjunto de datos OOB (Porcentaje global de correctas) como se indica en la Tabla 7.30, se obtuvo un valor del 96,02% el cual es un porcentaje considerable debido a la depuración de información de las 20

zonas muestreadas. En donde se generaron 346 píxeles y fueron distribuidos equitativamente para las dos variables de estudio bofedal (1) y distinto de bofedal (2). Presentando así un porcentaje de clasificaciones correctas de píxeles del 95,95% correspondientemente a ambos valores de los píxeles asociados a cada clase; el clasificador categorizó correctamente 178 datos pertenecientes a bofedal y 168 de distinto a bofedal.

Con esta información las variables que se utilizaron en el tercer entrenamiento, para la aplicación del algoritmo Random Forest corresponden a la variable topográfica “Altitud” *DEM_30* y los índices espectrales de vegetación: *NDWI*, *WDRI*, *NDVI*, *SAVI5* y *SAVI15*. Mismos que obtuvieron los siguientes porcentajes:

Variable Importance		
Variable	Score	
NDVI	100.00	
WDRI	78.97	
NDWI	73.87	
SAVI5	71.48	
SAVI15	44.61	
DEM_30	1.36	

Figura 7.37 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, 2017)

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Figura 7.43 del tercer entrenamiento se puede identificar que los índices o variables que aportan con mayor información para la categorización o predicción de bofedales en la RFCH en base a las 20 zonas mejor conservadas, corresponden al índice NDVI el cual obtuvo un valor del 100% siendo que este índice proporciona mayor información sobre la cobertura vegetal de los bofedales usando los valores de reflectancia medios en las bandas del infrarrojo cercano y de la banda rojo. A la vez se puede apreciar que los índices que aportan con menor información para la predicción de bofedales corresponden al WDRI con una importancia del 78.97%, el NDWI con un importancia relativa del 73.87%, el SAVI 5 con un 71.48%

En donde la diferencia del valor obtenido por SAVI al 0,15 es de 44.61%, mismos que contribuyen a la disminución de la entropía de Shannon. Por último se puede identificar que la Altitud del DEM no contribuye significativamente a incrementar la precisión de la categorización de bofedales. Con este aporte de los índices como variables predictoras, se representaron los siguientes resultados:

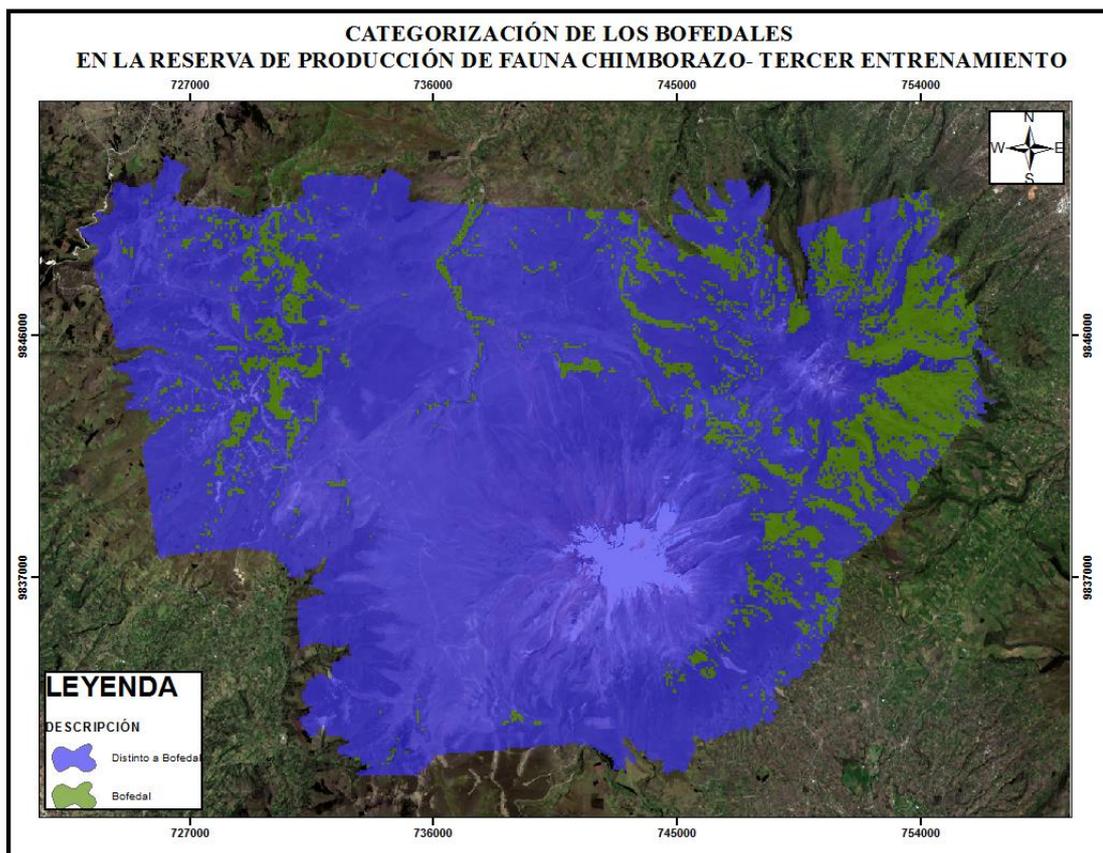


Figura 7.38 Mapa que resulta de la categorización realizada por el algoritmo de clasificación RF de todos los pixel asociados a la región de estudio (tercer entrenamiento)
Nota: Trabajo de campo (Random Forest, 2017)

Tabla 7.32 Área relativa y absoluta ocupada por Bofedal y Distinto de Bofedal definida en el tercer entrenamiento

Cobertura	Área relativa, %	Área, ha
Bofedal	12.11	6456.34
Distinto de Bofedal	87.89	46843.16
Total	100	53299.50

Nota: Trabajo de campo, 2017

Como se puede identificar en la Figura 7.44 y la Tabla 7.32 la aplicación del algoritmo RF en su tercer entrenamiento, arrojo como resultado que un 12.11% corresponde a las zonas de los bofedales representado por el color verde el cual posee un total de 6.456,34 ha, mientras que el 87.89% restante corresponde a las zonas distintas a los bofedales representado por el color azul con un total de 46.843,16 ha que corresponden a RPFCH.

C. MODELO PARA PREDECIR EL COLAPSO ECOSISTEMICO DE LOS BOFEDALES EN LA RESERVA

Bajo los resultados obtenidos de los tres entrenamientos del algoritmo Random Forest, este objetivo se cumplió en dos instancias:

1. Elaboración de mapas para bofedales detectados

a. Mapa base

La elaboración del mapa base de la RPFCH se realizó en relación a la ubicación de los 16 bofedales identificados por (Andrade, 2016), debido a que se utilizó la información generada de estos bofedales para la identificación de las zonas de estudio y la georreferenciación in-situ de las mismas, así como los entrenamientos en el algoritmo RF.

En este contexto el mapa de ubicación se elaboró a escala 1:80.000 donde se incorporó la información de los shapefile utilizados, descritos cada uno en la leyenda del mapa.

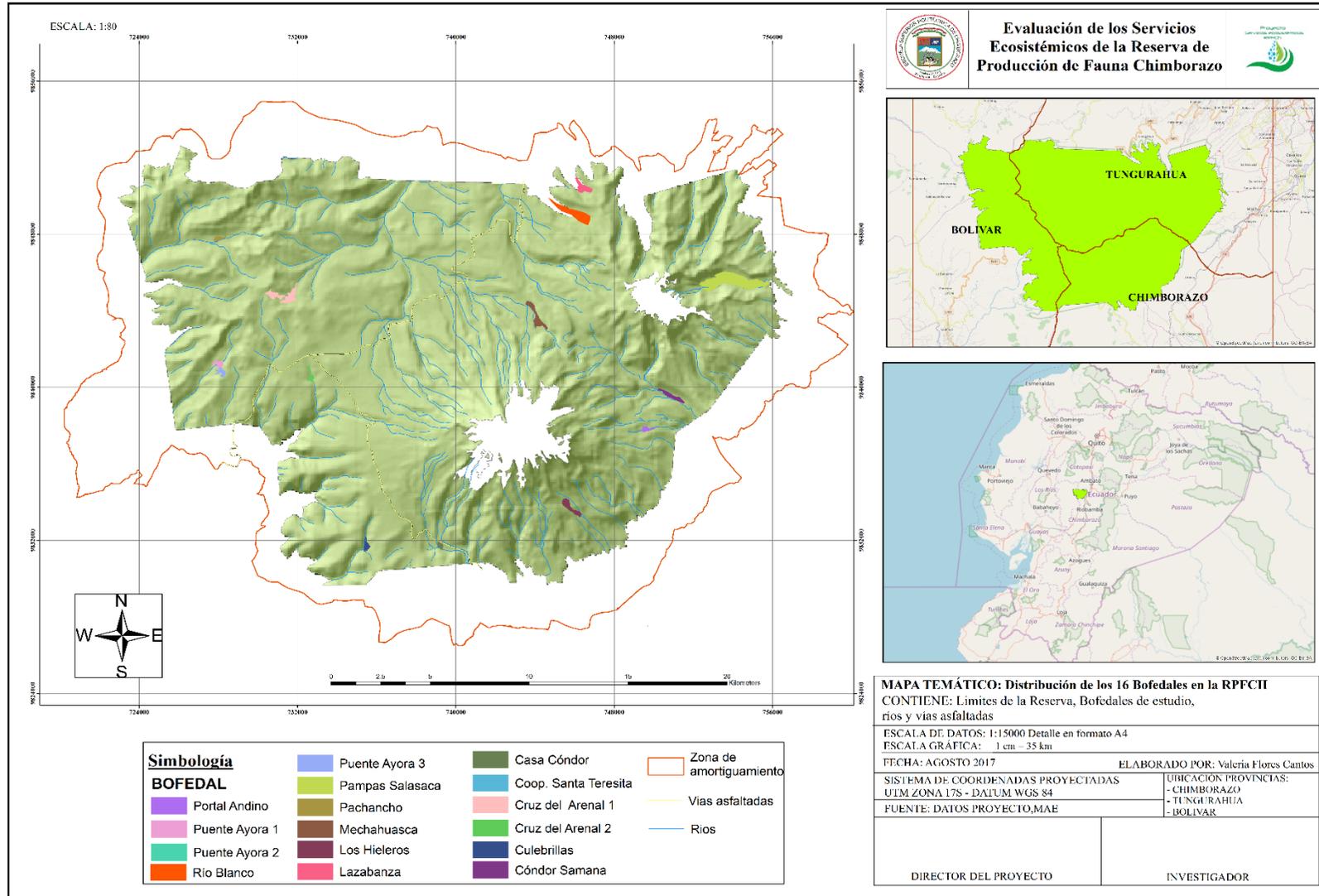


Figura 7.395 Mapa de ubicación de los bofedales en la RPFCH

(Andrade, 2016)

Nota
:

b. Mapas temáticos

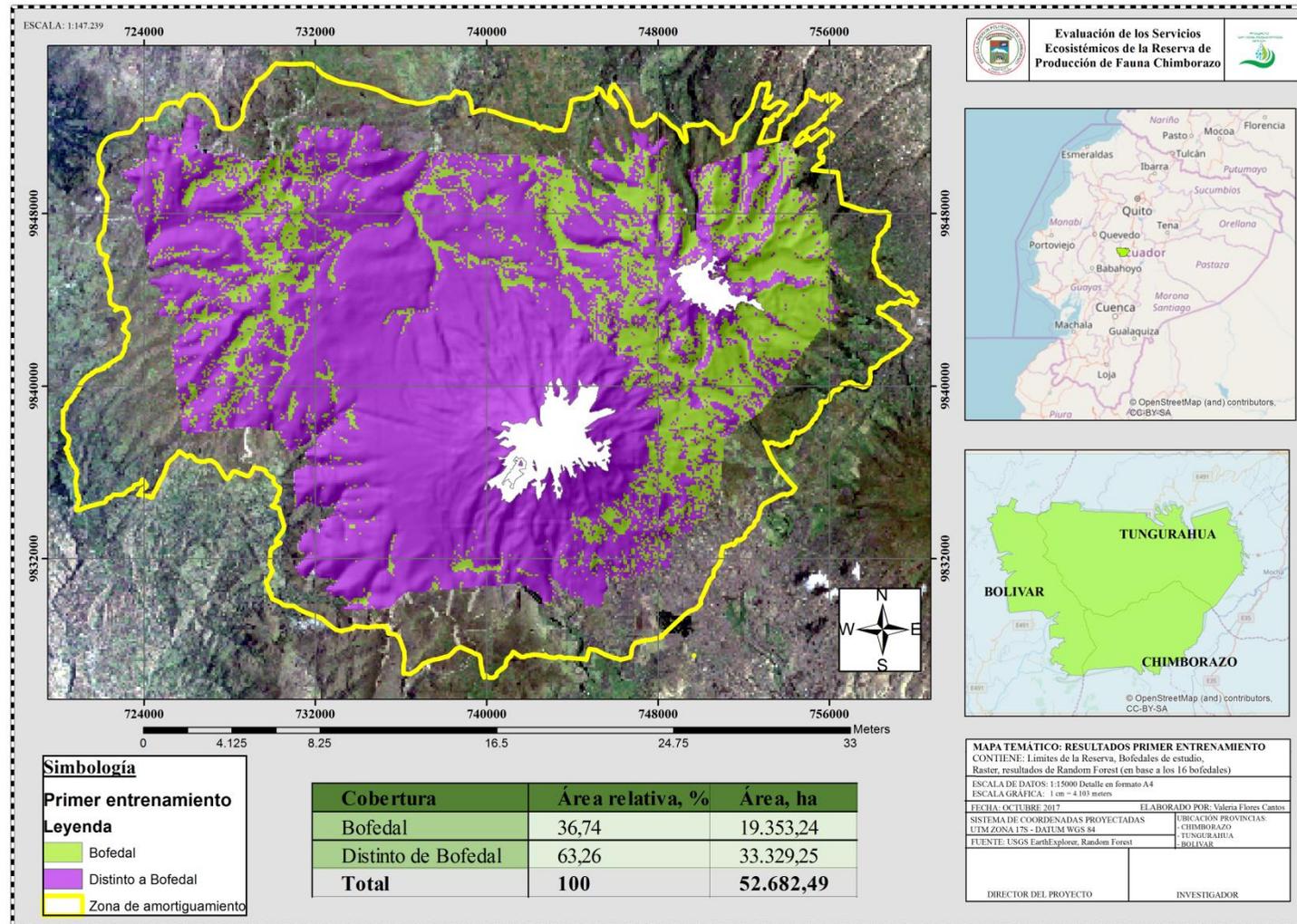


Figura 7.40 Mapa de distribución de Bofedales en base al primer entrenamiento
 Nota: Trabajo de campo (Random Forest, 2017)

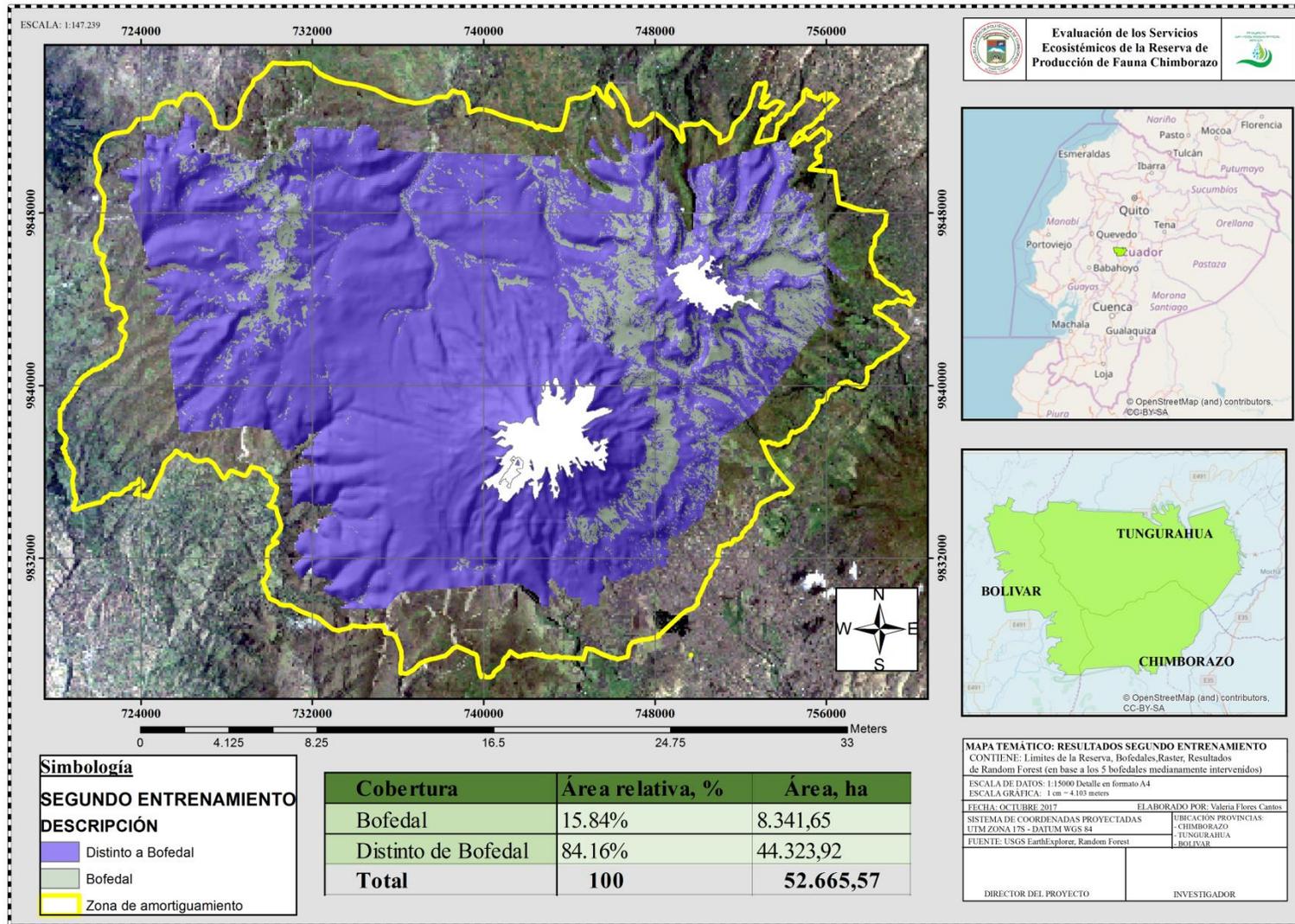


Figura 7.41 Mapa de distribución de Bofedales en base al segundo entrenamiento

Nota: Trabajo de campo (Random Forest, 2017)

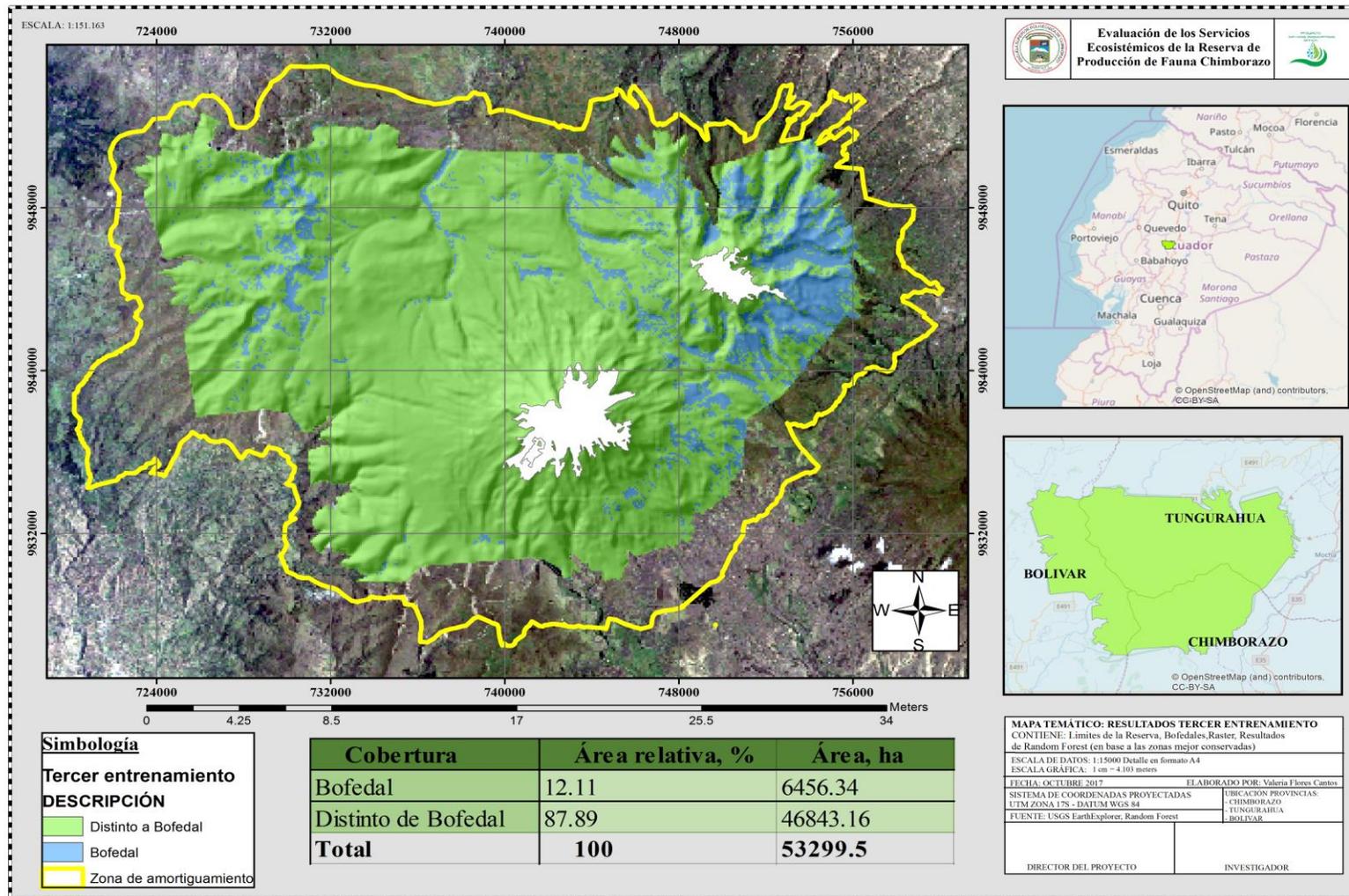


Figura 7.42 Mapa de distribución de Bofedales en base al tercer entrenamiento
 Nota: Trabajo de campo (Random Forest, 2017)

De acuerdo a las figuras 46, 47 y 48 del capítulo 7, correspondientes a los tres entrenamientos del algoritmo de categorización RF de los bofedales presentes en la RPFCH, se puede identificar cómo la extensión de la cobertura vegetal cambia en cada entrenamiento, esto es porque en el área de estudio se tomó en consideración los índices espectrales de vegetación, generados a partir de la imagen satelital Landsat 8 OLI e información complementaria aportada por procesos en *ArcGis*.

En este contexto se puede argumentar que en la Figura 7.46 correspondiente al primer entrenamiento en base a los 16 bofedales identificados por (Andrade, 2016), la variable predictora más relevante fue el índice NDWI (El índice de Agua de Diferencia Normalizada) debido a que este tipo de ecosistema presenta reservas de agua provenientes de los glaciares; este entrenamiento no segregó información específica; obteniendo así un total de 52.682,49 ha de extensión pertenecientes a la RPFCH, 19.353,24 ha pertenecen a la categoría bofedal y 33.329,25 ha a la categoría distinta de bofedal. En términos porcentuales tenemos que el 36,74% del área total es bofedal, según los resultados del primer entrenamiento.

En el segundo entrenamiento perteneciente a la Figura 7.47 realizada en base a 5 bofedales medianamente intervenidos por actividades antrópicas y con áreas mayores a 30.65 ha, se tomó en consideración la resolución espacial del lugar donde se pudo discernir los detalles de la información con píxeles de 30 x 30; para lo cual se consideraron a los bofedales de Mechahuasca, Río Blanco, Cruz del Arenal, Pampas Salasacas y Los Hieleros de los 16 identificados por (Andrade, 2016), en este entrenamiento se determinó que la variable predictora más relevante fue el índice SAVI 15 (Índice de Vegetación ajustado con el suelo con factor del brillo del suelo del 0,15) este índice fue seleccionado por RF debido a que en la firma espectral de los suelos la reflectividad es similar en las bandas roja e infrarroja cercana.

En este sentido al cambiar las condiciones del suelo la reflectividad aumenta o disminuye simultáneamente en ambas bandas. Así, un suelo húmedo refleja menos en el rojo pero también menos en el IRC, y un suelo seco refleja más en ambas bandas, por lo cual los puntos que representan superficies desnudas se distribuyen (con mayor o menor dispersión según la variación experimentada por los parámetros que determinan la reflectividad de los suelos que representan), a lo largo de una línea recta, “línea del suelo”.

Si en un punto concreto no hay vegetación, ese punto se representará sobre la línea del suelo, pero si hay una cierta cantidad de vegetación, la reflectividad de esa zona en el rojo será más baja que la del suelo desnudo, y en el infrarrojo será más alta (representado por una línea alejada del suelo). Cuanto más lejos esté de la línea del suelo, más vegetación habrá en el píxel (Sánchez, E, 2000), por consiguiente se disminuye las alteraciones del valor del NDVI (Índice Normalizado Diferencial de Vegetación) en las zonas áridas.

Bajo este contexto se estimó que de un total de 52.665,57 ha pertenecientes a la RPFCH, 8.341,65 ha pertenecientes a bofedales y 44.323,92 ha distinta a bofedal. En términos porcentuales existe un 15,84% correspondiente a las zonas de los bofedales que representa a casi la mitad de los resultados del primer entrenamiento.

Por último en la Figura 7.48 perteneciente al mapa del tercer entrenamiento que se realizó en base a 20 zonas mejor conservadas, de los 5 bofedales medianamente intervenidos (identificados anteriormente), se estableció al NDVI (Índice Normalizado Diferencial de

Vegetación) como la variable predictora más relevante, ya que se contó con información recolectada en el campo, que fue la georreferenciación in-situ de cuadrantes de 30 x30 metros o más, en el cual se consideraron zonas en donde únicamente existía almohadillas, este resultado permitió focalizar que en la RPFCH existe un total del 12,11% correspondiente al área de las zonas bofedales, teniendo así que entre el primer y segundo entrenamiento, este último es el que maneja información más específica y certera de la zona de estudio.

2. Análisis del modelo Predictorio

a. Análisis multitemporal de los Bofedales

Para determinar la cronología de la RPFCH se tomó en consideración los últimos 23 años, para lo cual se realizó un análisis multitemporal del procesamiento de información de imágenes satelitales Landsat de los años 2016, 2010, 2001 y 1991 de los meses de agosto a noviembre, estas fechas se tomaron a consideración debido a que la zona de estudio se encuentra en un lugar en donde la mayor parte del año pasa nublado.

En esta etapa se realizó el mismo procesamiento de información, empleado en los tres anteriores entrenamientos con el algoritmo de categorización Random Forest y la información se basó en las 20 zonas mejor conservadas de los 5 bofedales medianamente intervenidos correspondientes a los bofedales Mechahuasca, Río Blanco, Cruz del Arenal, Pampas Salasacas y Los Hieleros; que se encuentran dentro de los 16 bofedales identificados por (Andrade, 2016) y en los índices espectrales de vegetación de cada imagen satelital . Posteriormente a la información obtenida se realizó un mapa temático de cada año con su respectivo análisis de reducción de cobertura vegetal.

1) Bofedales de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo-1991

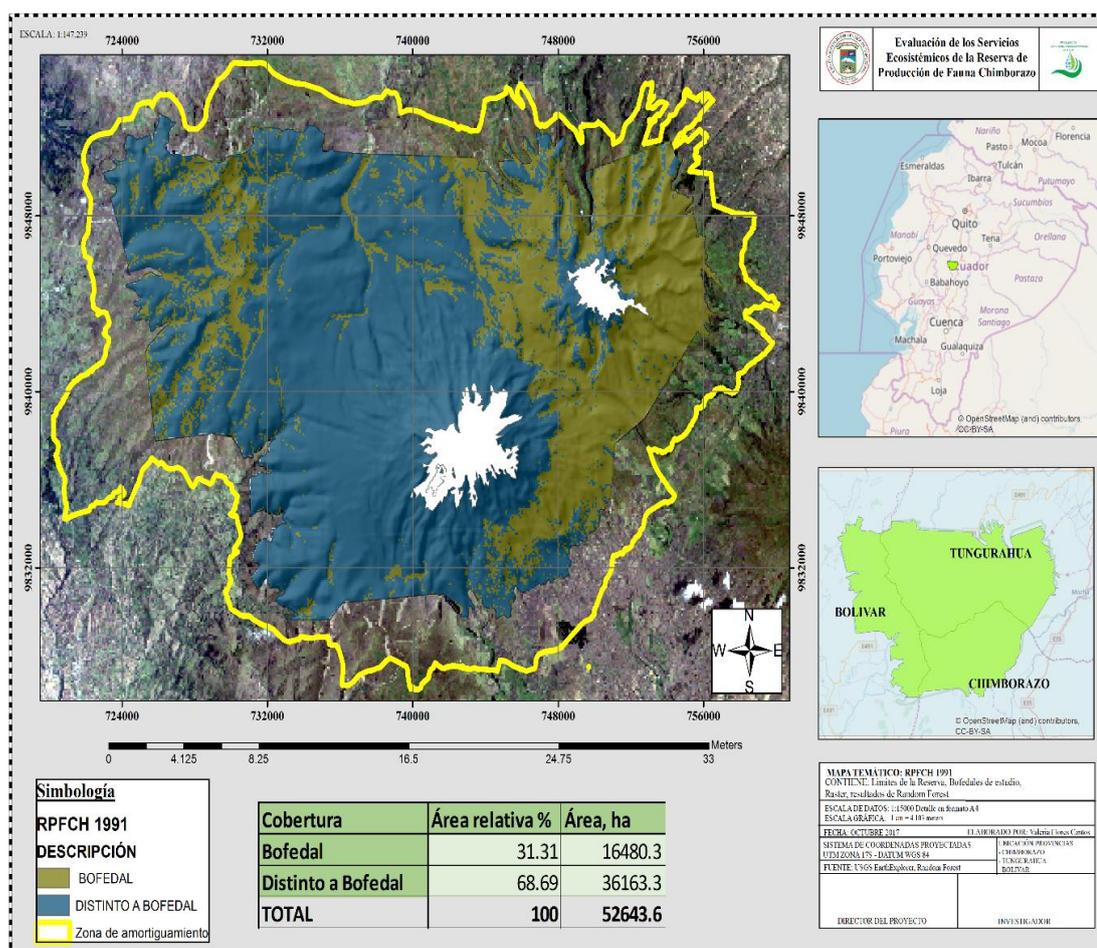


Figura 7.439 Distribución de bofedales en Reserva de Producción de Fauna Chimborazo-1991
Nota: Predicción del algoritmo de categorización (Random Forest, 2017)

De acuerdo al algoritmo de categorización RF, la extensión de los bofedales en el año 1991 es de 16.480,3 ha correspondiente al 31,31% de la extensión total de la RPFCH, la mayor parte de este ecosistema se encuentra distribuido en el flanco norte del área protegida en la provincia de Tungurahua, sin embargo existe en pequeñas cantidades en las provincias de Chimborazo y Bolívar.

Para este año no existía un plan de manejo hasta el año 1992 en donde los principales objetivos fueron establecer a la Reserva como un beneficiario del desarrollo regional y compatibilizar acciones de desarrollo para el bienestar de la Unidad de Conservación; por ende los programas de manejo estuvieron centrados en la conservación de la vicuña, atención al cliente y el manejo de la RPFCH con las comunidades aledañas. Por lo cual el tema de los bofedales, fue tomado superficialmente ya que este ecosistema estuvo considerado únicamente para la identificación del hábitat de las vicuñas.

A pesar de estos factores existió un convenio con la universidad de Toronto en donde se realizaron estudios pero los resultados quedaron como recomendación y no se tomaron medidas de conservación.

2) Bofedales de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo-2001

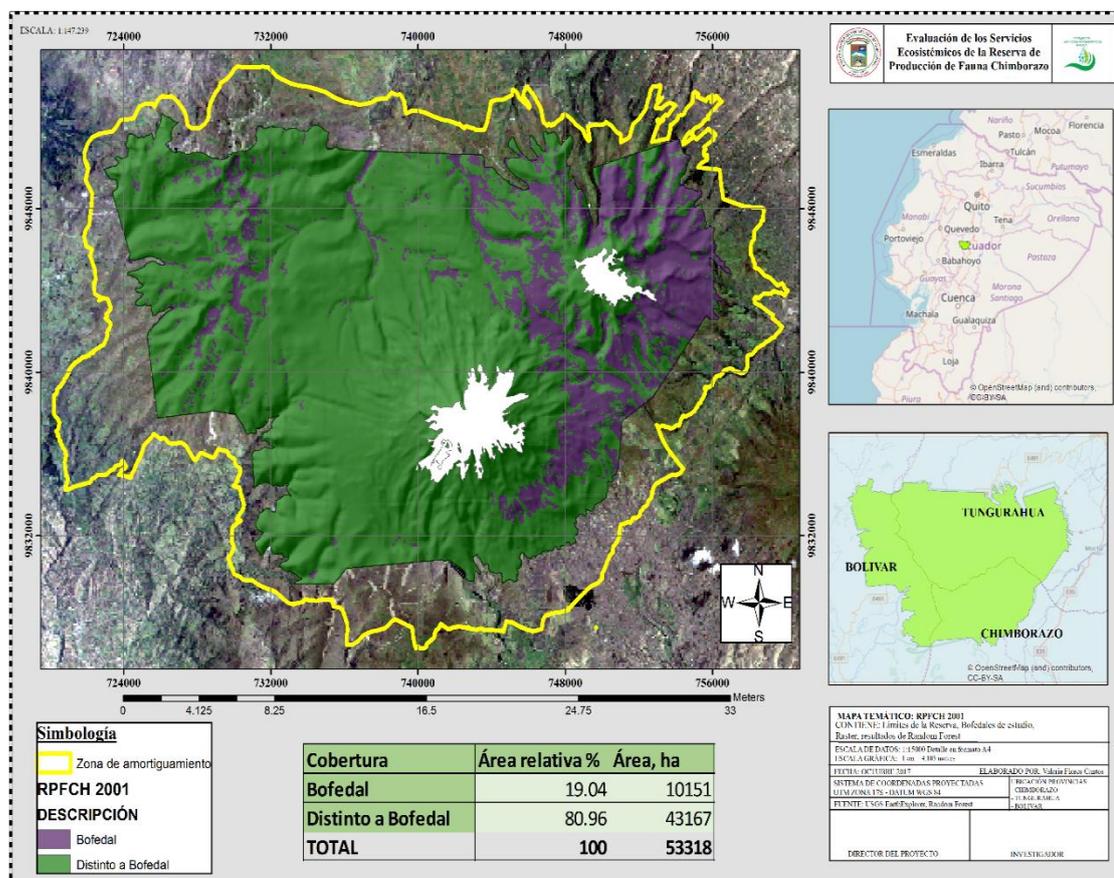


Figura 7.5044 Distribución de bofedales en Reserva de Producción de Fauna Chimborazo-2001
Nota: Predicción del algoritmo de categorización (Random Forest, 2017)

Como se puede observar en la Figura 7.50 la tasa de reducción de la extensión de los bofedales en el año 2001 respecto al año 1991 es significativa, según la categorización del algoritmo RF para este año existe un total de 10.151 ha correspondientes al 19,04% de la extensión de la RPFCH. A la vez se puede determinar que para este año existió una reducción notoria de la cobertura vegetal en la provincia de Tungurahua.

Durante este periodo no existió un plan de manejo por lo cual en el año 2006 se creó un plan gerencial en donde los principales objetivos estuvieron enfocados en fortalecer el manejo de los camélidos por medio de capacitaciones a las comunidades asentadas en el área, impulsar actividades turísticas a través de la difusión de atractivos y la conservación y protección de los ecosistemas de la Reserva. Dejando así a los bofedales como un tema de segunda instancia.

3) Bofedales de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo-2010

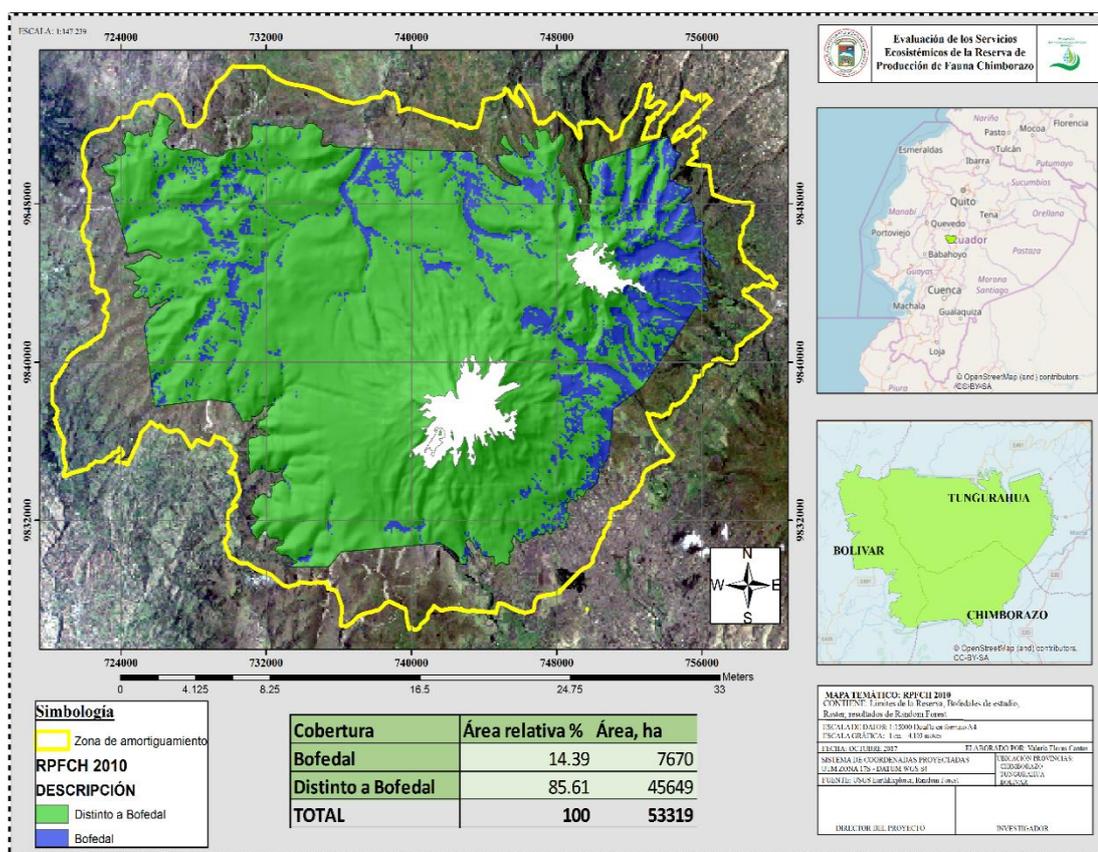


Figura 7.51 Distribución de bofedales en Reserva de Producción de Fauna Chimborazo-2010
 Nota: Predicción del algoritmo de categorización (Random Forest, 2017)

La tasa de reducción de la extensión de la cobertura de los bofedales en el año 2010 respecto a los años anteriores es significativa ya que del año 1991 y 2010 encontramos una diferencia del 16,92% , mientras que para el año el 2001 en relación para el año 2010 existe una diferencia de 4.65%. Según el algoritmo de categorización RF la extensión de este ecosistema fue de 7.670 ha correspondientes al 14,39% de la RPFCH. De acuerdo al mapa se puede observar que para este año existió una reducción de este ecosistema en las tres provincias pero con mayor intensidad en la provincia de Chimborazo y en las áreas circundantes al nevado Carihuairazo.

Durante este año no existió un plan de manejo para el área, por lo cual fue utilizado únicamente para la identificación del hábitat de las vicuñas y como delimitadores de zonas de vida.

4) Bofedales de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo-2016

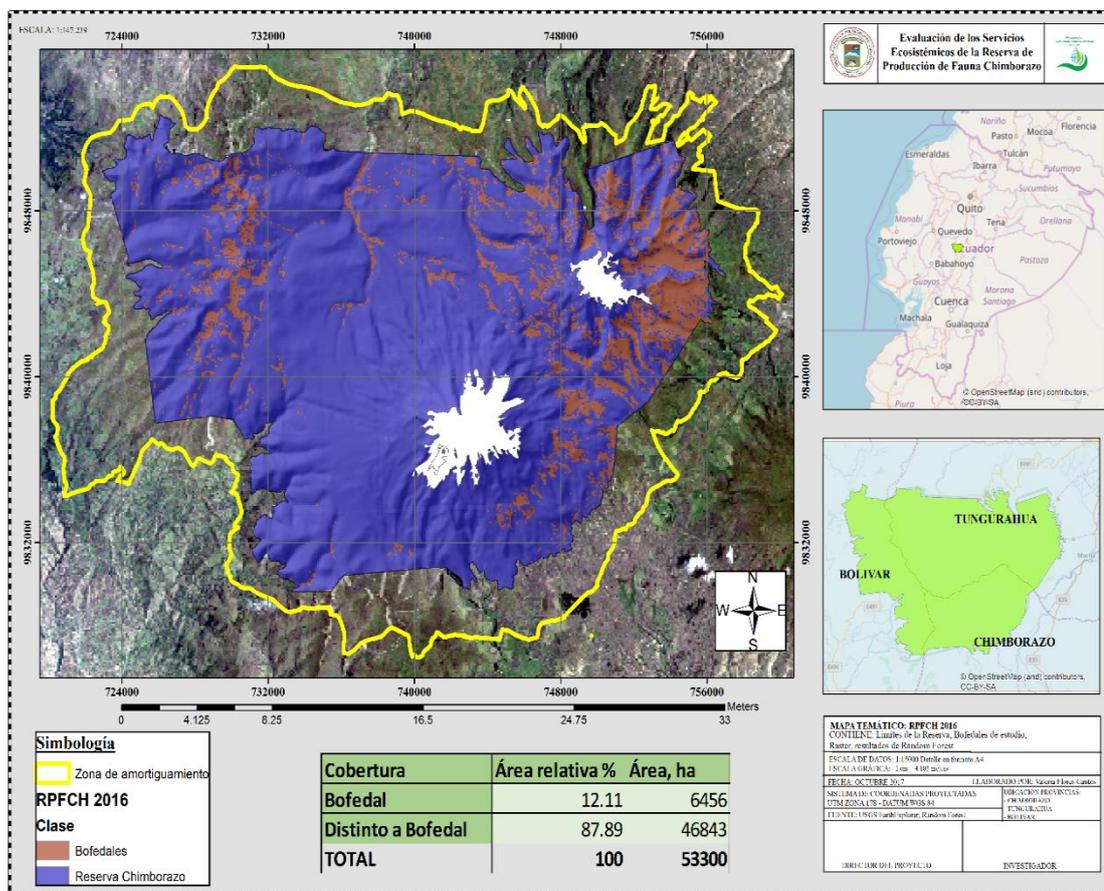


Figura 7.5245 Distribución de bofedales en Reserva de Producción de Fauna Chimborazo-2016
Nota: Predicción del algoritmo de categorización (Random Forest, 2017)

Según el algoritmo de categorización RF, la tasa de extensión de los bofedales para el año 2016 fue de un 12,11% correspondiente a 6.456,34 ha de la extensión total de la RPFCH. En este contexto se puede observar que en el flanco norte del área protegida perteneciente a las Provincias de Tungurahua y Bolívar existe una pérdida considerable de la cobertura vegetal al año 2010.

Se puede argumentar que para este año se implementó el plan de manejo del 2014 en donde se trabajó al mismo como una herramienta de planificación y gestión, bajo un enfoque ecosistémico para lograr el uso sostenible de la biodiversidad de área. En cuanto al tema bofedales existió estudios e investigación por parte de universidades en donde los resultados fueron tomados como recomendación para el manejo del área. Es por ello que actualmente se está trabajando en la conservación de las fuentes hídricas de los bofedales obteniendo como resultados el mejoramiento de la calidad de agua. Pero la cantidad de este ecosistema sigue disminuyendo por actividades antrópicas.

b. Análisis del modelo predictorio

La proyección de la disminución en la extensión de los bofedales se obtuvo con la herramienta de la UICN, 2014 de tasa de reducción absoluta y tasa proporcional de disminución, misma que trabaja con las extensiones de los años 1991 y 2016 representados en km² siendo así 164.8 y 64.56 km² respectivamente. Esta herramienta calcula el cambio por año a través de la resta de las extensiones del área y de los dos años a trabajarse; en donde los resultados son divididos teniendo así 4 Km² de reducción para cada año, lo que representa la pendiente de la recta. Como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 7.33. Cálculo de reducción de tasa absoluta constante

Año	Área	Cambio por año en km ²
1991	164.8	
2016	64.56	4.0096

Nota: UICN, 2014

Para la obtención de la tasa absoluta la herramienta resta la extensión del primer año menos 4 km² que corresponden al cambio por año y para los valores consecutivos, esta va restando la obtención de las áreas de los años anteriores para los datos del primer año (1991). En cuanto para el cálculo de la tasa de reducción proporcional realiza el mismo procedimiento para cada año; mientras que la función es considerada en logaritmos naturales debido a que si existiera valores superiores a mil estos datos se reducirían. Como se representa en la base de datos (Ver Anexo 2).

Los resultados obtenidos de la tasa absoluta y proporcional son representados en la siguiente figura:

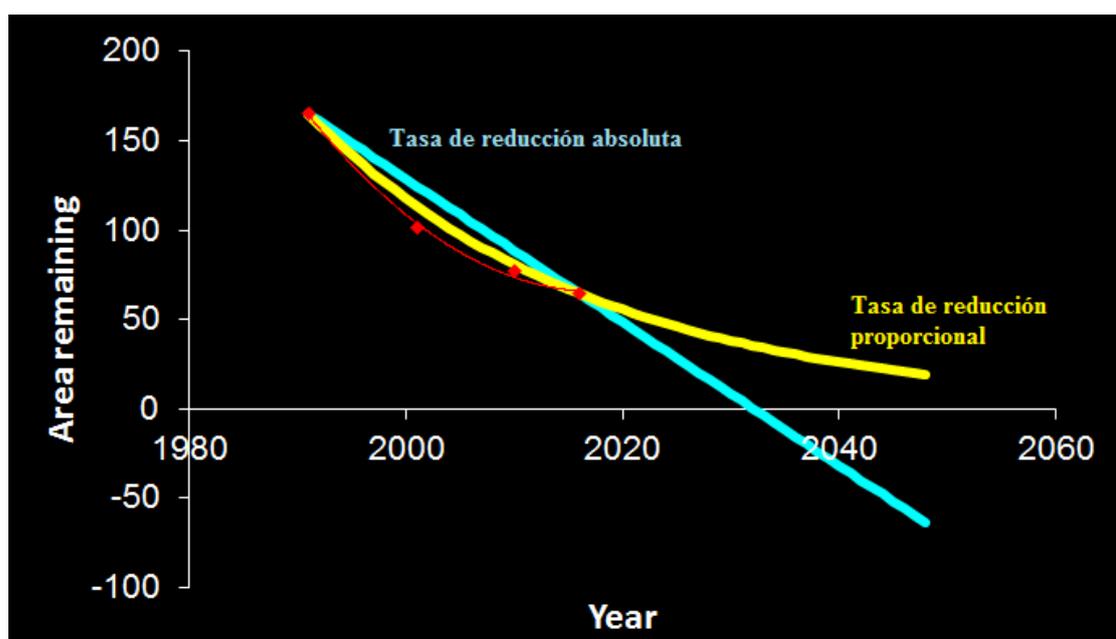


Figura 7.463. Tasa absoluta de reducción y tasa proporcional de disminución

Nota: Herramienta UICN, 2014

Realizado por: Valeria Flores Cantos

De acuerdo a la figura 7.53 se puede observar dos modelos de predicción de la reducción del ecosistema bofedal en la RPFCH, según la herramienta (UICN, 2014). En la línea celeste se representa el área, considerando una tasa de reducción absoluta; mientras que la línea amarilla representa el área considerando una tasa de reducción proporcional anual. Los puntos rojos representa el área bofedal observada en los años 1991, 2001, 2010 y 2016 cuyas dimensiones se obtuvieron mediante los tratamientos de imágenes satelitales y la aplicación del algoritmo RF en base a las zonas mejor conservadas.

Por ende se puede observar que los pronósticos obtenidos con la tasa de reducción proporcional (línea amarilla) tienden a aproximarse más al área real observada, ya que la línea de tendencia ajustada a estos puntos no corresponde a un modelo lineal. Sin embargo la herramienta de UICN propone que la tasa de reducción absoluta (línea celeste) del área bofedal indica el colapso del ecosistema. Por lo cual para el año 2032 existiría un área de 0.46 km², mientras que si la reducción fuese proporcional (línea amarilla), el ecosistema para el mismo año alcanzaría un área de 35.4 km² y para el año 2066 sería menor a los 10 km² teniendo así la pérdida total de este ecosistema. De estas dos estimaciones la tasa de reducción absoluta predice el colapso ecosistémico con 139% de reducción para el 2032. Por lo que conlleva a una clasificación de peligro crítico ($\geq 80\%$), en este sentido los bofedales de la RPFCH podrían colapsar si las presiones se intensifican en los próximos 16 años.

Cabe mencionar que esta reducción es consecuencia de actividades antrópicas generadas en los años 1991 hasta el 2014, debido a que este ecosistema fue considerado de manera muy superficial para su conservación, en la actualidad el Ministerio del Ambiente, bajo la administración de la RPFCH en su plan de manejo a incluido como un objetivo el proteger fuentes hídricas y bofedales; para lo cual se encuentran realizando acuerdos de conservación con las comunidades aledañas a este ecosistema y haciendo controles del afloramiento de caudales. Por lo cual han tenido como resultado un mejoramiento de la calidad del agua pero en cuanto a la cobertura existe una disminución considerable por el mal uso del ecosistema como el sobre pastoreo y en un futuro por la sobrepoblación de vicuñas.

Lo que indica que si no se toma medidas de manejo adecuadas el ecosistema bofedal, podría llegar a su colapso definitivo.

VIII. CONCLUSIONES

1. Se encontró que en área de estudio los indicadores potenciales relevantes son los índices espectrales de vegetación como el NDVI (Índice normalizado diferencial de vegetación), SAVI (Índice de vegetación ajustado con el suelo), NDWI (Índice de agua de diferencia normalizada), WDRI (Índice de vegetación de rango dinámico amplio) y DEM (Modelo de elevación digital). Los cuales permitieron focalizar la información para cada proceso de categorización que se realizó en el algoritmo Random Forest.
2. Durante la aplicación del algoritmo Random Forest se concluyó lo siguiente:
 - a. En los tres entrenamientos para identificar Bofedales, existe un índice espectral característico para cada uno; por ende en el primer entrenamiento en base a los 16 bofedales tenemos que la cobertura de este ecosistema es de 36,74% del área total, en donde el índice NDWI fue considerado como la variable predictora más relevante debido a la presencia de reservas de agua provenientes de los glaciares, a la par este entrenamiento obtuvo un 97.88% de un porcentaje global de pixeles correctamente analizados.
 - b. En el segundo entrenamiento realizado en base a los 5 bofedales medianamente intervenidos se estimó un 15,84% perteneciente a la extensión de bofedales, considerando como índice relevante al SAVI 15 por su factor L, el cual indica que entre más lejos se encuentre la línea del suelo existirá más vegetación en el pixel, este entrenamiento determinó un valor aceptable de 89.45% de pixeles correctamente analizados.
 - c. Finalmente en el tercer entrenamiento realizado en base a las zonas mejor conservadas, la cobertura de los bofedales se reduce aún más al 12,11%; por consiguiente el índice con mayor aportación de información fue el NDVI que se encuentra directamente relacionado a la producción primaria de clorofila, durante este entrenamiento se obtuvo un valor de confiabilidad de 95,95% de datos analizados.

Bajo este contexto se puede evidenciar tres escenarios diferentes de la situación actual del ecosistema con valores de confiabilidad aceptables del porcentaje global de pixeles correctamente analizados. Es así que la hipótesis alternante es aceptada en virtud al subconjunto de datos OOB (Porcentaje global de correctas), impugnando de esta manera la hipótesis nula.

3. La aplicación de un modelo para predecir bofedales permitió concluir lo siguiente: durante el análisis multitemporal de los últimos 23 años indica que la extensión de este ecosistema disminuye de 16.480,3 ha de la extensión total de la RPFCH en 1991, a 6.456,34 ha en el 2016, existe una reducción del 19.2%. evidenciando el uso inadecuado del ecosistema y por medio de la herramienta UICN se asignó al ecosistema bofedal en categoría de peligro crítico por cual su extensión de cobertura en el año 2032 sería de 0.46 km², entonces de mantener este ritmo el ecosistema llegaría a su colapso definitivo.

IX. RECOMENDACIONES

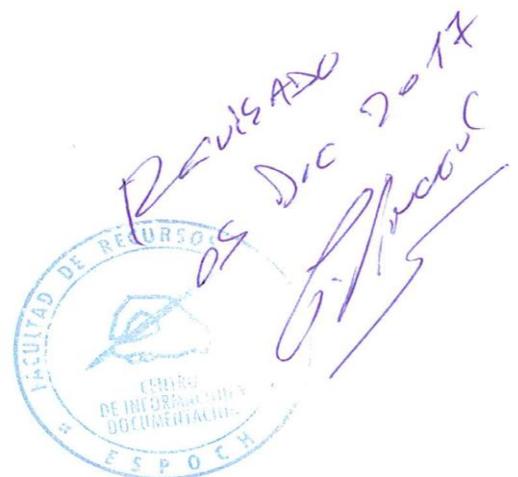
1. Se sugiere que para el desarrollo de los índices espectrales de vegetación se deberá considerar la calidad de la imagen y su adecuado tratamiento para obtener datos fijos y poder comparar con los distintos resultados de los entrenamientos aplicados en Random Forest.
2. Dado los resultados de confiabilidad que se obtuvo en la aplicación del algoritmo Random Forest, a través de las salidas de campo se recomienda tomar más puntos de control en los bofedales restantes para discriminar mejor el procesamiento digital de imágenes.
3. Según los resultados obtenidos se sugiere implementar medidas de manejo para los bofedales de la RFCH debido a que son un ecosistema muy importante para el área.
4. Finalmente, los resultados de este trabajo y de otros similares deberían ser acogidos para la Administración del área protegida como un aporte para la actualización del plan de manejo y gestión de la misma.

X. RESUMEN

La presente investigación propone: realizar la predicción de bofedales en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo, a través del tratamiento de imágenes satelitales Landsat; para lo cual se desarrolló tres entrenamientos del algoritmo Random Forest. Este proceso se llevó a cabo con el cálculo de índices espectrales que abarcaron características abióticas del área, generando un modelo predictorio de categorización por medio de árboles de decisión; el algoritmo eligió la clase o cobertura que mayor valor obtuvo, arrojando variables en cada nivel del árbol. Los resultados muestran que los factores relevantes en la categorización para cada entrenamiento son: en el primer entrenamiento el índice diferencial de agua normalizado NDWI con un porcentaje de categorización de 97,88%, siendo 97.44% bofedal y 99.44% distinto a bofedal, en el segundo entrenamiento fue el índice de vegetación ajustado con el factor del brillo del suelo SAVI 15 con un porcentaje de 89,45%, siendo 85,23% bofedal y 90,04% distinto a bofedal y en el tercer entrenamiento el índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI con un porcentaje de 95,95 %, siendo 93,82% bofedal y 99,21% distinto a bofedal. Con el fin de analizar los porcentajes y comportamientos de los bofedales, se realizó un análisis multitemporal del área de estudio de los años 1991, 2001, 2010 y 2016 bajo el mismo procedimiento del algoritmo Random Forest; para lo cual se trabajó con imágenes satelitales Landsat 8 OLI, 7 ETM y 5 TM, sobre los resultados obtenidos de los años 1991 y 2016 se aplicó la herramienta de reducción del área UICN, la cual proyecta una tasa de reducción absoluta del ecosistema en los próximos 16 años, por lo cual asignó la categoría de peligro crítico, en este contexto es necesario plantear acciones de manejo y uso sostenible de este ecosistema para evitar su colapso.

Palabras clave: SENSORES REMOTOS - HUMEDALES ALTOANDINOS - COLAPSO ECOSISTÉMICO- BOFEDALES.

Por: Valeria Flores



XI. SUMMARY

The present search proposes: to carry out the prediction of bofedales in the Chimborazo Wildlife Production Reserve, through the treatment of Landsat satellite images, for which three Random Forest algorithms were developed. This process was carried out with the calculation of spectral indices that covered abiotic characteristics of the area, generating a predictive model of categorization by means of decision trees: the algorithm chose the class or coverage that obtained the highest value, yielding variables in each level of the tree. The results show that the relevant factors in the categorization for each training are: in the first training the NDWI normalized water differential index with a categorization percentage of 97.88%, being 97.44% bofedal and 99.44% different from bofedal, in the second training was the adjusted vegetation index with the soil brightness factor SAVI 15 with a percentage of 89.45%, being 85.23% bobedal and 90.04% different from bofedal and in the third training the NDVI standardized vegetation index with a 95.95 percentage % being 93.82% bofedal and 99.21% other than bofedal . In order to analyze the percentages and behaviors of the bofedales, a multitemporal analysis of the study area for the years 1991, 2001, 2010 and 2016 was carried out under the same procedure as the Random Forest algorithm; for which we worked with Landsat 8 OLI, 7 ETM and 5 TM satellite images, on the results obtained from the years 1991 and 2016 the IUCN area reduction tool was applied, which project an absolute reduction rate of the ecosystem in the next 16 years, for which I assign the category of critical danger, in this context it is necessary to propose management actions and sustainable use of this ecosystem to avoid its collapse.

Key words: REMOTE SENSORS - ALTOANDINOS WETLANDS - ECOSYSTEMIC PASS-BOFEDALES



XII. BIBLIOGRAFÍA

- Acuña. (2014). *Factores bióticos y abióticos*. Recuperado el 30 de Marzo de 2017, de <https://licenciadascnambientalistas.wordpress.com/contenidos/>
- Alzérreca, H. (Junio de 2001). *Asociación integral de ganaderos en camelidos*. Recuperado el 07 de Marzo de 2017, de http://alt-perubolivia.org/Web_Bio/PROYECTO/Docum_bolivia/21.12.pdf
- Andrade. (2016). *Determinación del estado de conservación de los bofedales de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo*. (Tesis de grado. Ingeniero en Ecoturismo). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba.
- ArcGIS for Desktop. (2015). *ArcMap*. (Esri, Productor). Recuperado el 26 de Marzo de 2017, de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>
- Ayala. (2017). *Land Cover Classification in an Ecuadorian Mountain Geosystem Using a Random Forest Classifier, Spectral Vegetation Indices, and Ancillary Geographic Data*. Ruiliang Pu and Jesus Martinez-Frias.
- Bourel. (2012). *Evaluando Software*. Recuperado el 30 de Marzo de 2017, de <http://www.evaluandosoftware.com/que-es-el-analisis-predictivo-2/>
- Breiman. (1996). *Bagging predictors*. Recuperado el 30 de Marzo de 2017, de http://www.um.edu.uy/docs/2_metodos_de_agregacion_de_modelos_y_aplicaciones.pdf
- Cárdena, & Encina. (2008). *Clasificación de bofedales*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ingeniería en Ecoturismo. Riobamba.
- Cárdenas & Encina. (2008a). *Bofedales de la Cordillera Occidental*. Bolivia.
- Centro de Investigación y Estudios Superiores en Antropología Social. (2013). *Sistemas de Información Geográfica*. Recuperado el 26 de Marzo de 2017, de <https://langleruben.wordpress.com/%C2%BFque-es-un-sig/>
- Cifuentes. (10 de Septiembre de 2015). *Ecología*. Recuperado el 30 de Marzo de 2017, de <http://mluzcamposecologia.blogspot.com/2012/02/factores-abioticos.html>
- Comisión Nacional de Actividades Espaciales. (2016). *Combinación de bandas espaciales*. Recuperado el 21 de Septiembre de 2017, de <http://ufs.conae.gov.ar/>
- Díaz , P. B. (2015). *Caracterización ecológica de los Bofedales, como hábitat vital de las Vicuñas en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo con la aplicación de herramientas de SIG y teledetección*. Universidad San Francisco de Quito. Colegio de Posgrado . Quito.

- Díaz García , J. J. (2015). *Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión*. (Tesis de Masterado). Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Geografía e Historia . Mdrid.
- Dudley, (2008). *Directrices para la aplicación de las categorías de gestión de áreas protegidas*. Suiza.
- Espasa Calpe. (2003). *Factores abióticos*. En ESPASA, & M. P. Castro (Ed.), *Ecología* (págs. 12-13). Colombia.
- Esperanza, F., & Zerda, H. (2002). *Potencialidad de los índices de vegetación para la discriminación de coberturas forestales*. Universidad Nacional de Santiago del Estero. Santiago del Estero: Facultad de Ciencias Forestales. Argentina
- Evans, J., Murphy, M., Holden, Z., & Cushman, S. (2011). *Modeling species distribution and change using Random Forest*. New York, NY, USA: Springer Science Business Media, B.V.
- Fernández, I. (5 de Marzo de 2001). *Características de imágenes Landsat*. Universidad de Valladolid. Recuperado el 30 de Marzo de 2017, de <http://www.cartesia.org/data/apuntes/teledeteccion/landsat-analisis-visual.pdf>
- Gutiérrez, C. P., & Nieto, Á. M. (2006). *Teledetección*. Recuperado el 30 de Marzo de 2017, de <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=SfrGxbO1DT0C&oi=fnd&pg=PA1&dq=teledetecci%C3%B3n&ots=pDnbXy2hF-&sig=1NVw1MoTWcbmI9Rg2dJ5VUqnHvU#v=onepage&q=teledetecci%C3%B3n&f=false>
- Huete, A. (1985). *Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds*. California.
- Ibañez Asensio, S., Gisbert, J., & Moreno , H. (2006). *Coordenadas Geográficas*. Universidad Politecnica de Valencia. Recuperado el 26 de Marzo de 2017, de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10772/Coordenadas%20UTM.pdf>
- El Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017). *Modelos digitales de elevación*. Recuperado el 27 de Septiembre de 2017, de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesmde.aspx>
- Instituto Geografico Austín Codazo. (2006). *Información Geoestadística*. Recuperado el 26 de Marzo de 2017, de ftp://ftp.ciat.cgiar.org/DAPA/planificacion/GEOMATICA/SIG/SIG_Modulo.pdf
- Instituto Geografico Militar. (2005). *Conceptos cartograficos. Atlas Universal y del Ecuador* (Instituto Geografico Militar ed., Vol. 1). (D. d. Temática, Ed.) Quito - Ecuador: EDIMPRES.
- Instituto Geográfico Militar de España. (2014). *Conceptos cartográficos*. Recuperado el 26 de Marzo de 2017, de

https://www.ign.es/ign/resources/cartografiaEnsenanza/conceptosCarto/descargas/Conceptos_Cartograficos_def.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México. (2015). *Características de imágenes Landsat*. Recuperado el 30 de Marzo de 2017, de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/ImgSatelite/Landsat.aspx>

Kappelle, M. (2005). *The Natural Conservancy-Páramos*. (M. Kapelle, Ed.) Costa Rica: INBio. Recuperado el 27 de Marzo de 2017, de [PP4&dq=la+biodiversidad+de+paramos&ots=9dUXniYNTr&sig=5UbT1EZKpPlo7t_JQchlV4AcZu4#v=onepage&q=la%20biodiversidad%20de%20paramos&f=false](http://pp4&dq=la+biodiversidad+de+paramos&ots=9dUXniYNTr&sig=5UbT1EZKpPlo7t_JQchlV4AcZu4#v=onepage&q=la%20biodiversidad%20de%20paramos&f=false)

Letham,(2001). *Uso de Sistema de Posicionamiento Global..* Barcelona - España: Paidotribo. Recuperado el 26 de Marzo de 2017, de https://books.google.com.ec/books?id=orjnvjPqELcC&printsec=frontcover&dq=Gps&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj4v29rZ_PAhVCIB4KHaRPDZIQ6AEITzAH#v=onepage&q=Gps&f=false

Louppe, (2014). *Understanding Random Forests: from theory to practice*. Ovronnaz, Switzerland- Suiza.

Medina & Mena. (2001). Los páramos del. *EcoCiencia*, 1-23. Recuperado el 27 de Marzo de 2017, de <http://www.beisa.dk/Publications/BEISA%20Book%20pdfer/Capitulo%2006.pdf>

Mena, P., & Hofstede, R. (2006). *Humedales altoandinos. 6310 Climbing*. Recuperado el 30 de Marzo de 2017, de <http://www.beisa.dk/Publications/BEISA%20Book%20pdfer/Capitulo%2006.pdf>.

Ministerio del Ambiente. (2013). *Plan de manejo de la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo*. Recuperado el 27 de Marzo de 2017, de <http://www.ambiente.gob.ec/reserva-de-produccion-de-fauna-chimborazo-26-anos-de-proteccion/>

Ministerio del Ambiente. (2014). *Actualizacion del Plan de Manejo de la Reseva de Fauna de Chimborazo*. Riobamba: MAE.

Moyota, P. D. (2015). *Caracterización ecológica de los Bofedales, como hábitat vital de las Vicuñas en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo con la aplicación de herramientas de SIG y teledetección*. (Tesis de Maestría. Máster en Sistemas de Información Geográfica). Universidad San Francisco de Quito. Quito .

National Space and Space Administration. (2016). *Imágenes Landsat. GeoService Perú*. Recuperado el 30 de Mmarzo de 2017, de http://www.gspperu.com/pdf/res_landsat7etm.pdf

Negrete, M. (2012). *Páramos del mundo*. Recuperado el 30 de Marzo de 2017, de <http://www.scribd.com/doc/89852688/03-Parte-C-Paramos-del-mundo>.

- Pontificia Universidad Javeriana. (2012). *Conceptos cartográficos*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2016, de <http://portales.puj.edu.co/objetosdeaprendizaje/Online/OA04/Sistemas%20de%20coordenadas.htm>
- Portugués, S. B. (2010). *Teledetección y análisis SIG*. Recuperado el 27 de Marzo de 2017, de file:///C:/Users/user/Downloads/Libro_Begueria_2005.pdf
- Pozo, (2000). *Protección de Humedales (Bofedales)*. Ministerio de agricultura Chile. Recuperado el 27 de Marzo de 2017, de <http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/7136/DGA-HUMED06.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Saberian. (17 de Abril de 2015). *Predictive Analytics*. Recuperado el 1 de Abril de 2017, de <https://blog.es.logicalis.com/analytics/predictive-analytics-los-principales-modelos-del-analisis-predictivo>
- Sánchez, E. (2000). *Comparación del NDVI con el PVI y el SAVI como Indicadores para la Asignación de Modelos de Combustible para la Estimación del Riesgo de Incendios en Andalucía*. Universidad de Alcalá, Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible Departamento de Geografía. Recuperado el 21 de Septiembre de 2017, de http://age.ieg.csic.es/metodos/docs/IX_2/Sanchez_Esperanza.PDF
- Santillana. (2006). *Ecología*. Enciclopedia del estudiante. Buenos Aires - Argentina. pp. 112 - 116.
- Sistema Nacional de Información Agropecuaria. SNIA. (2016). *Indices de Vegetación*. Recuperado el 21 de Septiembre de 2017, de http://dlibrary.snia.gub.uy/maproom/Monitoreo_Agroclimatico/INDICES_VEGETACION/NDWI/NDWI_250m/NDWI.html#tabs-2
- Soler, (Febrero de 2006). *Factores bióticos y abióticos*. Scribd. Recuperado el 30 de Marzo de 2017, de <https://es.scribd.com/doc/26882635/Factores-Bioticos-y-Abioticos>
- Tirados, M. (28 de Mayo de 2014). *Random Forest*. *Big Data Hispano*. Recuperado el 30 de Marzo de 2017, de <http://www.bigdatahispano.org/noticias/algorithmo-random-forest/>
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. (2016). *Lista roja de ecosistemas UICN*. (Lucie M. Bland, David A. Keith, Rebecca M. Miller, Nicholas J. Murray, & Jon Paul Rodríguez, Edits.) Recuperado el 2017 de Octubre de 2017, de <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2016-010-Es.pdf>
- Servicio Geológico de los Estados Unidos. (2017). USGS. *Imágenes Landsat*. Recuperado el 25 de Septiembre de 2017, de GLOVIS EXPLORER: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Vásconez, P. M., Medina, G., & Hofstede, R. (2001). *Los Páramos del Ecuador*. Quito - Ecuador.
- Vilá Valentí. (1988). *Cartografía Base. Gran Atlas del Mundo*. (S.S, Ed.) Barcelona: Plaza & Janés Editores.

WordPress. (2015). *Aprendizaje de las Ciencias Sociales – Canarias*. Recuperado el 20 de Octubre de 2016, de <https://socialesdigital.wordpress.com/1o-eso-criterios-de-evaluacion-y-estandares-de-aprendizaje-evaluables/1-coordenadas-geograficas-longitud-y-latitud-como-localizar-un-lugar-concreto-en-la-superficie-terrestre-los-husos-horarios/>

Zambrano, (2016). *Estudio multitemporal de la cobertura vegetal y uso de suelo de la reserva de producción de fauna chimborazo*. (Tesis de grado. Ingeniero Forestal). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba.

XIII. ANEXOS

Anexo 1. Entrevistas aplicadas a antiguos y actuales funcionarios de la RPFCH



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



“PREDICCIÓN DE BOFEDALES A TRAVÉS DEL TRATAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES APLICANDO EL ALGORITMO RANDOM FOREST EN LA RESERVA DE PRODUCCIÓN DE FAUNA CHIMBORAZO”

La presente entrevista tiene la finalidad de identificar las acciones de manejo de los bofedales en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo en relación a la conservación de los bofedales, en una línea de tiempo. Por favor, responda las siguientes preguntas con sinceridad, los datos proporcionados son confidenciales y serán empleados sólo para fines académicos. Gracias.

Nombre:..... Cargo que desempeña o
desempeño:.....
Años de servicio:..... Año en el que formo parte de la RPFCH:.....

1. En el año que usted formo parte de la administración de la RPFCH ¿existió un plan de manejo?

Si () No ()
¿Porqué?.....
.....
.....

2. ¿Existió políticas para el manejo de la RPFCH?

Si () No ()
Cuales?.....
.....
.....

3. ¿Cuáles fueron los objetivos del plan de manejo de la RPFCH?

.....
.....
.....
.....

4. ¿Existió programas de manejo para la RPFCH?

Si () No ()
Cuales?.....
.....

5. ¿Existió un presupuesto para la ejecución del plan de manejo de la RPFCH?

Si () No ()
¿Cuánto por cada año?
.....

¿Quién financio?

.....

6. ¿Conoce usted los bofedales (moyas o almohadillas) de la RPFCH?

Si () No()

Cuales?.....

.....

7. ¿Cuáles cree usted que son las principales amenazas para los bofedales?

.....

.....

.....

8. ¿Dentro del plan de manejo de la RPFCH existió un programa específico para el manejo de los bofedales?

Si () No()

Cuales?.....

.....

.....

9. ¿Cuáles fueron las metas que se cumplieron en el manejo de los bofedales?

.....

.....

.....

10. ¿Hubo apoyo por parte del personal administrativo en la conservación de los bofedales?

Si () No()

Porque?.....

.....

11. ¿Hubo apoyo por parte de las comunidades aledañas a la RPFCH en la conservación de los bofedales?

Si () No()

Porque?.....

.....

12. ¿Qué estrategias se siguieron para el manejo de los bofedales?

.....

.....

.....

13. ¿Se ejecutó un monitoreo para conocer el manejo de los bofedales?

Si () No()

Cuales?.....

.....

14. ¿Cree usted que se cumplió con los objetivos, establecidos para el manejo de los bofedales?

Si () No()

Cuales?.....

15. En su opinión ¿cree usted que existió resultados positivos en el manejo de bofedales para el año en el cual formo parte de la RPFCH?

.....

.....

.....

Anexo 2. Base de datos Herramienta UICN

Tabla 11.34. Cálculo de la reducción por año

AÑO	ABT	PROP	EXTENCIÓN RF
1991	164.8	164.8	164.80
1992	160.7904	158.7367	
1993	156.7808	152.8966	
1994	152.7712	147.2712	
1995	148.7616	141.8529	
1996	144.752	136.6339	
1997	140.7424	131.6069	
1998	136.7328	126.7649	
1999	132.7232	122.101	
2000	128.7136	117.6087	
2001	124.704	113.2817	101.5
2002	120.6944	109.1139	
2003	116.6848	105.0994	
2004	112.6752	101.2326	
2005	108.6656	97.50811	
2006	104.656	93.92063	
2007	100.6464	90.46514	
2008	96.6368	87.13678	
2009	92.6272	83.93088	
2010	88.6176	80.84292	76.7
2011	84.608	77.86858	
2012	80.5984	75.00367	
2013	76.5888	72.24416	
2014	72.5792	69.58618	
2015	68.5696	67.02599	
2016	64.56	64.56	64.56
2017	60.5504	62.18473	
2018	56.5408	59.89686	
2019	52.5312	57.69315	
2020	48.5216	55.57053	
2021	44.512	53.526	
2022	40.5024	51.55669	
2023	36.4928	49.65984	
2024	32.4832	47.83277	

AÑO	ABT	PROP	EXTENSIÓN RF
2025	28.4736	46.07293	
2026	24.464	44.37783	
2027	20.4544	42.7451	
2028	16.4448	41.17244	
2029	12.4352	39.65763	
2030	8.4256	38.19857	
2031	4.416	36.79318	
2032	0.4064	35.4395	
2033	-3.6032	34.13562	
2034	-7.6128	32.87972	
2035	-11.6224	31.67002	
2036	-15.632	30.50483	
2037	-19.6416	29.38251	
2038	-23.6512	28.30148	
2039	-27.6608	27.26022	
2040	-31.6704	26.25727	
2041	-35.68	25.29122	
2042	-39.6896	24.36072	
2043	-43.6992	23.46445	
2044	-47.7088	22.60115	
2045	-51.7184	21.76962	
2046	-55.728	20.96868	
2047	-59.7376	20.19721	
2048	-63.7472	19.45412	
2049	-67.7568	18.73837	
2050	-71.7664	18.04896	
2051	-75.776	17.38491	
2052	-79.7856	16.74529	
2053	-83.7952	16.1292	
2054	-87.8048	15.53578	
2055	-91.8144	14.9642	
2056	-95.824	14.41364	
2057	-99.8336	13.88334	
2058	-103.843	13.37255	
2059	-107.853	12.88055	
2060	-111.862	12.40665	
2061	-115.872	11.95019	
2062	-119.882	11.51053	
2063	-123.891	11.08703	
2064	-127.901	10.67912	
2065	-131.91	10.28622	
2066	-135.92	9.907775	

Nota: UICN, 2014

Anexo 3. Fotografías de los 5 Bofedales estudiados**Figura 11.474. Mechahuasca**

Nota: (Andrade, 2016)

**Figura 11.55. Río Blanco**

Nota: (Andrade, 2016)

**Figura 11.56. Los Hieleros**

Fotografía: Valeria Flores Cantos.



Figura 11.487. Pampas Salasaca
Fotografía: Valeria Flores Cantos.



Figura 11.498. Cruz del Arenal 2
Fotografía: Valeria Flores Cantos.