



# POSGRADOS

## MAESTRÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES CON MENCIÓN EN REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN AMBIENTAL

RPC-SO-17-NO.363-2020

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

INFORMES DE INVESTIGACIÓN

TEMA:

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LOS  
CAMBIOS EN LA COBERTURA  
VEGETAL DEL ÁREA NACIONAL DE  
RECREACIÓN QUIMSACocha

AUTORA:

TANIA MARISOL NARANJO CABRERA

DIRECTOR:

DIEGO ALEJANDRO PARRA GONZÁLEZ

CUENCA – ECUADOR  
2024



**Autora:****Tania Marisol Naranjo Cabrera**

Ingeniera Ambiental.

Candidata a Magíster en Recursos Naturales Renovables con Mención en Remediación y Restauración Ambiental por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.  
tnaranjo439@gmail.com

**Dirigido por:****Diego Alejandro Parra González**

Ingeniero Ambiental.

Máster en Geomática -Orientada al Ordenamiento Territorial.

Máster en Ingeniería Geodésica y Cartografía; Máster en Planificación territorial.

dapgo@yahoo.com

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos e investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

**DERECHOS RESERVADOS**

2024 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

TANIA MARISOL NARANJO CABRERA

Análisis multitemporal de los cambios en la cobertura vegetal del área nacional de recreación Quimsacocha

## *DEDICATORIA*

A mis queridos hijos, Diego Andrés e Isabella Martina, por ser la luz que ilumina mis días y la inspiración que me impulsa a alcanzar mis sueños. Su alegría, curiosidad y amor incondicional son mi mayor tesoro y la fuerza que me sostiene en los momentos más desafiantes.

A mi amado esposo, Diego Céleri, por su amor, paciencia y constante apoyo. Su fe en mí y sus palabras de aliento han sido fundamentales para la realización de este trabajo. Gracias por caminar a mi lado en esta travesía y por compartir cada logro y cada reto con tanto cariño.

A mi amada madre Martha Cabrera, cuyo amor incondicional y sacrificios han sido la base sobre la cual he construido mis sueños. Gracias por ser mi ejemplo de fortaleza y perseverancia.

Este trabajo es para ustedes, con todo mi amor y gratitud.

Tania Naranjo Cabrera

## *AGRADECIMIENTO*

Primero, quiero expresar mi profunda gratitud a Dios y a la Virgen Purísima de Macas por haberme guiado y dado fortaleza durante todo este proceso y en mi vida. Su protección y bendiciones han sido esenciales para superar cada desafío y alcanzar este importante logro en mi vida académica y profesional.

A mi tutor, Ing. Alejandro Parra, le extiendo mi más sincero agradecimiento por su invaluable orientación, paciencia y apoyo constante. Su experiencia, conocimiento y profesionalismo han sido fundamentales para el desarrollo y la finalización de este trabajo de investigación. Gracias por su dedicación y por creer en mi capacidad para llevar a cabo este proyecto.

A mis amadas hermanas Marcia y Lorena, a mis queridos suegros Norma y Vicente gracias por su apoyo y cariño a lo largo de este camino. Su compañía y comprensión han sido vitales para mantenerme motivada y enfocada.

Eternamente gracias.

Tania Naranjo Cabrera

# TABLA DE CONTENIDO

Resumen .....	10
Abstract .....	11
1. Introducción .....	12
2. Determinación del problema .....	14
2.1. Objetivos .....	15
2.1.1. Objetivo general .....	15
2.1.2. Objetivos específicos .....	15
3. Marco teórico referencial .....	17
3.1. Sistema Nacional de Áreas Protegidas .....	17
3.1.1. Área nacional de recreación Quimsacocha .....	18
3.2. Cobertura vegetal .....	20
3.2.1. Cobertura vegetal en páramos .....	20
3.2.1.1. Factores de cambio en la cobertura vegetal .....	22
3.2.1.2. Impactos de los cambios en la cobertura vegetal .....	23
3.3. Teledetección .....	24
3.3.1. Sensores remotos .....	26
3.3.2. Satélites de teledetección .....	26
3.3.3. Imágenes satelitales .....	28
3.3.4. Sistemas de información geográfica .....	29
3.3.5. Corrección de imágenes Landsat .....	30
3.4. Índice de vegetación de diferencia normalizada .....	32
3.5. Clasificación de imágenes satelitales .....	33
3.5.1. Clasificación Supervisada .....	33
3.5.2. Clasificación No Supervisada .....	34
3.6. Análisis multitemporal .....	34
4. Materiales y metodología .....	36
4.1. Descripción del área de estudio .....	36
4.1.1. Ecosistemas del ANRQ .....	38
4.1.1.1. Herbazal del Páramo .....	39
4.1.1.2. Herbazal inundable del páramo .....	39
4.1.1.3. Arbustal siempre verde y herbazal del páramo (bosque nativo) .....	40

4.2.	Recolección de información .....	40
4.2.1.	Levantamiento de puntos de referencia .....	41
4.3.	Selección y descarga de imágenes satelitales .....	41
4.4.	Preprocesamiento de imágenes Landsat .....	43
4.4.1.	Corrección atmosférica .....	43
4.4.2.	Pan-sharpening.....	44
4.4.3.	Cambio de zona .....	45
4.5.	Procesamiento de imágenes Landsat .....	46
4.5.1.	Cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada .....	47
4.5.2.	Clasificación de la cobertura terrestre .....	49
4.5.2.1.	Composición de bandas.....	50
4.5.2.2.	Creación de áreas de entrenamiento.....	50
4.5.2.3.	Generación de firmas espectrales.....	52
4.5.2.4.	Clasificación supervisada .....	53
4.6.	Evaluación de la clasificación supervisada .....	55
4.6.1.	Matriz de confusión.....	55
4.6.2.	Índice kappa.....	58
4.7.	Matriz de transición.....	59
5.	Resultados y discusión.....	63
5.1.	Información satelital.....	63
5.2.	Análisis del estado de la cobertura vegetal.....	64
5.3.	Cobertura terrestre del ANRQ.....	67
5.3.1.	Coberturas del ANRQ año 1998 .....	68
5.3.1.1.	Validación de resultados: matriz de confusión e índice kappa 1998 .	70
5.3.2.	Coberturas del ANRQ año 2015 .....	71
5.3.2.1.	Validación de resultados: matriz de confusión e índice kappa 2015 .	73
5.3.3.	Coberturas del ANRQ año 2024 .....	75
5.3.3.1.	Validación de resultados: matriz de confusión e índice kappa 2024 .	77
5.4.	Análisis del cambio de la cobertura vegetal en los años 1998, 2015 y 2024 ..	78
5.4.1.	Transición de cobertura terrestre periodo 1998-2015 .....	81
5.4.2.	Transición de cobertura terrestre periodo 2015-2024 .....	85
5.4.3.	Transición de cobertura terrestre periodo 1998-2024 .....	89
6.	Conclusiones.....	92
7.	Referencias .....	95

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Categorías de Manejo del Sistema Nacional de Áreas Protegidas.....	18
<b>Figura 2</b> Representación visual Área Nacional de Recreación Quimsacocha .....	19
<b>Figura 3</b> Elementos de Teledetección desde satélites .....	25
<b>Figura 4</b> Mapa de ubicación del área de estudio .....	37
<b>Figura 5</b> Visor GloVis para selección y descarga de imágenes satelitales Landsat .....	42
<b>Figura 6</b> Herramienta para corrección atmosférica de imágenes satelitales .....	44
<b>Figura 7</b> Visualización de la herramienta SCP - Pan-sharpening.....	45
<b>Figura 8</b> Herramienta para cambio de zona UTM 17N a UTM 17S.....	46
<b>Figura 9</b> Herramienta para el corte de las imágenes de la zona de estudio.....	47
<b>Figura 10</b> Herramienta para calcular el NDVI.....	48
<b>Figura 11</b> Herramienta para la combinación de bandas .....	50
<b>Figura 12</b> Herramienta para crear el mapa de polígonos .....	51
<b>Figura 13</b> Áreas de entrenamiento para clasificación supervisada .....	51
<b>Figura 14</b> Herramienta para la creación de firmas espectrales .....	52
<b>Figura 15</b> Herramienta de máxima verosimilitud para Clasificación Supervisada.....	53
<b>Figura 16</b> Herramienta para conversión a polígono .....	54
<b>Figura 17</b> Herramienta para agrupar polígonos por clase de cobertura .....	55
<b>Figura 18</b> Herramienta para obtener los datos de los píxeles .....	56
<b>Figura 19</b> Matriz de Confusión obtenida luego de ejecutar la herramienta Pivot table	57
<b>Figura 20</b> Proceso para la sobreposición de mapas .....	59
<b>Figura 21</b> Resultado de la matriz de transición en ArcMap .....	60
<b>Figura 22</b> Zonas con o sin transición definidas con la herramienta dissolve.....	61
<b>Figura 23</b> Combinación RGB de las imágenes Landsat 5, Landsat 8 y Landsat 9 obtenidas para el desarrollo del estudio.....	64
<b>Figura 24</b> Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada año 1998, 2015 y 2024 ....	66
<b>Figura 25</b> Composición de coberturas en 1998.....	69
<b>Figura 26</b> Mapa de cobertura del ANRQ año 1998 .....	70
<b>Figura 27</b> Composición de cobertura año 2015 .....	72
<b>Figura 28</b> Mapa de cobertura del ANRQ año 2015 .....	73
<b>Figura 29</b> Composición de cobertura año 2024 .....	76
<b>Figura 30</b> Mapa de cobertura del ANRQ año 2024 .....	76
<b>Figura 31</b> Cambio de la cobertura terrestre del ANRQ del año 1998-2015-2024 .....	81
<b>Figura 32</b> Mapa de transición de cobertura de 1998 a 2015 .....	83
<b>Figura 33</b> Mapa de transición de cobertura de 2015 a 2024 .....	86
<b>Figura 34</b> Evidencia de la presencia de ganadería extensiva de camélidos dentro del ANRQ .....	87
<b>Figura 35</b> Marcas de los vehículos que ingresan al ANRQ .....	88
<b>Figura 36</b> Mapa de transición de cobertura de 1998 a 2024 .....	91

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Características de los satélites Landsat (4-9) .....	27
<b>Tabla 2</b> Combinaciones de banda para color natural .....	28
<b>Tabla 3</b> Coordenadas geográficas según Acuerdo Ministerial No. 007 .....	36
<b>Tabla 4</b> Principales ecosistemas del ANRQ .....	38
<b>Tabla 5</b> Previsualización y características de las imágenes Landsat .....	43
<b>Tabla 6</b> Rangos establecidos para interpretación del NDVI.....	48
<b>Tabla 7</b> Cobertura y uso de la tierra por el MAG .....	49
<b>Tabla 8</b> Categorización de coberturas para el área de estudio.....	49
<b>Tabla 9</b> Escala de interpretación del índice Kappa.....	58
<b>Tabla 10</b> Detalle Matriz de Transición.....	62
<b>Tabla 11</b> Estadística de la clasificación del NDVI.....	65
<b>Tabla 12</b> Dinámica Porcentual del NDVI en los años 1998, 2015 y 2024.....	67
<b>Tabla 13</b> Clasificación de cobertura ANRQ año 1998.....	68
<b>Tabla 14</b> <i>Matriz de confusión e índice Kappa de validación de la clasificación supervisada</i> .....	71
<b>Tabla 15</b> Clasificación de cobertura ANRQ año 2015.....	72
<b>Tabla 16</b> <i>Matriz de confusión e índice Kappa de validación de la clasificación supervisada año 2015</i> .....	74
<b>Tabla 17</b> Clasificación de cobertura ANRQ año 2024.....	75
<b>Tabla 18</b> <i>Matriz de confusión e índice Kappa de validación de la clasificación supervisada año 2024</i> .....	77
<b>Tabla 19</b> Cobertura terrestre del ANRQ del año 1998-2015-2024 .....	79
<b>Tabla 20</b> Matriz transición periodo 1998-2015.....	82
<b>Tabla 21</b> Mapa de transición de cobertura de 1998 a 2015 .....	85
<b>Tabla 22</b> Matriz transición periodo 1998 - 2024.....	90

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1</b> <i>Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada</i> .....	32
<b>Ecuación 2</b> <i>Cálculo del NDVI para Landsat 5</i> .....	33
<b>Ecuación 3</b> <i>Cálculo del NDVI para Landsat 8 y Landsat 9</i> .....	33
<b>Ecuación 4</b> Índice Kappa.....	58

# ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LOS CAMBIOS EN LA COBERTURA VEGETAL DEL ÁREA NACIONAL DE RECREACIÓN QUIMSACOCHA

AUTORA:

TANIA MARISOL NARANJO CABRERA

## RESUMEN

El presente estudio analiza los cambios en la cobertura vegetal del Área Nacional de Recreación Quimsacocha entre 1998 y 2024, mediante imágenes satelitales Landsat 5, Landsat 8 y Landsat 9. La metodología incluye el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y la clasificación supervisada. Los resultados muestran una mejora en la calidad de la vegetación, con un aumento del NDVI máximo de 0,78 en 1998 a 0,80 en 2024. Los cambios más significativos en la cobertura vegetal incluyen la reducción de bosque nativo, que pasó de 0,64% a 0,58% y del herbazal inundable del páramo, que disminuyó de 15,81% a 11,66%; en contraste el herbazal del páramo se incrementó de 82,86% a 85,99%. Además, en 2015 y 2024 aparecieron nuevas coberturas como plantación forestal (0,15%) y pastizal (0,94%), que no estaban presentes en 1998. En total, el 17,02% del área de estudio experimentó cambios entre 1998 y 2024, mientras que el 82,98% permaneció sin modificaciones. El índice Kappa confirmó una fuerza de concordancia casi perfecta para la clasificación supervisada. Este estudio proporciona una base para investigaciones futuras sobre la relación entre los cambios en la cobertura vegetal y los impactos climáticos y antrópicos, y ofrece un referente para la toma de decisiones enfocadas en la conservación y manejo sostenible.

**Palabras clave:**

NDVI, clasificación supervisada, imágenes satelitales, análisis multitemporal, cobertura vegetal.

## ABSTRACT

---

This study analyzes changes in vegetation cover in the Quimsacocha National Recreation Area between 1998 and 2024, using Landsat 5, Landsat 8 and Landsat 9 satellite images. The method includes the calculation of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and supervised classification. The results show an improvement in vegetation quality, with an increase in maximum NDVI from 0.78 in 1998 to 0.80 in 2024. The most significant changes in vegetation cover include the reduction of native forest from 0.64% to 0.58% and páramo flooded grassland, which decreased from 15.81% to 11.66%; in contrast páramo grassland increased from 82.86% to 85.99%. In addition, in 2015 and 2024, new coverages such as forest plantation (0.15%) and pasture (0.94%), which were not present in 1998, appeared. In total, 17.02% of the study area experienced changes between 1998 and 2024, while 82.98% remained unchanged. The Kappa index confirmed an almost perfect concordance strength for the supervised classification. This study provides a basis for future research on the relationship between changes in vegetation cover and climatic and anthropogenic impacts and offers a reference for decision making focused on conservation and sustainable management.

**Keywords:**

NDVI, supervised classification, satellite imagery, multitemporal analysis, vegetation cover.

# 1. INTRODUCCIÓN

La cobertura vegetal cumple varias funciones siendo la más importante la de mantener el equilibrio ecológico del medio ambiente, puesto que regula el ciclo hidrológico y aporta para la conservación del suelo, además de garantizar el sustento para el ser humano y para la extensa diversidad biológica terrestre (CEPAL, 2021; Suqui et al., 2021).

Sin embargo, las actividades antrópicas han provocado alteraciones en su estructura natural, de acuerdo con la (FAO, 2020) los bosques ocupan el 31% de la superficie de la tierra, desde 1990 en el mundo se han perdido alrededor de 178 millones de hectáreas de bosques con un ritmo de pérdida de 4,7 millones ha/año, así mismo tras la Reforma Agraria, la expansión de actividades agrícolas se extendió hacia áreas de páramo de los Andes ecuatorianos, donde no se cuenta con condiciones ambientales adecuadas para monocultivos, debido al clima extremo, la acidez y baja fertilidad del suelo. Esta presión demográfica en los páramos, junto con la deforestación y el uso de tierras naturales, ha dificultado la estimación precisa de los cambios ocurridos a lo largo del tiempo (Paula et al., 2018).

Esta problemática muestra la necesidad e importancia de realizar un monitoreo constante de los cambios que se generan en la cobertura vegetal con el propósito de tomar acciones tendientes a la conservación y recuperación de estas zonas, para lo cual el uso de tecnologías digitales como son los sensores satelitales han demostrado ser una herramienta muy valiosa (Paula et al., 2018), esto se evidencia en varios estudios realizados hasta la fecha, entre ellos se cita a (Veneros et al., 2020) que determinaron la importancia del uso de los sensores remotos en estudios y actividades de monitoreo de cambios de coberturas vegetales.

Así también, en Cuba (Figueredo F et al., 2020) estudiaron el cambio de la cobertura vegetal del área de “Los Números” perteneciente al municipio de Guisa, a través de la clasificación supervisada de imágenes satelitales Landsat 5 y Landsat 8 entre los años 1986 y 2016. De igual manera en Brasil (Morbeck & Vilhema, 2022) evaluaron

Los cambios ocurridos, en la cobertura vegetal de la cuenca hidrográfica del arroyo Ceroula entre los años 1987 y 2016; (Peñaloza-Miranda et al., 2020) aplicaron un análisis multitemporal de imágenes satelitales entre los años 1992 a 2017 para determinar si es que existían cambios en la cobertura vegetal en la microcuenca El Volcán en España.

En Ecuador también se han realizado varios estudios en donde se aplica el análisis multitemporal a través de imágenes satelitales, entre ellos, (Barrero M et al., 2022) en su investigación identificaron cinco usos de suelo en el sector Guangras perteneciente al Parque Nacional Sangay; (Camacho López et al., 2021; Camacho-López et al., 2022) mediante un análisis multitemporal en la provincia de Zamora Chinchipe y en la provincia de Morona Santiago respectivamente, determinaron que en toda la extensión de cada una de estas provincias se ha generado deforestación entre 1990 a 2018 alterando el uso de suelo, con la pérdida de bosque nativo y aumento de áreas agropecuarias.

Considerando lo expuesto, se ve la necesidad de realizar el “Análisis multitemporal del cambio en la cobertura vegetal del Área Nacional de Recreación Quimsacocha” con la finalidad de conocer el estado de conservación de dicha área protegida. En este sentido la presente investigación contiene una sección en donde se describe el marco teórico referencial que corresponde al apartado 3 en donde se presentan los conceptos que fundamentan este estudio. En el apartado 4 se trata la metodología empleada, mientras que en el apartado 5 se muestran los resultados obtenidos y finalmente en el apartado 6 se presentan las conclusiones del trabajo.

## 2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

Ecuador forma parte de los 17 países megadiversos del mundo por la cantidad y variedad de ecosistemas además de su diversidad de flora y fauna (Tillaguango Pintado et al., 2023), el 13,62% del territorio nacional se encuentra dentro de áreas protegidas y de ellos el 3,85% corresponde al área continental y Galápagos (MAATE, 2018).

Al igual que otras áreas protegidas, el Área Nacional de Recreación Quimsacocha, ubicada en la provincia del Azuay, es un ecosistema de gran importancia tanto a nivel local como regional debido a su diversidad biológica y su relevancia para la conservación de recursos naturales conjuntamente con los servicios ecosistémicos que presta (INSIGMA et al., 2018). Ésta área se conforma de 3217,12 Ha que en 2012 el Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica recuperó de las 12000 Ha concesionadas para explotación minera (MAATE, 2015a) desde entonces ha sido administrada por el GAD Municipal de Cuenca a través de la Empresa Pública Municipal ETAPA EP (INSIGMA et al., 2018).

Los ecosistemas de páramo son uno de los más frágiles y a su vez los que mayores servicios ecosistémicos prestan como es principalmente el de abastecimiento de agua para uso humano, la captura de carbono, regular los procesos biológicos y sostener la biodiversidad, pese a ello son los menos investigados (Quichimbo et al., 2012), por lo que es necesario tomar acciones orientadas a la conservación de esta área y de los Andes ecuatorianos en general, siendo necesario contar con información actualizada del estado de la cobertura vegetal, suelo, agua, fauna, entre otros elementos (Jantz & Behling, 2012).

La teledetección y los SIG son una buena herramienta para determinar diferentes impactos ambientales (Flórez-Yepes et al., 2017) permitiendo cuantificar los cambios espacio temporales de la cobertura vegetal, uso de suelo y otros, además que con el estudio de la modificación de la vegetación se puede determinar la velocidad de deforestación/reforestación así como su extensión (Barrero M et al.,

2022). Con el análisis de imágenes satelitales es posible obtener información valiosa y precisa del estado de la vegetación con propósitos de evaluación y monitoreo (Mamani-Vargas & Román-Arce, 2021).

Ante el panorama descrito, este estudio tiene como finalidad determinar los cambios en la cobertura vegetal del Área Nacional de Recreación Quimsacocha mediante el uso de imágenes satelitales, como base para la toma de decisiones a nivel local y regional, permitiendo el planteamiento y la implementación de políticas públicas y acciones dirigidas a la conservación y restauración de la cobertura vegetal, la importancia de esta investigación radica en que se aportará al avance del conocimiento debido a que no existen estudios de análisis multitemporal sobre cobertura vegetal en esta área, por lo tanto, se responde a la pregunta:

¿Cuáles son los cambios en la cobertura vegetal del Área Nacional de Recreación Quimsacocha, de la provincia del Azuay durante los últimos 30 años?

## 2.1. OBJETIVOS

### 2.1.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar los cambios en la cobertura vegetal mediante imágenes satelitales que permita visualizar el estado de conservación del Área Nacional de Recreación Quimsacocha, de la provincia del Azuay, durante los últimos 30 años.

### 2.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener información satelital disponible de libre acceso de la zona de Quimsacocha en un período de 30 años para su caracterización.
- Calcular el índice de vegetación mediante la aplicación del Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (NDVI) en el Área Nacional de Recreación Quimsacocha

- Realizar el análisis multitemporal de la cobertura vegetal de del Área Nacional de Recreación Quimsacocha mediante clasificación supervisada de imágenes satelitales, disponibles de libre acceso, en un periodo de 30 años.

## 3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

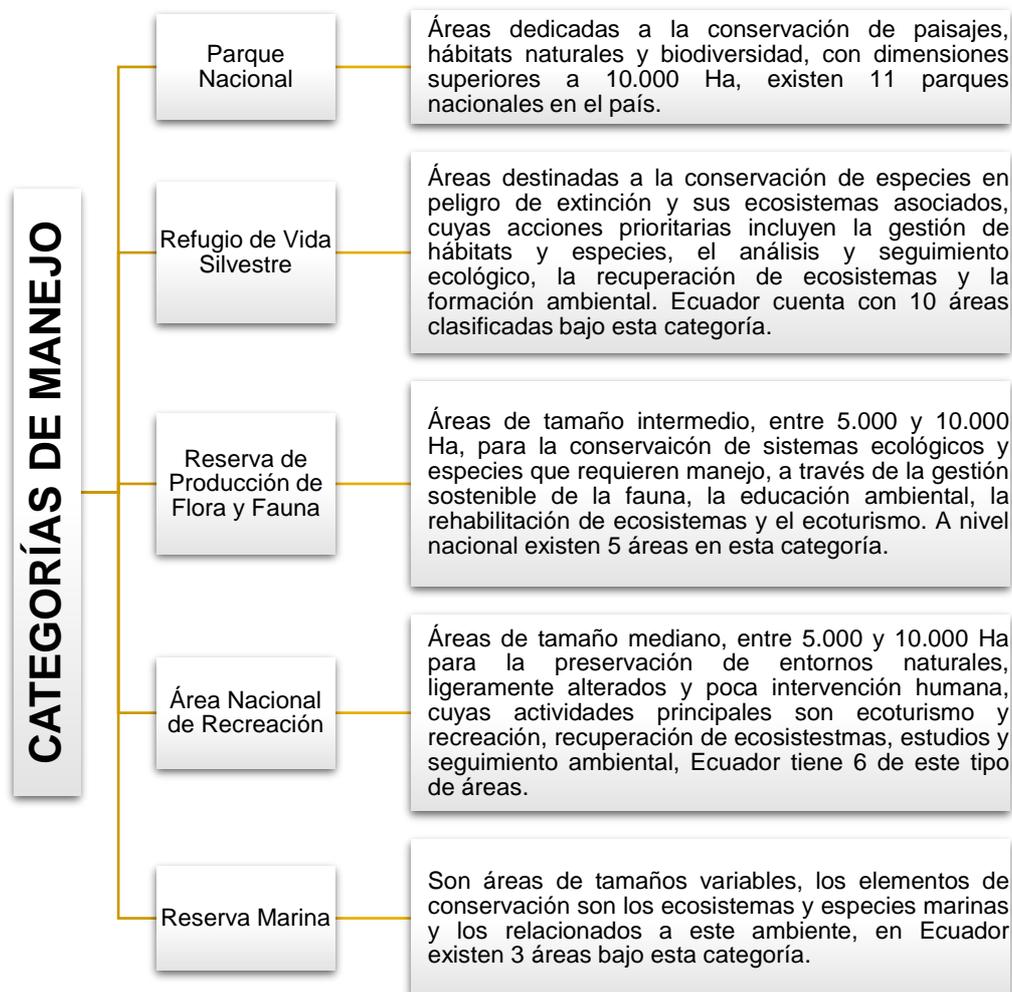
En este apartado, se exponen los fundamentos teóricos relacionados con la cobertura vegetal de los ecosistemas de páramo, su importancia, así como los factores que influyen en su cambio y los impactos inherentes al mismo. Además, se resalta la utilidad del análisis multitemporal y el uso de la teledetección y sensores remotos para determinar y monitorear los cambios en la cobertura vegetal.

### 3.1. SISTEMA NACIONAL DE ÁREAS PROTEGIDAS

Conforme lo establece la Constitución de la República del Ecuador del año 2008 en su artículo 405: “El sistema nacional de áreas protegidas garantizará la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de las funciones ecológicas. (...)” (Constitución de la República del Ecuador, 2008) y de acuerdo con el Art. 37 del Código Orgánico del Ambiente el “Sistema Nacional de Áreas Protegidas estará integrado por los subsistemas estatal, autónomo descentralizado, comunitario y privado. (...)” (Código Orgánico del Ambiente, 2018). Así mismo, el Art. 41 de dicho instrumento legal determina las categorías de manejo del Sistema Nacional de Áreas Protegidas, como Parque Nacional, Refugio de Vida Silvestre, Reserva de Producción de Flora y Fauna, Área Nacional de Recreación y Reserva Marina, en la Figura 1 se detallan estas categorías de manejo:

**Figura 1**

*Categorías de Manejo del Sistema Nacional de Áreas Protegidas*



Fuente: (Código Orgánico del Ambiente, 2018; MAATE, 2015b)

### 3.1.1. ÁREA NACIONAL DE RECREACIÓN QUIMSACOCHA

El Área Nacional de Recreación Quimsacocha se encuentra al sur del Ecuador en la provincia del Azuay el 98,4% se ubica en el cantón Cuenca y el 1,6% en el cantón San Fernando (Lee et al., 2021); formando parte de la Reserva de Biosfera Macizo del Cajas (INSIGMA et al., 2018). Esta área corresponde a 3217,12 Ha, que en 2012 el Ministerio del Ambiente en ese entonces, ahora Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, recuperó de las 12000 Ha concesionadas para explotación

minera (MAATE, 2015a) fue ingresada al Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador mediante Acuerdo Ministerial No. 007 del 25 de enero de 2012, y desde entonces ha sido administrada por el GAD Municipal de Cuenca a través de la Empresa Pública Municipal ETAPA EP. Debido a que en áreas adyacentes existen concesiones mineras de metales como oro, plata y cobre, se creó una zona de uso especial minero (INSIGMA et al., 2018).

## Figura 2

*Representación visual del Área Nacional de Recreación Quimsacocha*



El Área Nacional de Recreación Quimsacocha tiene un piso altitudinal que va de los 3400 a los 4000 msnm, su ecosistema predominante es el páramo, compuesto mayoritariamente por gramíneas (Lee et al., 2021), posee una gran biodiversidad y especies endémicas, además son de gran importancia dentro del proceso hidrológico, siendo reguladores y proveedores de agua para las comunidades locales y la ciudad de Cuenca, a la vez que controlan la erosión (Cervantes et al., 2021; INSIGMA et al., 2018; Mosquera et al., 2022).

## 3.2. COBERTURA VEGETAL

Para una mejor interpretación de la cobertura vegetal en páramos es necesario hacer una diferenciación entre los conceptos de cobertura terrestre, uso de suelo y cobertura vegetal.

La cobertura terrestre se refiere a los elementos que revisten la superficie de la Tierra, abarcando tanto componentes naturales como artificiales, esto incluye la vegetación, cuerpos de agua, suelos desnudos, construcciones e infraestructura, es decir, se centra en lo que hay en el suelo (Farnum & Murillo, 2019; Figueredo F et al., 2020).

El uso de suelo, por otro lado, describe como los seres humanos aprovechan y gestionan esas superficies, como para actividades económicas, urbanas, industriales o de conservación de la biodiversidad, se enfoca en cómo se utiliza el terreno (Farnum & Murillo, 2019; Figueredo F et al., 2020).

La cobertura vegetal, por su parte, corresponde específicamente a toda la vegetación que cubre un determinado espacio, sin discriminar entre especies nativas o introducidas. Aunque tradicionalmente se asocia con especies naturales, es importante incluir también aquellas de origen cultural, como plantaciones forestales, cultivos, pastizales y otros que aunque no sean naturales cumplen funciones ecológicas significativas (Cortes Vargas & Rubio Zafra, 2017).

### 3.2.1. COBERTURA VEGETAL EN PÁRAMOS

La diversidad de la vegetación natural está influenciada por distintos factores, tales como el clima, la forma del terreno, el tipo de suelo y la cantidad de agua disponible (Hernández Moreno et al., 2021) cumpliendo funciones como controlar los procesos erosivos (Colazo et al., 2023), ser nicho ecológico para la fauna, por ejemplo, (López-Giraldo et al., 2023) encontraron que los macroinvertebrados son más diversos y abundantes en sitios que tienen mejores condiciones de cobertura vegetal, e influir en el ciclo hidrológico así (Célleri Alvear et al., 2005)

determinaron que la cobertura vegetal natural del páramo tiene mayor capacidad de retención de agua que las zonas con pinos.

El páramo es un ecosistema de alta montaña, se ubica en un rango de altitudes entre los 3000 y 5000 m (Mena Vásconez et al., 2011), cuya vegetación se caracteriza por ser de tipo arbustiva con presencia de gramíneas, hierbas y frailejones (Yarce & Moncayo, 2024), el 60% de las plantas del páramo son endémicas, debido a que han logrado adaptarse a las extremas condiciones climáticas, con alta radiación solar en el día y bajas temperaturas en la noche (Llambí et al., 2012), generando una gran diversidad biológica con numerosos servicios ecosistémicos (Ayala et al., 2014) entre ellos el abastecimiento de agua para comunidades y ciudades (Yarce & Moncayo, 2024) siendo su cobertura vegetal un elemento primordial dentro de la regulación hídrica de esta zona (Cervantes et al., 2021).

En Ecuador, el páramo ocupa alrededor del 5% del territorio cuya superficie corresponde a 12.650 km<sup>2</sup>, extendiéndose a lo largo de la Cordillera de los Andes (Mena Vásconez et al., 2011) (MAATE, 2013); si bien no se conoce con exactitud el número de especies vegetales, (Caranqui Aldaz et al., 2021) manifiestan que el páramo ecuatoriano estaría habitado por 1524 especies de plantas registradas hasta la fecha. Con base en el Sistema de clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental (Espinel Ortiz et al., 2023) manifiestan que los páramos ecuatorianos se pueden diferenciar como subpáramo, páramo y superpáramo.

De acuerdo con (Buytaert et al., 2014) el subpáramo se localiza a una altitud de 3000 a 3500 m, cuya vegetación se caracteriza por estar conformada por árboles, arbustos y matorrales y una densa cobertura de briofitas (Segura Madrigal et al., 2019) con una capa arbórea entre los 5 a 7 m (Espinel Ortiz et al., 2023), esta zona generalmente está habitada por campesinos que tienen por sustento la labranza de la tierra (Saltos Fernández et al., 2024), produciendo el cambio de uso de suelo a agrícola y ganadero, afectando a la cobertura vegetal natural (Espinel Ortiz et al., 2023).

Dentro de esta división, el páramo en sí o propiamente dicho está constituido por pajonales que ocupan el 70% del conjunto del páramo (Espinel Ortiz et al., 2023) con fragmentos de especies arbustivas como el *Polylepis*, esta zona se encuentra en un gradiente altitudinal entre los 3500 a 4100 m (Buytaert et al., 2014), al igual que el subpáramo el páramo también ha sido afectado por la deforestación y el cambio de uso de suelo (Saltos Fernández et al., 2024).

Mientras que el superpáramo, se ubica entre los pajonales y la línea de nieve, sobre los 4100 m, con limitada vegetación (Buytaert et al., 2014), los efectos de las actividades antrópicas asociadas al cambio climático se reflejan también en esta zona, pues las nieves perpetuas van perdiendo espacio y de acuerdo con (Morales B. & Estévez V., 2006) y (Cleef, 2013) se prevé que el límite superior del superpáramo suba hacia el sitio dejado por la nieve y paralelamente el páramo irá ocupando el área inferior del superpáramo.

### 3.2.1.1. FACTORES DE CAMBIO EN LA COBERTURA VEGETAL

A lo largo del tiempo, la vegetación en los páramos ha experimentado cambios significativos en su composición, estructura y extensión, impulsados tanto por factores naturales como por actividades humanas. La expansión agrícola, el sobrepastoreo, la forestación y deforestación, la construcción de infraestructura, los incendios, la introducción de especies y el cambio climático han alterado estos ecosistemas. Estas intervenciones generan una presión constante que transforma el uso original del suelo, provocando deforestación, fragmentación del ecosistema y degradación del suelo (Buytaert et al., 2014; Quichimbo et al., 2012; Radeloff et al., 2024).

De acuerdo con (Alarcón H. & Pabón C., 2013) los ecosistemas de páramo se ven afectados fuertemente por el cambio climático tendiendo a desaparecer, esto se evidencia en el cambio de posición del límite superior del páramo, superpáramo y la nieve perpetua (Hofstede et al., 2014).

El sobrepastoreo es otro factor que incide en el cambio de la cobertura vegetal natural, pues el ganado para satisfacer sus necesidades nutricionales consume mayor cantidad de pasto y su permanente transitar destruye la capa vegetal provocando erosión (Romo R. & Calero R., 2022) y disminuye la capacidad de retención de agua y la fertilidad del suelo (Llambí et al., 2012).

En cuanto a los incendios (Armenteras et al., 2020) mencionan que los páramos son los ecosistemas más sensibles al fuego, y cada año se queman grandes extensiones para convertirlo en área agrícola y pastizales principalmente, y en época de sequía estos incendios se vuelven incontrolables debido a la vegetación muerta ocasionando la pérdida de miles de hectáreas de vegetación natural.

### 3.2.1.2. IMPACTOS DE LOS CAMBIOS EN LA COBERTURA VEGETAL

El cambio en la cobertura vegetal de los páramos, por cualquiera de los factores anteriormente mencionados, genera impactos negativos irreversibles. Esto incluye la pérdida de funcionalidad y resiliencia de los ecosistemas, la fragmentación de hábitats y la disminución de la diversidad vegetal (Anzoategui et al., 2023; Romo R. & Calero R., 2022). En Ecuador, tres cuartas partes del ecosistema de páramo han sido alteradas, con una tasa de pérdida de 1384 Ha/año, lo que equivale a 4 Ha por día convertidas en tierra para actividades agropecuarias (Farfán et al., 2020; Romo R. & Calero R., 2022).

Esta degradación afecta directamente la seguridad hídrica, ya que los páramos son fuentes esenciales de agua, más de la mitad de la población mundial se abastece del agua que proviene de las montañas (Cervantes et al., 2021). La pérdida de vegetación nativa no solo tiene un efecto paisajístico sino que modifica la dinámica de los ecosistemas, su estructura y composición, aumentando la vulnerabilidad a la erosión, deslizamientos y pérdida de suelo fértil (Farfán et al., 2020).

La erosión natural en los páramos puede ser acelerada por varios factores humanos y naturales, como la pérdida de vegetación, el cambio en el uso del suelo hacia pastos y cultivos y los incendios forestales. Sin la vegetación que lo protege, el suelo

queda expuesto y el humus se descompone rápidamente, volviéndose susceptible al arrastre por agua y viento. Además, el pisoteo del ganado y el uso de maquinaria agrícola contribuyen a desintegrar la capa superior del suelo, incrementando la erosión (INSIGMA et al., 2018).

Según ETAPA EP (2012), citado por (INSIGMA et al., 2018), el Área Nacional de Recreación Quimsacocha ha visto sus recursos naturales deteriorarse provocado por problemas con la tenencia de tierras, la expansión de la ganadería, el uso excesivo de pastoreo y las quemadas de vegetación. A esto se suman las actividades como los deportes mecanizados, la minería y la construcción de caminos, las cuales también contribuyen a la degradación ambiental del área. Esto ha provocado la erosión y compactación del suelo, reduciendo su porosidad y por ende su capacidad para retener agua, esencial para la regulación de los caudales, además de la contaminación por sedimentos y la alteración de la flora y fauna nativas.

Tener conocimiento de la variación en la cantidad y estado de la vegetación es fundamental para manejar el ambiente y planificar como usar el territorio. Proteger la vegetación es esencial para equilibrar los ecosistemas, regular el clima y mitigar el impacto del efecto invernadero causado por la actividad humana (Estrada Zúñiga et al., 2024). La pérdida de vegetación en ecosistemas de altura, como en Quimsacocha, compromete seriamente su capacidad para regular el agua. Esto no solo afecta el suministro hídrico, sino que también aumenta la vulnerabilidad a la erosión y deslizamientos de tierra (INSIGMA et al., 2018).

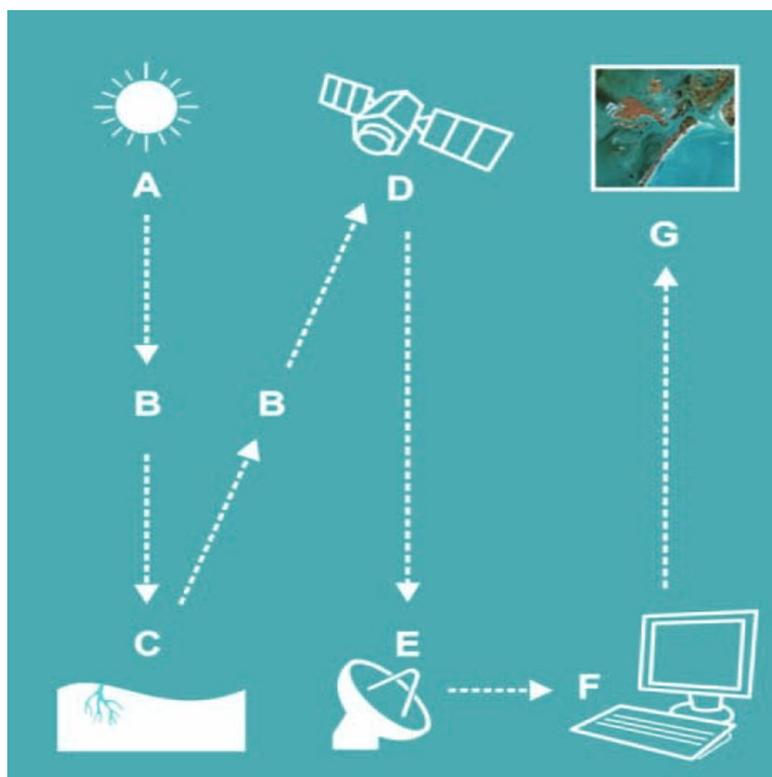
### 3.3. TELEDETECCIÓN

La teledetección en los últimos años se ha convertido en una herramienta indispensable en diversos ámbitos como el ordenamiento territorial, ciencias ambientales, agricultura, meteorología en otros, debido a que es una técnica que sin entrar en contacto con la superficie terrestre se puede obtener información sobre ella (Labrador García et al., 2012).

Autores como (Veneros et al., 2020) definen la teledetección como una serie de métodos que permiten adquirir información sobre un área de nuestro planeta sin necesidad de contacto directo, en donde interaccionan la energía electromagnética (luz o calor) con la superficie terrestre generando los datos que son capturados por sensores remotos (Aguilar, 2015), por tanto, la teledetección usa sensores remotos para captar imágenes del área de estudio, y comprende tanto el procesamiento como la interpretación de dichas imágenes (Labrador García et al., 2012) mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Pues los SIG son una herramienta muy versátil para el procesamiento de información satelital en análisis espacio temporales, es decir, los SIG y la teledetección facilitan la estimación de la magnitud de los cambios de la vegetación y ocupación del suelo (Anzoategui et al., 2023; Escandón et al., 2018).

### **Figura 3**

#### *Elementos de Teledetección desde satélites*



Fuente: (Labrador García et al., 2012)

### 3.3.1. SENSORES REMOTOS

Los sensores remotos son dispositivos, equipos o sistemas diseñados para obtener información de manera rápida y eficaz sobre un objeto, área o fenómeno sin necesidad de estar en contacto directo con ellos (Veneros et al., 2020). Estos sensores pueden ser de tipo pasivo o activo, los primeros usan energía electromagnética de la luz solar para medir la radiación reflejada, lo cual interfiere en la calidad de las imágenes; en cambio los de tipo activo generan su propia energía, emiten ondas y reciben señales reflejadas, su desventaja son los costos de las imágenes y los equipos especializados requeridos para el procesamiento (Jacobo et al., 2024).

Los sensores remotos son transportados por satélites o plataformas aéreas, denominadas también como plataformas de teledetección, que orbitan la Tierra y albergan varios tipos de sensores, tanto pasivos como activos, para capturar, almacenar y transmitir los datos desde el espacio (Veneros et al., 2020).

### 3.3.2. SATÉLITES DE TELEDETECCIÓN

En la actualidad existen varios satélites que se encuentran orbitando el espacio, con distintas características, que capturan imágenes multiespectrales de la superficie terrestre. Algunos satélites son especialmente valiosos para monitorear la cobertura terrestre porque sus imágenes son gratuitas y se pueden descargar directamente desde los SIG (Congedo, 2021), a continuación se enlistan dichos satélites:

- a. Satélites Landsat
- b. Satélite Sentinel-2, Sentinel-3, Sentinel-1
- c. Satélite ASTER
- d. Productos MODIS
- e. Productos GOES
- f. Satélites de la RAE

De acuerdo con (Cortes Leon & Hernandez Martin, 2021; Estrada Zúñiga et al., 2024) los satélites Landsat capturan imágenes de diferentes longitudes de onda, incluyendo luz visible e infrarrojo cercano y medio. Las imágenes Landsat son utilizadas para estudios de vegetación, ofreciendo resultados rápidos y con alta precisión, además que son de fácil adquisición y tienen una base de datos continua y consistente desde 1972.

Ya que, en dicho año, la NASA y el USGS lanzaron el primer satélite Landsat, iniciando una serie de misiones que han proporcionado más de 10 millones de imágenes de la Tierra. Estas han permitido documentar cambios importantes como la pérdida de glaciares y la expansión urbana. Con el lanzamiento de Landsat 8 en 2013, los datos se hicieron accesibles de forma gratuita, lo que incrementó su descarga a más de 100 millones en 2020. Landsat 9, lanzado en 2021, continúa con estas observaciones mejorando el diseño de las misiones anteriores (Bravo M., 2017; Coleman, 2022; Labrador García et al., 2012). En la Tabla 1 se detallan las características de los satélites Landsat 4-9.

**Tabla 1**

*Características de los satélites Landsat (4-9)*

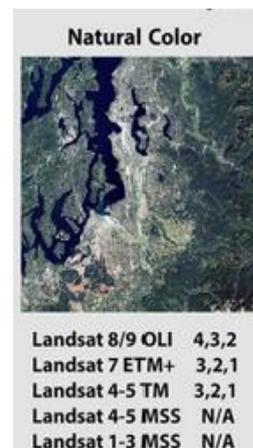
Satélite	Sensor	Bandas	Resolución Espacial	Rango Espectral ( $\mu\text{m}$ )
Landsat 4/5	Thematic Mapper (TM)	7 bandas (visible, NIR, SWIR, TIRS)	30 m (excepto TIRS: 120 m)	0.45 - 2.3 $\mu\text{m}$
Landsat 7	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	8 bandas (añade pancromática)	30 m (excepto TIRS: 60 m, pancromática: 15 m)	0.45 - 2.35 $\mu\text{m}$
Landsat 8/9	Operational Land Imager (OLI)	9 bandas (incluye banda de cirrus)	30 m (excepto TIRS: 100 m)	0.43 - 2.29 $\mu\text{m}$

(Poveda-Sotelo et al., 2022) utilizan una combinación RGB (4-3-2) para Landsat 8 para determinar cambios espacio-temporales en coberturas vegetales de páramo. El USGS a través de su portal web establece las combinaciones de banda (RGB) más comunes, siendo el color natural el más utilizado para el estudio de la cobertura vegetal, mayor detalle se presenta en la Tabla 2:

**Tabla 2**

*Combinaciones de banda para color natural*

SATÉLITE	COLOR	COMBINACIÓN BANDAS		ÚTIL PARA LA CARTOGRAFÍA
Landsat 8 y 9	Natural	R	4	Diferencia las inclinaciones de la vegetación
		G	3	Resalta la vegetación más densa, útil para analizar el estado de la salud de la cubierta vegetal
		B	2	Mapeo batimétrico, identificando el sustrato, la vegetación, y diferenciando entre vegetación caducifolia y coníferas
Landsat 4, 5 y 7	Natural	R	3	Diferencia las inclinaciones de la vegetación
		G	2	Resalta la vegetación más densa, útil para analizar el estado de la salud de la cubierta vegetal
		B	1	Mapeo batimétrico, identificando el sustrato, la vegetación, y diferenciando entre vegetación caducifolia y coníferas



Fuente: (Landsat Missions, 2021; USGS, s. f.)

### 3.3.3. IMÁGENES SATELITALES

Las imágenes satelitales se componen de matrices, donde cada celda es un píxel, cuyo tamaño está determinado por la resolución espacial del sensor. Basándose en los rangos de frecuencias de onda con los que el sensor haya sido configurado captura la energía electromagnética de las diferentes superficies y la almacena en cada píxel, generando una tonalidad de acuerdo al Valor Digital o Nivel Digital (ND), la cantidad de niveles digitales varía de acuerdo a la resolución radiométrica del sensor (Bravo M., 2017).

De acuerdo con Jacobo et al., (2024) la resolución de las imágenes emitidas por los sensores remotos pueden ser de tipo:

**Espacial:** está relacionado al tamaño del píxel, es decir, a la extensión de terreno que cubre cada píxel, que está entre los 30 m y 2,5 m, lo que determina una resolución espacial baja o alta respectivamente.

**Temporal:** capacidad del sensor para capturar imágenes a intervalos regulares de tiempo de un mismo objeto o área, con lo cual se puede monitorear cambios a lo largo del tiempo.

**Espectral:** define la capacidad para diferenciar longitudes de onda, indica la cantidad de bandas espectrales y el ancho de cada una.

**Radiométrica:** capacidad del sensor para detectar y registrar una cantidad de niveles de grises o variaciones en la intensidad de radiación de los objetos observados, medida en bits (dígitos binarios).

### 3.3.4. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

(Santos P., 2020) describe a los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como plataformas tecnológicas diseñadas para administrar y examinar datos geoespaciales, con el propósito de resolver problemas relacionados con la base territorial y el medio ambiente, mediante el tratamiento automatizado de datos, la organización y el modelado de información temática y espacial. Presentan diversas aplicaciones tales como la ordenación territorial, el manejo catastral, la mitigación de riesgos naturales, entre otros.

Los SIG junto con la teledetección proporcionan información sobre las modificaciones en la cubierta vegetal, permitiendo su cuantificación y su evolución a través del tiempo, con lo cual se pueden tomar decisiones y acciones para el manejo de ecosistemas (Flórez-Yepes et al., 2017).

### 3.3.5. CORRECCIÓN DE IMÁGENES LANDSAT

Las correcciones de las imágenes satelitales se ejecutan con la finalidad de mejorar el contraste y la calidad visual de estas, en la actualidad la USGS realiza varias correcciones de las imágenes y agrupa los datos en tres niveles para cada satélite (Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, 2020) de acuerdo a su estado de procesamiento, como se detalla a continuación:

- **Nivel 1 (T1):** contiene datos de Nivel 1 de precisión del terreno (L1TP), que cumplen los criterios de calidad geométrica y radiométrica, se consideran adecuados para el análisis de series temporales, pues estos han sido procesados y corregidos por la USGS.
- **Nivel 2 (T2):** contiene datos o escenas L1TP que no cumplen los criterios del nivel 1, para uso de este nivel se requieren evaluar sus propiedades para determinar la idoneidad para estudios y aplicaciones.
- **Tiempo real (RT):** contiene escenas recién adquiridas, es decir los datos requieren un periodo de evaluación y ajuste de la calibración definitiva, proceso que puede tardar entre 14 y 16 días, que es cuando se asignan al Nivel 1 o Nivel 2.

La designación del Nivel (T1, T2, RT) es visible al final del Identificador de Producto Landsat (USGS, 2020).

#### **Corrección Radiométrica Geométrica y Topográfica**

Estas correcciones las realiza la USGS previo a definir el nivel al que pertenece la imagen. Los productos de Nivel 1 de Landsat consisten en imágenes multiespectrales representadas por Números Digitales (DN) ajustados en escala. La USGS ha procesado y corregido estos datos para asegurar que cumplan con los estándares de calidad y precisión necesarios. Las correcciones incluyen aspectos como la calibración radiométrica, la corrección geométrica y la ortorrectificación, mediante el uso de utilizando puntos de control terrestre (GCP) y modelos digitales

de elevación (DEM) para ajustar las imágenes a la geometría del terreno y corregir las distorsiones causadas por el relieve y la inclinación del satélite (USGS, 2020).

Por tanto, al momento de la descarga las imágenes ya se obtienen con estas correcciones, haciéndolas adecuadas para trabajos de análisis de series temporales.

### **Corrección Atmosférica**

La corrección atmosférica es un proceso que ajusta los datos obtenidos por los satélites para eliminar o reducir los efectos de la atmósfera terrestre, mediante lo cual los Números Digitales (ND) son transformados primero a valores de radiancia y luego a reflectancia superficial, consiguiendo que las imágenes reflejen de manera más precisa las características reales del terreno (Barrero M et al., 2022; Veneros et al., 2020). Con el propósito de eliminar cualquier anomalía en la radiancia causada por la atmósfera o por fallos del sensor, intensificar el contraste para una mejor interpretación y aumentar la resolución espacial (Achicanoy et al., 2018; Veneros et al., 2020).

Entendiéndose que, radiancia es la cantidad de energía luminosa que un sensor satelital recibe desde una superficie, en una dirección específica, por tanto, representa cómo la superficie refleja o emite luz hacia el satélite, considerando los efectos de la atmósfera. Y reflectancia, es la proporción de energía solar que una superficie devuelve o refleja respecto a la que recibe, es decir, es un valor corregido de los efectos atmosféricos, útil para analizar las características reales de la cobertura del suelo (Congedo, 2017, 2021).

### **Pan-sharpening**

El pan-sharpening es una técnica que combina datos de las bandas de espectro múltiple, las cuales tienen una menor resolución espacial (como las bandas de 30 metros en Landsat), con una banda pancromática que tiene una resolución más alta (15 metros en Landsat 7 y 8). Este proceso genera una imagen multiespectral que mantiene los detalles de color de las bandas pero con la resolución espacial superior de la banda pancromática, es decir, 15 metros (Congedo, 2017).

### 3.4. ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es un parámetro ampliamente empleado para evaluar la densidad y estado de la vegetación, es un indicador numérico que se calcula utilizando la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR) y el rojo visible (RED) del espectro electromagnético. Su escala varía de -1 a 1, cuando presenta valores cercanos a 1 indica mejores condiciones de vigor de la vegetación, es decir, vegetación densa y saludable, mientras que valores cercanos a -1 señalan zonas sin vegetación como agua o superficies áridas, por tanto, el NDVI se considera como un estimador eficiente de la cobertura vegetal (Gómez et al., 2024; Vela Pelaez et al., 2024).

Es decir, el NDVI resulta del cociente de la diferencia entre la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR) y la reflectancia de la banda del rojo (RED) con respecto a la suma de estas dos reflectancias, esto se expresa como (Reyes Rodríguez et al., 2024; Vela Pelaez et al., 2024):

#### Ecuación 1

*Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada*

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

Donde:

NDVI = Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

NIR = Reflectancia en el infrarrojo cercano

RED = Reflectancia en la banda del rojo

El número de bandas a utilizar está en función del sensor (Pinta E et al., 2021), por lo que de acuerdo con (Paula et al., 2018) para imágenes Landsat 5 se utiliza la banda 4 y banda 3 (Ecuación 2), mientras que para Landsat 8 y Landsat 9 se emplea

la banda 5 y banda 4 (Ecuación 3), en este sentido, se establecen las siguientes ecuaciones:

### **Ecuación 2**

*Cálculo del NDVI para Landsat 5*

$$NDVI = \frac{(\text{banda 4} - \text{banda 3})}{(\text{banda 4} + \text{banda 3})}$$

### **Ecuación 3**

*Cálculo del NDVI para Landsat 8 y Landsat 9*

$$NDVI = \frac{(\text{banda 5} - \text{banda 4})}{(\text{banda 5} + \text{banda 4})}$$

## 3.5. CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES

La clasificación de imágenes satelitales es el procedimiento de categorizar los píxeles de una imagen continua en clases temáticas usando su reflectancia en longitudes de onda, con lo cual se obtienen imágenes temáticas como de la cobertura del terreno (Escandón et al., 2018; Veneros et al., 2020). Los métodos de clasificación son supervisada y no supervisada.

### 3.5.1. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

Para emplear la clasificación supervisada, se debe contar con un conocimiento anticipado del área de estudio, así como identificar y definir patrones espaciales o áreas de entrenamiento, con la finalidad de identificar zonas representativas de cada categoría dentro de la imagen, basada en los atributos de los píxeles y su semejanza para identificar distintas clases, de acuerdo con las categorías establecidas. Para el entrenamiento supervisado se puede utilizar información proveniente de trabajos de campo, fotointerpretación y otros mapas temáticos. A

partir de los sitios de entrenamiento se generan vectores promedio y matrices de covarianza para cada clase, que luego se usan para asignar categorías a todos los píxeles de la imagen según enfoque probabilístico (Cartaya et al., 2014; Paula et al., 2018; Veneros et al., 2020).

### 3.5.2. CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA

La clasificación no supervisada se realiza cuando no hay ejemplos conocidos para entrenar al sistema, es decir, no se requiere conocimiento previo sobre la zona de estudio y se realiza una asignación automática de clases, en donde los datos se agrupan en clústeres según sus similitudes naturales, aquí el investigador no participa activamente al no haber áreas de referencia, lo que hace que los resultados sean menos precisos. El algoritmo es quien determina las clases basándose en los parámetros proporcionados como el número de clases deseadas, el tamaño mínimo y máximo de cada clase y tolerancias para distinguir entre clases, con ello se obtiene una capa ráster con píxeles clasificados, pero no se conoce de antemano qué clases representa cada categorías asignada por el algoritmo por lo que es necesario realizar un procedimiento posterior para identificar y comprender qué representa cada clase (Posada et al., 2012; Veneros et al., 2020).

## 3.6. ANÁLISIS MULTITEMPORAL

Los análisis o estudios multitemporales mediante imágenes satelitales, mapas o fotografías aéreas se han transformado en un instrumento de gran utilidad para la supervisión y evaluación ambiental de las variaciones en la utilización del suelo y la vegetación (Barrero M et al., 2022), pues permiten comparar digitalmente dos o más imágenes satelitales estableciendo los incrementos o disminuciones en la cobertura de suelo en un periodo específico de tiempo en un determinado espacio (Farnum & Murillo, 2019) estimando la transformación del medio ya sea por condiciones naturales o antrópicas (Figueredo F et al., 2020).

A través de estos análisis espaciales es posible realizar comparaciones e interpretaciones de los cambios en la cobertura vegetal de una misma área en diferentes periodos de tiempo, con base a clasificaciones normalizadas o no normalizadas, estableciendo así la evolución que han tenido los ecosistemas (García C. & Hachi P., 2022), los análisis multitemporales también se emplean para determinar las afección de los incendios forestales, el derretimiento de los glaciares, la disminución del espejo de agua, entre otros (Flórez-Yepes et al., 2017).

## 4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

### 4.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de investigación del presente trabajo corresponde al Área Nacional de Recreación Quimsacocha que tiene una extensión de 3217,12 Ha, cuyas coordenadas geográficas están establecidas en el Acuerdo Ministerial No. 007 del 25 de enero de 2012, cuando dicha área fue ingresada al Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador (Tabla 3).

**Tabla 3**

*Coordenadas geográficas según Acuerdo Ministerial No. 007*

No.	Este (X)	Norte (Y)	No.	Este (X)	Norte (Y)
1	696750,50	9670635,5	32	701902,00	9665004,30
2	696750,50	9666635,50	33	702066,30	9665039,70
3	696350,50	9666635,50	34	702066,30	9665039,70
4	696350,50	9665935,50	35	702102,80	9665053,60
5	699250,50	9665935,50	36	702117,00	9665054,70
6	699250,50	9666635,50	37	702205,00	9665105,40
7	701823,40	9666635,50	38	702295,10	9665149,00
8	701825,90	9666624,50	39	702371,60	9665236,40
9	701826,10	9666605,50	40	702428,90	9665334,70
10	701826,10	9666585,50	41	702478,00	9665378,40
11	701825,90	9666566,50	42	702516,30	9665416,60
12	701824,80	9666555,40	43	702534,40	9665226,00
13	701839,20	9666481,40	44	702579,10	9665449,40
14	701869,20	9666402,20	45	702630,90	9665468,50
15	701888,30	9666290,20	46	702691,00	9665498,50
16	701896,50	9666033,60	47	702750,40	9665571,80
17	701850,10	9665954,40	48	702750,40	9664635,50
18	701762,70	9665755,10	49	700150,40	9664635,50
19	701691,80	9665624,10	50	700150,40	9664638,50
20	701596,20	9665520,30	51	700150,50	9665435,50
21	701517,00	9665454,80	52	696350,50	9665435,50
22	701465,20	9665375,60	53	696350,50	9661935,60
23	701432,40	9665307,40	54	695150,50	9661935,60
24	701432,40	9665239,10	55	695150,50	9661835,60
25	701465,20	9665140,80	56	694650,50	9661835,60
26	701511,60	9665105,40	57	694650,50	9661935,60
27	701568,90	9665097,20	58	694250,50	9661935,60
28	701618,00	9665083,50	59	694250,50	9666635,50

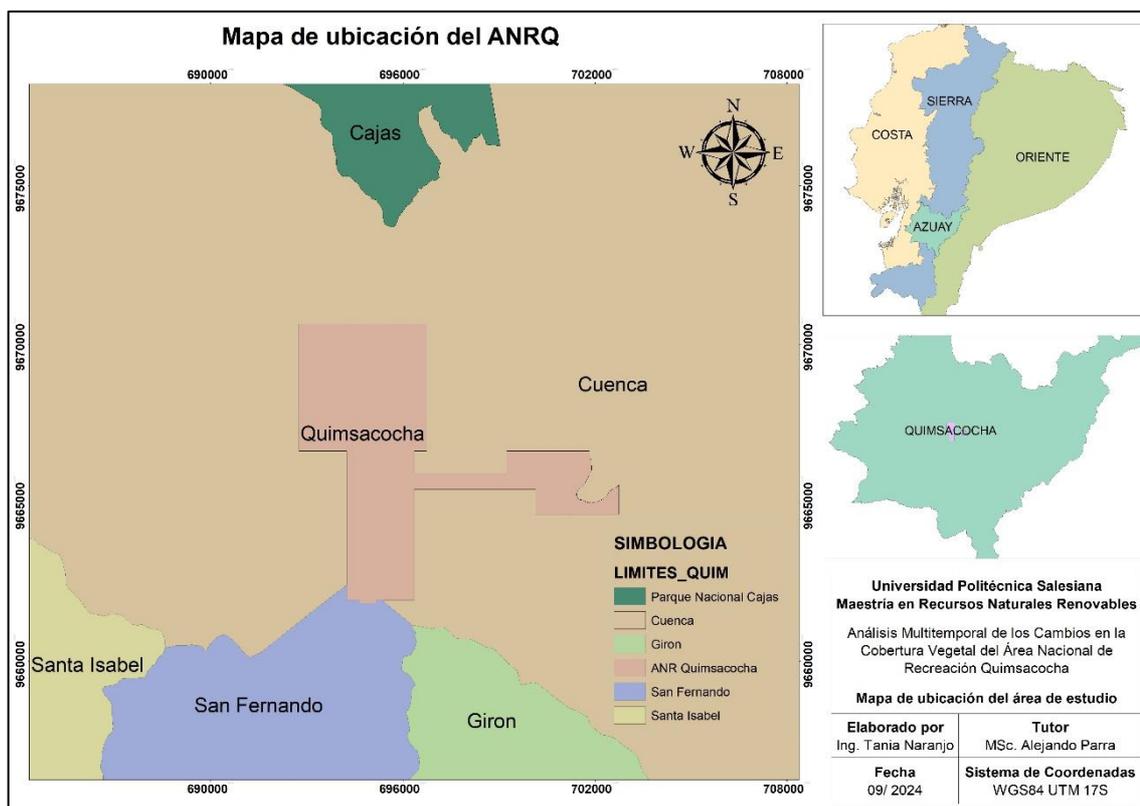
29	701683,60	9665048,00	60	692750,50	9666635,50
30	701757,30	9665023,50	61	692750,50	9670635,50
31	701844,60	9665012,50	62	696750,50	9670635,50

Fuente: (MAATE, 2012)

Se ubica en la provincia de Azuay, dentro cantones Cuenca y San Fernando. Sus límites son: al norte, la quebrada Trigoloma y el río Galgal; al sur, la divisoria de aguas entre las microcuencas de los ríos Bermejos y Rircay; al este, la naciente de la quebrada Tutupalihuaycu; y al oeste, las fuentes de las quebradas Pucaguila, Huando y Aguarongos (INSIGMA et al., 2018), como se muestra en la Figura 4.

**Figura 4**

*Mapa de ubicación del área de estudio*



Fuente: Plan de Manejo ANR Quimsacocha, 2018

La ecorregión del Área de Quimsacocha se divide en dos unidades biogeográficas: el área de páramos y la zona altoandina. El primero se extiende desde el límite superior del bosque cerrado hasta la nieve permanente, se distinguen tres zonas según la altitud: páramo bajo, medio y alto. Las familias de plantas más diversas en esta zona incluyen Asteraceae, Poaceae, Schophulariaceae, entre otras. En las

alturas más elevadas, sobre los 4500 m es común encontrar páramo de arenales, donde la vegetación es limitada y las especies crecen de manera dispersa. En cuanto al piso altoandino, comprende las tierras andinas desde los 3000 msnm. hasta el límite nival, abarcando las estribaciones de las cordilleras Real y Occidental (INSIGMA et al., 2018).

Presenta dos tipos de clima distintivos. El clima nival se encuentra en las zonas más elevadas, con temperaturas medias anuales entre 2 °C y 0 °C, alcanzando máximos de 8 °C, típico de nevados y volcanes serranos ecuatorianos. Por otro lado, el clima de alta montaña ecuatorial, situado por encima de los 3200 m.s.n.m., muestra temperaturas medias alrededor de los 8 °C, con máximas que raramente exceden los 20 °C y mínimas cercanas a 0 °C, con una pluviometría entre 1000 y 2000 mm según la elevación de las laderas (INSIGMA et al., 2018).

### 4.1.1. ECOSISTEMAS DEL ANRQ

De acuerdo con el Plan de Manejo del Área Nacional de Recreación Quimsacocha (2018) bajo la supervisión y revisión del Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica, dicha área está conforma por tres principales ecosistemas (Tabla 4), además de lagunas y un pequeño porcentaje de tierras agropecuarias (INSIGMA et al., 2018).

**Tabla 4**

*Principales ecosistemas del ANRQ*

ECOSISTEMAS	SUPERFICIE (Ha)	PORCENTAJE
Herbazal del Páramo	2646,70	82,30
Herbazal Inundable del Páramo	535,20	16,60
Agua	18,51	0,60
Arbustal siempreverde y Herbazal del Páramo	16,71	0,50
<b>TOTAL</b>	<b>3217,12</b>	<b>100%</b>

Fuente: (INSIGMA et al., 2018)

#### 4.1.1.1. HERBAZAL DEL PÁRAMO

Este ecosistema abarca gran parte de las montañas de Ecuador, desde Carchi hasta Loja, y se encuentra usualmente en valles glaciares y pendientes a más de 3300 metros de altitud. Se caracteriza por sus suelos andisoles, que son profundos y ricos en materia orgánica pudiendo alcanzar 60 kg carbono/m<sup>2</sup>; debido a las condiciones climáticas de elevada humedad y concentración de carbono, este ecosistema puede almacenar una gran cantidad de agua, por tanto tienen una excelente capacidad para la regulación hídrica (MAATE, 2013).

En el Área Nacional de Recreación Quimsacocha la vegetación de este ecosistema es espesa y está compuesta principalmente por gramíneas en macolla. En la zona norte, predomina la especie *Calamagrostis* que se encuentra en áreas más húmedas; por otro lado, en el sur, donde los ambientes son más secos, *Calamagrostis* spp. se combina con otras especies (INSIGMA et al., 2018), siendo el ecosistema de mayor abundancia dentro del área.

#### 4.1.1.2. HERBAZAL INUNDABLE DEL PÁRAMO

Son ecosistemas influenciados más por condiciones locales del suelo y microclima que por el clima general de la altura, por lo que se consideran ecosistemas a zonales. La vegetación crece en donde hay un balance hídrico positivo, es decir, en donde las precipitaciones o escorrentía superan las pérdidas por evapotranspiración y corrientes. Esto crea dos tipos principales de ecosistemas: ciénegas o turberas y pantanos, caracterizados por suelos anaeróbicos que retrasa la desintegración de materia orgánica, por tanto, en estos humedales la producción de biomasa supera la descomposición, resultando en una acumulación significativa de carbono (MAATE, 2013).

Entre algunas de las especies diagnósticas de este ecosistema se encuentran "*Agrostis boyacensis*, *Azorella aretioides*, *Castilleja fissifolia*, *Cortaderia sericantha*, *Distichia muscoides*, *Eryngium humile*, *Geranium sibbaldioides*, *Huperzia crassa*, *Hydrocotyle pusilla*, *Hypericum aciculare*, *H. decandrum*, *Hypochaeris sonchoides*,

*Hypsela reniformis*” (INSIGMA et al., 2018). El herbazal inundable del páramo se ubica hacia el norte de las Tres Lagunas en la caldera del volcán, y constituye el segundo ecosistema más importante del Área Nacional de Recreación Quimsacocha (INSIGMA et al., 2018).

#### 4.1.1.3. ARBUSTAL SIEMPRE VERDE Y HERBAZAL DEL PÁRAMO (BOSQUE NATIVO)

Este entorno presenta arbustos de un máximo de 3 metros de altura, combinados con pajonales de aproximadamente 1,20 metros. Algunos estudios los consideran un exosistema separado ubicado por encima de la línea de bosque, mientras que otros los incluyen como parte del bosque montano alto. A medida que se disminuye la altitud, la diversidad de especies y la altura promedio de los arbustos y árboles incrementan. Este ecosistema en Ecuador se caracteriza por la presencia de *Calamagrostis spp.* y varias especies de arbustos, como *Baccharis*, *Gynoxys*, *Brachyotum*, *Escallonia*, *Hesperomeles*, *Miconia*, *Buddleja*, *Monnina* e *Hypericum*. En áreas más bajas, algunas especies de Ericaceae pueden alcanzar alturas superiores a las de los arbustos del herbazal del páramo (INSIGMA et al., 2018).

## 4.2. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La información para el presente estudio se recolectó de fuentes primarias y secundarias. Partiendo de una revisión bibliográfica que permitió poner en contexto y respaldar la fiabilidad de conceptos relacionados con esta investigación, así como obtener la información satelital requerida. Se complementó con el apoyo de la técnica de la observación mediante registro fotográfico elaborado durante un recorrido in situ realizada al Área Nacional de Recreación Quimsacocha, en donde se tomaron puntos de referencia con el objetivo de apoyar la etapa de clasificación supervisada.

Además, para un conocimiento previo del área de estudio, se utilizó información cartográfica adicional que se obtuvo del Geoportal del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE - 2013) y del Instituto Geográfico Militar (IGM

- 2013) así como de la plataforma Google Earth (2023) y una ortofoto del SIG Tierras correspondiente al año 2010 (Geo Portal del Ministerio de Agricultura y Ganadería), lo que permitió identificar las diferentes coberturas durante la clasificación.

### 4.2.1. LEVANTAMIENTO DE PUNTOS DE REFERENCIA

Durante el recorrido in situ en el Área Nacional de Recreación Quimsacocha, se llevó a cabo el levantamiento de puntos de referencia mediante un dispositivo GPS, con el propósito de apoyar parcialmente el proceso de clasificación supervisada de las imágenes satelitales. Los puntos tomados no abarcaron toda el área de estudio ni son representativos en términos estadísticos, ya que se registraron en zonas de acceso factible durante el recorrido. Sin embargo, su objetivo principal fue servir como insumo preliminar para identificar y cotejar los tipos de cobertura vegetal observados en campo, fortaleciendo la interpretación de las categorías de cobertura a partir de las imágenes satelitales.

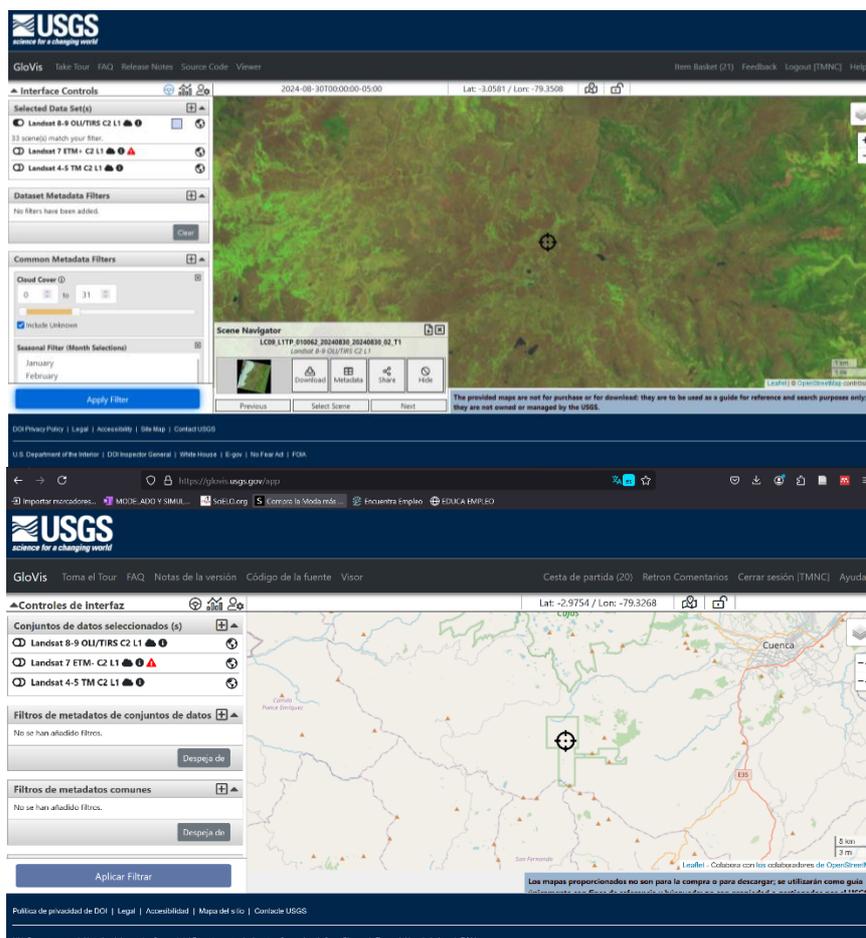
Adicionalmente, los puntos se complementaron con un registro fotográfico que permitió asociar características visuales de las coberturas con sus ubicaciones específicas. Es importante señalar que estos datos no se emplearon para la etapa de validación, sino exclusivamente como referencia en el proceso de interpretación de la clasificación supervisada.

### 4.3. SELECCIÓN Y DESCARGA DE IMÁGENES SATELITALES

A través del visor GloVis (Figura 5) del portal web del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) se realizó la búsqueda de imágenes Landsat que cubran el Área Nacional de Recreación Quimsacocha.

**Figura 5**

*Visor GloVis para selección y descarga de imágenes satelitales Landsat*



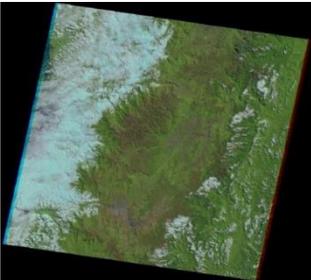
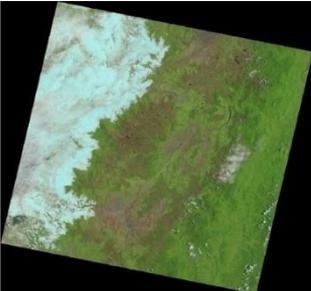
Fuente: Visor GloVis - USGS

Para la elección y obtención de las imágenes satelitales se consideraron parámetros referentes a la calidad visual, con un nivel de nubosidad bajo para la zona de investigación y de toda la imagen que sea menor al 30%, que correspondan a la época de menos precipitaciones del año entre los meses de junio y septiembre (Quichimbo et al., 2012), y a la disponibilidad de imágenes dentro del periodo de tiempo de 30 años. Se seleccionaron imágenes Landsat 5 para el año 1998, Landsat 8 para el año 2015 y Landsat 9 para el año 2024 de la Colección 2 Nivel 1, debido a su compatibilidad espectral y multitemporal, consistencia en la calidad preprocesada y la amplia cobertura de esta serie de satélites desde 1972.

En la Tabla 5 se detallan las características de las imágenes satelitales Landsat seleccionadas para el desarrollo de la presente investigación:

**Tabla 5**

*Previsualización y características de las imágenes Landsat*

PREVISUALIZACIÓN	INFORMACIÓN DE LA IMAGEN	
	<b>Imagen Satelital 1998</b>	
	Origen	GloVis - USGS
	Código	LT05_L1TP_010062_19980714_20200908_02_T1
	Fecha	14/7/1998
	Satélite	Landsat 5
	DATUM	WGS 84
	Zona UTM	17
% Nubosidad	7	
	<b>Imagen Satelital 2015</b>	
	Origen	GloVis - USGS
	Código	LC08_L1TP_010062_20150915_20200908_02_T1
	Fecha	15/9/2015
	Satélite	Landsat 8
	DATUM	WGS 84
	Zona UTM	17
% Nubosidad	30,16	
	<b>Imagen Satelital 2024</b>	
	Origen	GloVis - USGS
	Código	LC09_L1TP_010062_20240830_20240830_02_T1
	Fecha	30/8/2024
	Satélite	Landsat 9
	DATUM	WGS 84
	Zona UTM	17
% Nubosidad	21,46	

Fuente: GloVis – USGS, 2024

## 4.4. PREPROCESAMIENTO DE IMÁGENES LANDSAT

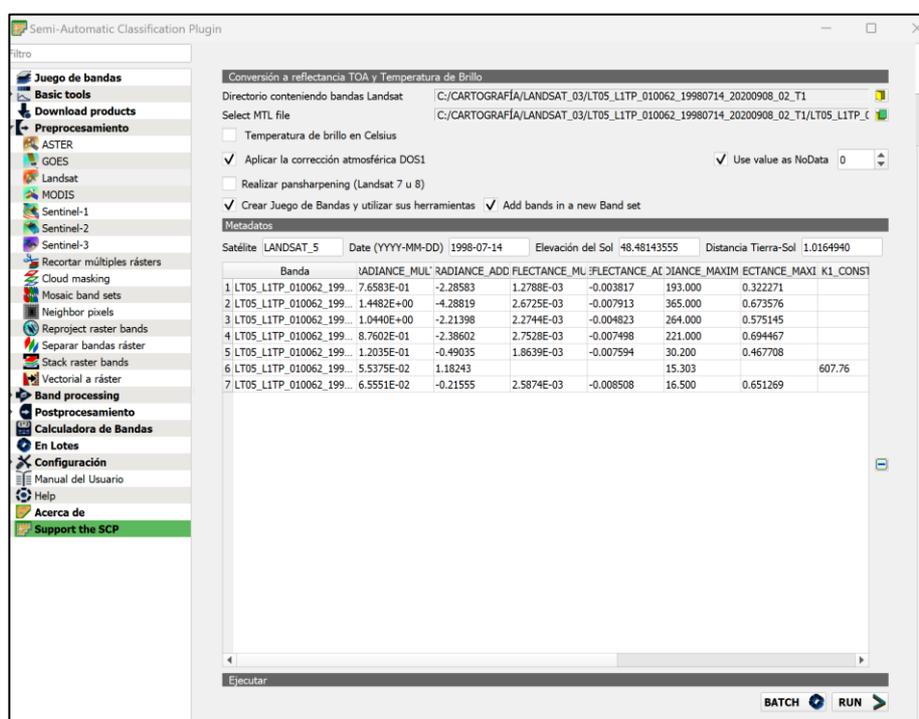
### 4.4.1. CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA

Para la calibración atmosférica de las imágenes satelitales se utilizó el software libre QGIS aplicando el método Semi-Automatic Classification Plugin – SCP, para ello se introdujeron todas las bandas de cada una de las imágenes de Landsat 5, Landsat 8 y Landsat 9, siendo necesario ingresar la ruta del archivo metadatos y se activó la opción de “aplicar la corrección atmosférica DOS1” (Congedo, 2017, 2021).

El método DOS1 (Dark Object Subtraction 1) utilizado en la corrección atmosférica es una técnica ampliamente validada y documentada en la literatura, cuyo detalle matemático se encuentra explicado en Congedo (2017, 2021), de forma general sería transformar los ND primero a valores de radiancia y luego a reflectancia superficial. El presente estudio se enfoca en los cambios de la cobertura vegetal, por lo que se prioriza el uso de herramientas reconocidas y validadas que garanticen la calidad de los datos procesados. Sin embargo, se hace referencia a la base teórica del método para interesados en profundizar en los fundamentos matemáticos.

**Figura 6**

*Herramienta para corrección atmosférica de imágenes satelitales*



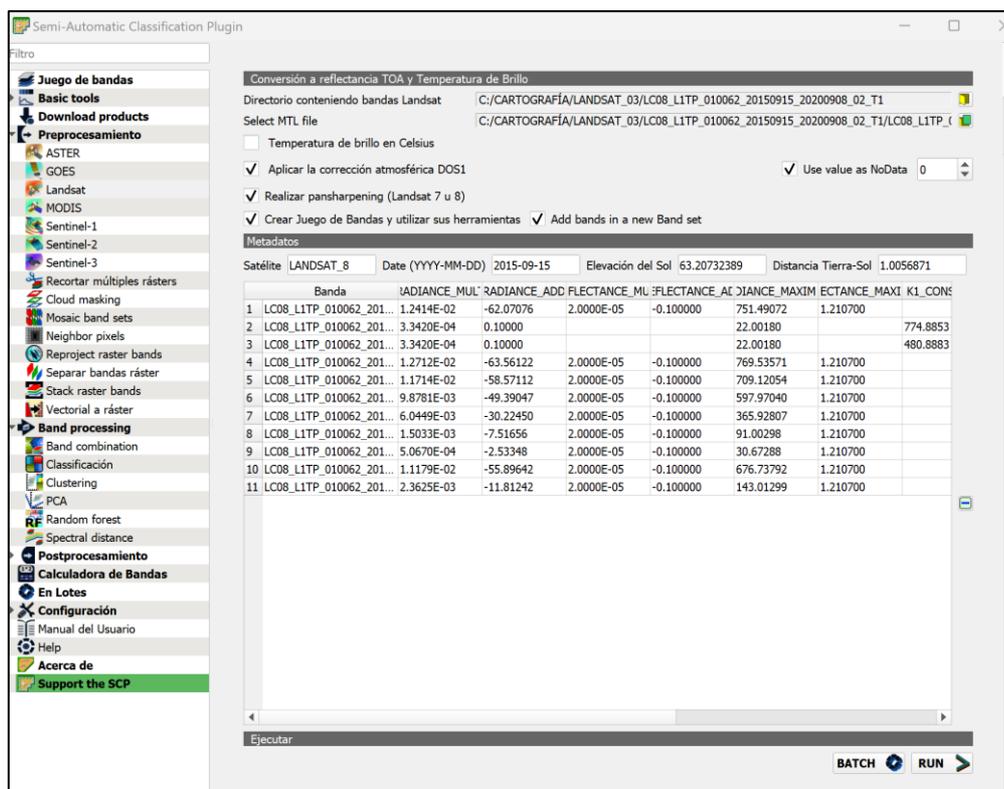
Fuente: (Congedo, 2021)

#### 4.4.2. PAN-SHARPENING

Utilizando el Plugin SCP se aplicó la técnica de pan-sharpening para las imágenes Landsat 8 y Landsat 9, ya que estas tienen una banda pancromática (Congedo, 2017, 2021), de esta manera se pasó de un tamaño de píxeles de 30 metros a píxeles de 15 metros en las bandas 2, 3 y 4 las mismas que se utilizaron para la composición RGB de color natural.

**Figura 7**

*Visualización de la herramienta SCP - Pan-sharpening*

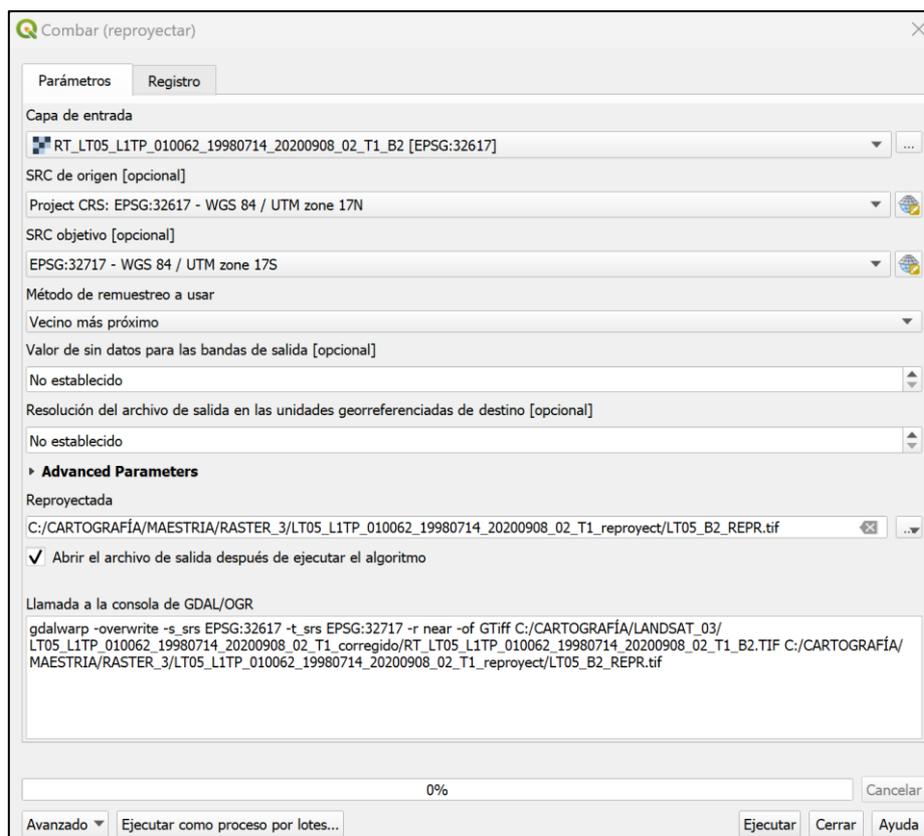


### 4.4.3. CAMBIO DE ZONA

Las imágenes seleccionadas y descargadas del Nivel 1 se encuentran georreferenciadas en el sistema de coordenadas UTM 17N, datum WGS84. Para adaptarlas al área de estudio, se realizó un cambio de zona a la UTM 17S mediante la herramienta “Combar (reproyectar)” del software QGIS (Figura 8).

**Figura 8**

*Herramienta para cambio de zona UTM 17N a UTM 17S*

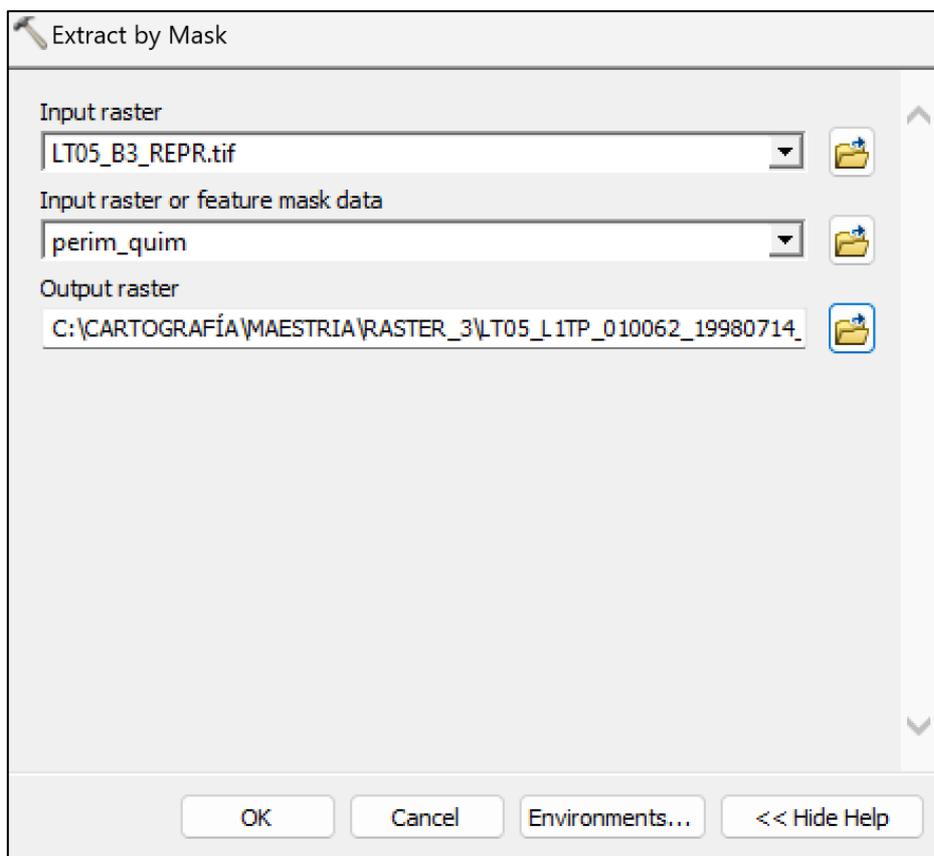


## 4.5. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES LANDSAT

Para el procesamiento de las imágenes satelitales se empleó el software ArcMap 10.8, iniciando con el corte de las imágenes satelitales, conforme el borde del Área Nacional de Recreación Quimsacocha, para lo cual se utilizó el polígono establecido por el Ministerio del Ambiente en el Acuerdo Ministerial No. 007 del 25 de enero de 2012, cuyas coordenadas se muestran en la Tabla 3 del presente documento. Este procedimiento se realizó utilizando la herramienta “extract by mask”, obteniendo así los archivos del área de estudio que constituyen la base para el procesamiento digital de las imágenes (Figura 9).

**Figura 9**

*Herramienta para el corte de las imágenes de la zona de estudio*

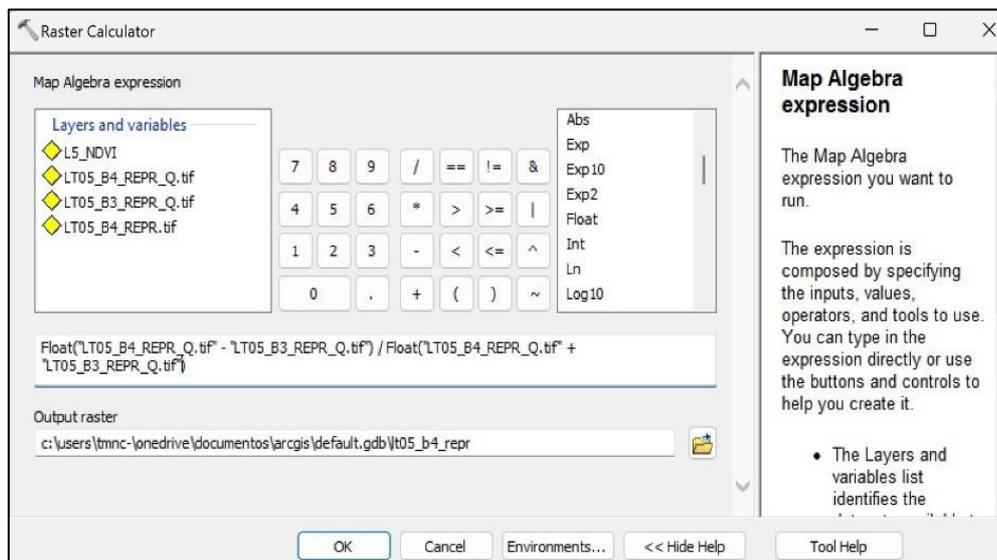


#### 4.5.1. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA

Las operaciones para el cálculo del NDVI se ejecutaron mediante la herramienta “Raster Calculator”, aplicando el Condicional “Float”, lo cual permite obtener valores con decimales para resultados más precisos, en la Figura 10 se puede observar el ingreso de estas ecuaciones en dicha herramienta.

**Figura 10**

*Herramienta para calcular el NDVI*



Luego, con la herramienta “Reclassify” se realizó una clasificación de los rangos del NDVI para la interpretación del mismo en cada año, para ello se consideró la tabla de índices de vegetación de Merg, C. Et al (2011) citado por (Paula et al., 2018; Vasco Lucio et al., 2023) conforme se detalla a continuación en la Tabla 6:

**Tabla 6**

*Rangos establecidos para interpretación del NDVI*

<b>RANGO</b>	<b>INTERPRETACIÓN</b>	<b>COLOR INTERPRETACIÓN</b>
-0,3 a 0,3	Suelo desnudo, agua, roca, nieve	
0,31 – 0,4	Vegetación dispersa	
0,41 – 0,5	Vegetación moderada (páramo húmedo, herbazal inundable del páramo)	
0,51 - 1	Vegetación densa o vigorosa (Herbazal del páramo, arbustal siempreverde, pastizal, plantación forestal)	

Fuente: (Cartaya et al., 2014; Paula et al., 2018)

## 4.5.2. CLASIFICACIÓN DE LA COBERTURA TERRESTRE

La clasificación de la cobertura terrestre del Área Nacional de Recreación Quimsacocha se realizó con base a la “Metodología unificada, Cobertura y uso de la tierra y Sistemas productivos agropecuarios, Escala 1:25.000, 2020” (Tabla 7) generada por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG, 2021) y al “Sistema de clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental” (MAATE, 2013).

**Tabla 7**

*Cobertura y uso de la tierra por el MAG*

NIVEL I	NIVEL II
Tierra forestal	Bosque nativo
	Plantación forestal
Tierra arbustiva y herbácea	Vegetación arbustiva
	Páramo
	Vegetación herbácea
Tierra agropecuaria	Cultivo
	Otras tierras agrícolas
	Pastizal
	Mosaico agropecuario
Cuerpo de agua	Cuerpo de agua natural
	Cuerpo de agua artificial
Zona antrópica	Área poblada
	Infraestructura
Tierra sin cobertura vegetal	Erial
	Glaciar

Fuente: (MAG, 2021)

Obteniendo así la categorización de cobertura para el área de estudio conforme se detalla en la Tabla 8.

**Tabla 8**

*Categorización de coberturas para el área de estudio*

Categorización de coberturas para el ANRQ	
1	Bosque nativo (Arbustal siempreverde)
2	Herbazal del Páramo
3	Herbazal inundable del Páramo
4	Cuerpo de Agua

**Categorización de cobertura para el ANRQ**

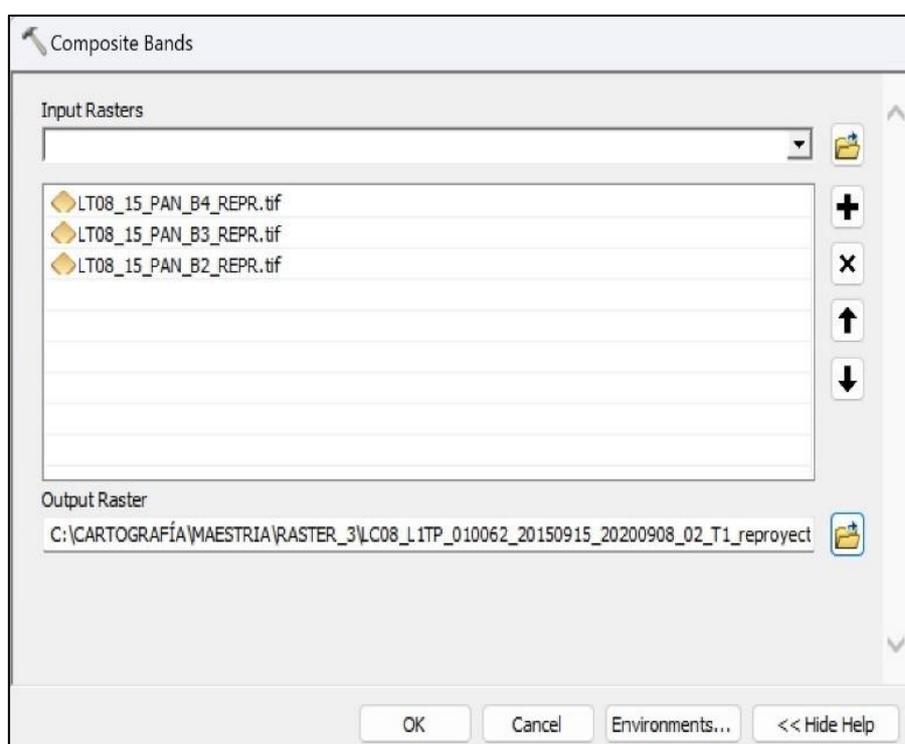
5	Plantación forestal
6	Pastizal

#### 4.5.2.1. COMPOSICIÓN DE BANDAS

Para la combinación de bandas se empleó la herramienta “*Composite Bands*” como se observa en la Figura 11.

**Figura 11**

*Herramienta para la combinación de bandas*

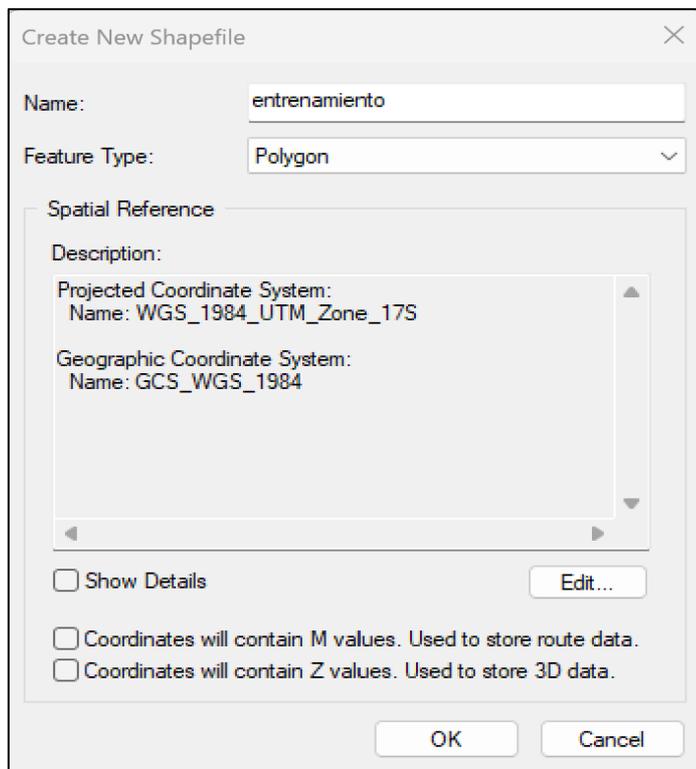


#### 4.5.2.2. CREACIÓN DE ÁREAS DE ENTRENAMIENTO

Para establecer las áreas de entrenamiento en primer lugar se realizó la creación de un mapa de polígonos por cada imagen Landsat. Para esto se utilizó la herramienta “*Create New Shapefile*” (Figura 12).

**Figura 12**

*Herramienta para crear el mapa de polígonos*



Luego, se procedió a tomar las muestras o áreas de entrenamiento de cada tipo de cobertura de la tierra, como se observa en la Figura 13.

**Figura 13**

*Áreas de entrenamiento para clasificación supervisada*



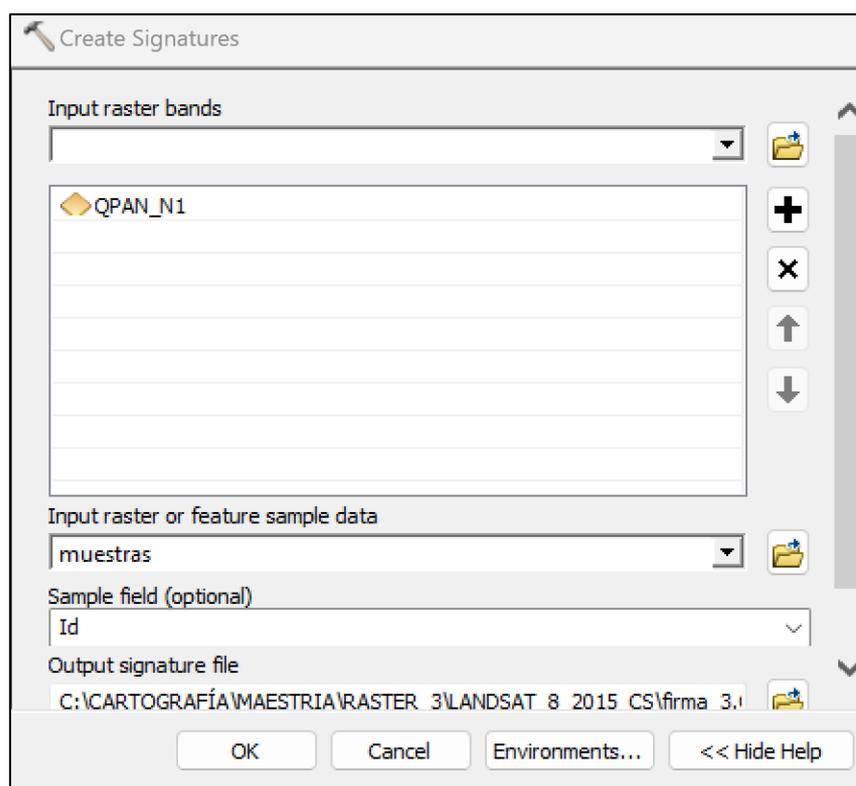
### 4.5.2.3. GENERACIÓN DE FIRMAS ESPECTRALES

Una firma espectral representa una característica única de cada objeto, describe cómo refleja, absorbe o emite luz en diferentes longitudes de onda, es decir son los niveles de reflectancia que tienen las diferentes superficies a la energía electromagnética; varía con el tiempo debido a cambios en el entorno y condiciones climáticas, permite identificar objetos a través de sensores que capturan distintas partes del espectro de luz (Regalado, 2018).

La generación de las firmas espectrales de cada una de las imágenes se realizó mediante la herramienta "Create Signature" como se muestra en la Figura 14.

**Figura 14**

*Herramienta para la creación de firmas espectrales*



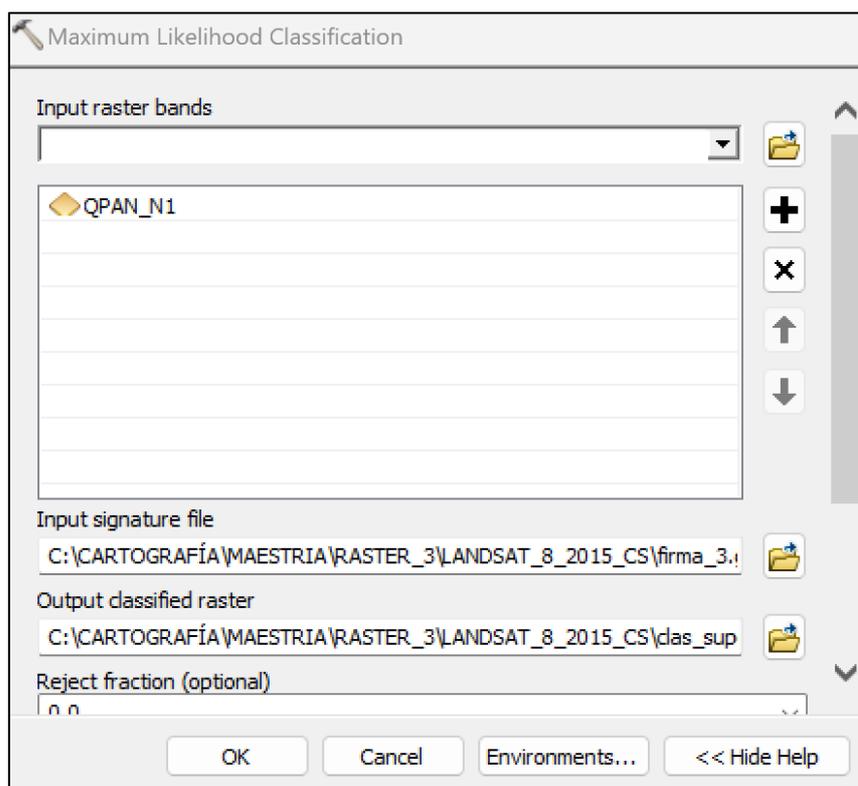
#### 4.5.2.4. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

Se ejecutó la herramienta “Maximum Likelihood Classification”, dicho clasificador es reconocido por su amplia aplicación en percepción remota, simplicidad, precisión y eficiencia en la discriminación de diferentes clases de datos (Arce et al., 2022).

Con la clasificación de máxima verosimilitud se obtiene un nuevo ráster clasificado en las 6 categorías ya definidas, en la Figura 15 se muestra la herramienta empleada.

**Figura 15**

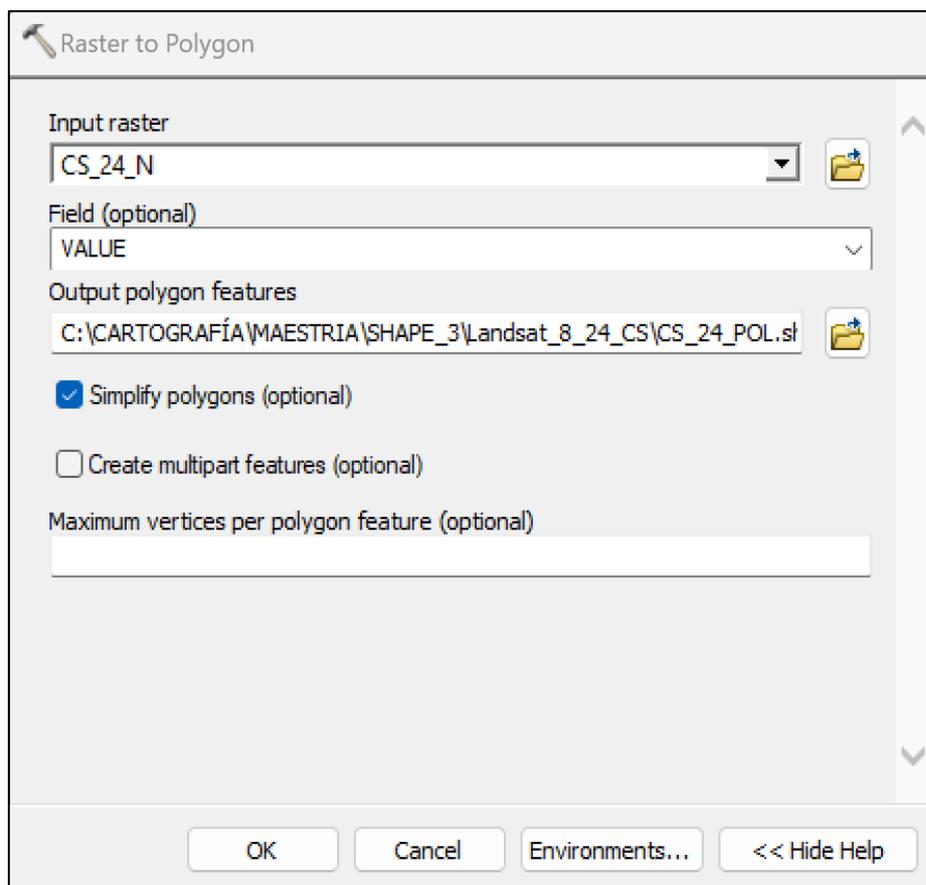
*Herramienta de máxima verosimilitud para Clasificación Supervisada*



Para la interpretación y análisis fue necesario convertir el archivo ráster, obtenido de la clasificación supervisada, en polígono, empleando la función “Raster to Polygon” (Figura 16) y se calcularon las áreas de cada polígono. Con la finalidad de homogenizar los polígonos y obtener un mapa más limpio, a través de la herramienta “Eliminate” se fusionaron los polígonos, cuya área era menor o igual a 1 Ha, con aquellos vecinos que tenían una mayor superficie (Coronel, 2022).

**Figura 16**

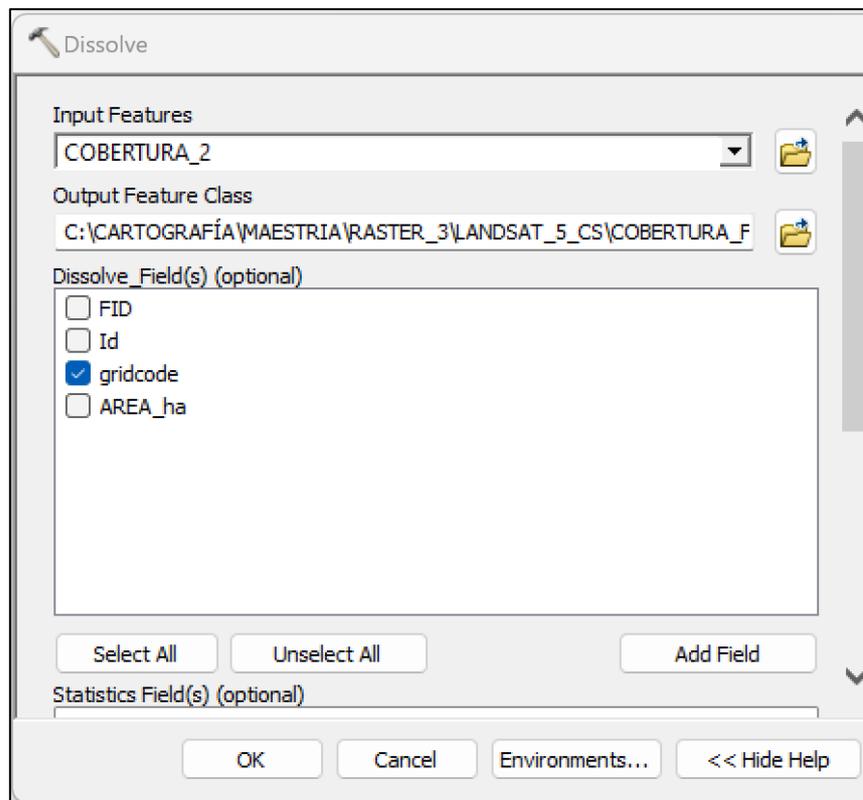
*Herramienta para conversión a polígono*



El mapa final de coberturas para cada año de estudio se obtuvo luego de agrupar los polígonos de acuerdo con el código establecido para cada clase de cobertura, para esto se empleó la herramienta “Dissolve”, resultando en un mapa con 6 tipos de coberturas con sus respectivos nombres y el área en hectáreas (Figura 17).

**Figura 17**

*Herramienta para agrupar polígonos por clase de cobertura*



## 4.6. EVALUACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

### 4.6.1. MATRIZ DE CONFUSIÓN

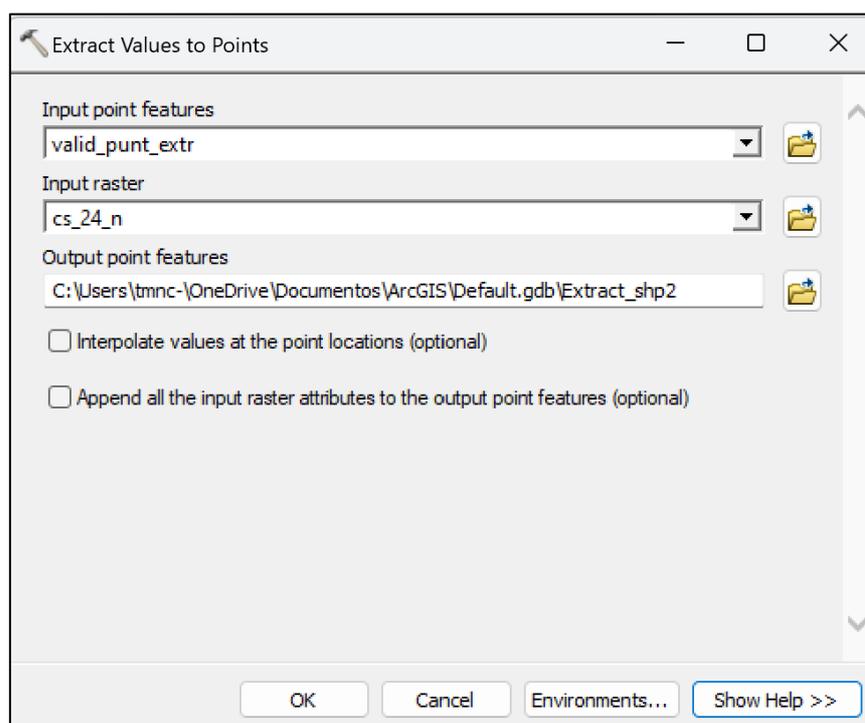
La matriz de confusión es un método que permite analizar la correlación entre cómo se clasifican las imágenes manualmente y cómo el clasificador automático categoriza los píxeles, facilitando la identificación de aciertos y errores en el proceso de clasificación (Osuna-Osuna et al., 2015). En donde las filas representan la precisión de las etiquetas asignadas a los píxeles por el usuario durante el entrenamiento, mientras que las columnas indican la exactitud con la que clasifica el modelo esos píxeles en las categorías correctas (Bonilla V & Taipe Q, 2021).

Los puntos de evaluación se generaron a través de la herramienta “*Create Accuracy Assessment Points*”, mediante un muestreo aleatorio estratificado. Para ello se tomaron 360 puntos de forma aleatoria estratificada para cada imagen de los años 2024 y 2015, y un total de 240 para la imagen del año 1998, pues (Camacho S et al., 2015) recomiendan usar por lo menos 50 puntos por cada clase.

Luego, con la herramienta “*Extract Values to Points*” se asigna a cada punto la clase de cobertura de acuerdo con el ráster clasificado comparándolos con las clases de referencia obtenidas de imágenes de alta resolución a través de la interpretación humana, esta herramienta se observa en la Figura 18.

**Figura 18**

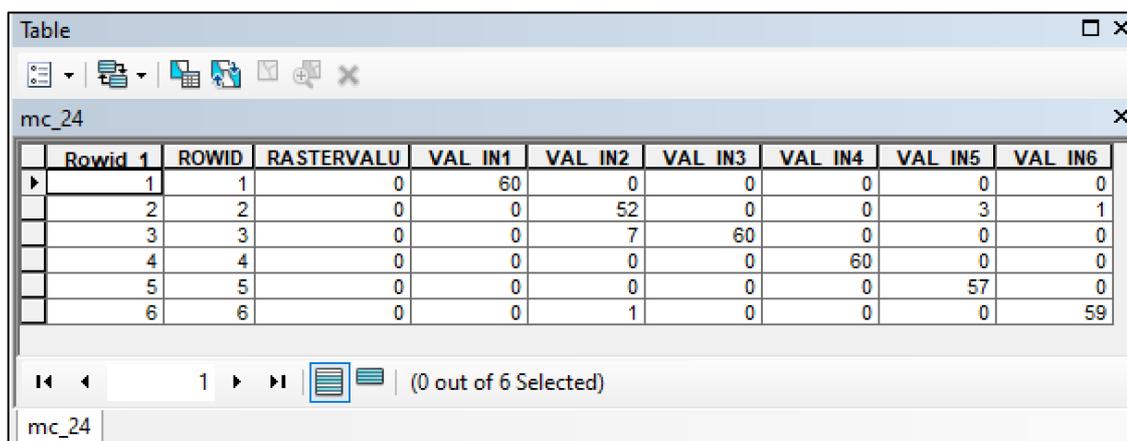
*Herramienta para obtener los datos de los píxeles*



Ejecutando la herramienta “*Frequency*” se realizó el conteo de las coincidencias de los puntos del muestreo, finalmente mediante la herramienta “*Pivot Table*” se obtuvo la matriz de confusión (Figura 19).

**Figura 19**

*Matriz de Confusión obtenida luego de ejecutar la herramienta Pivot table*



Rowid	ROWID	RASTERVALU	VAL IN1	VAL IN2	VAL IN3	VAL IN4	VAL IN5	VAL IN6
1	1	0	60	0	0	0	0	0
2	2	0	0	52	0	0	3	1
3	3	0	0	7	60	0	0	0
4	4	0	0	0	0	60	0	0
5	5	0	0	0	0	0	57	0
6	6	0	0	1	0	0	0	59

Con la información obtenida de las matrices de confusión se determinó la Precisión Observada (Po) y la Precisión Esperada (Pe), en donde:

**Precisión Observada o concordancia global (Po)**, permite estimar cuántas coincidencias se anticiparían en un modelo de clasificación aleatorio, se calculó sumando los valores de las diagonales de las clases de cobertura y dividiendo ese total para la suma de todas las clases, el resultado se multiplicó por 100 para expresarlo en porcentaje (Quillupangui, 2023).

**Precisión Esperada (Pe)**, permite estimar cuántas coincidencias se esperarían bajo un modelo de clasificación aleatorio, se calculó multiplicando el total de cada fila por el total de cada columna para cada clase de cobertura y dividiendo ese producto por el total general, finalmente se saca la raíz del resultado obtenido (Quillupangui, 2023).

Además, nos permite identificar los errores de comisión y los errores de omisión. Los primeros son donde se clasifican incorrectamente elementos que no conciernen a una clase, y los segundos, que ocurren al no clasificar elementos que deberían estar en una clase porque han sido erróneamente incluidos en otra (Osuna-Osuna et al., 2015) es decir mide la correspondencia entre una clasificación observada y la información de referencia.

## 4.6.2. ÍNDICE KAPPA

El índice Kappa mide la correspondencia entre una clasificación observada y la información de referencia, para lo cual se utiliza la fórmula propuesta por la FAO (Coronel, 2022; Quezada et al., 2022).

### Ecuación 4

*Índice Kappa*

$$kappa = \frac{Po - Pe}{1 - Pe}$$

Donde:

Po = Precisión Observada

Pe = Precisión Esperada por azar

1 – Pe = Máxima concordancia potencial no influenciada por la casualidad

En la Tabla 9 se observa la concordancia definida para el índice Kappa propuesta por Landis & Koch (1977), citados por (Arce et al., 2022; Coronel, 2022; Quillupangui, 2023).

### Tabla 9

*Escala de interpretación del índice Kappa*

Coeficiente Kappa	Fuerza de concordancia
< 0,00	Pobre
0,01 - 0,02	Leve
0,21 - 0,40	Aceptable
0,41 - 0,60	Moderada
0,61 - 0,80	Considerable
0,81 - 1,00	Casi Perfecta

Fuente: (Arce et al., 2022)

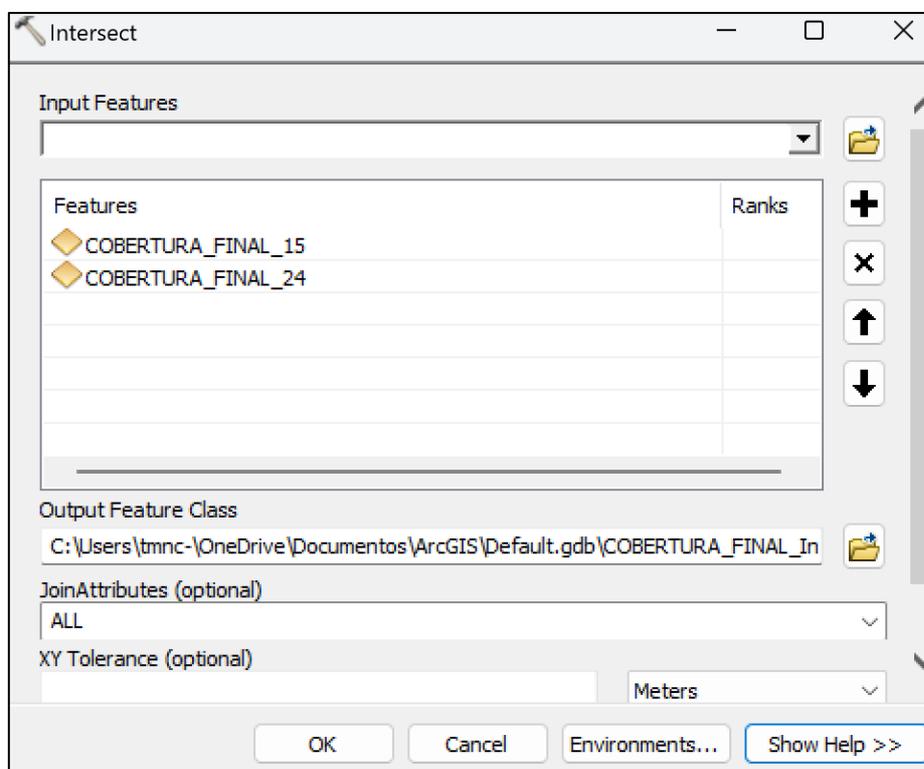
## 4.7. MATRIZ DE TRANSICIÓN

La matriz de transición es un método utilizado para examinar los cambios en categorías o estados a través del tiempo mediante la sobreposición de mapas, en la que se incluye la superficie de las coberturas correspondientes cada año. Cada matriz está compuesta por filas y columnas que representan los años 1 y 2, respectivamente, en donde las celdas en la diagonal primaria muestran las áreas que no han experimentado modificaciones, mientras que las celdas fuera de la diagonal indican las transformaciones que han ocurrido entre las distintas categorías (Pinta E et al., 2021).

Para realizar la sobreposición de mapas se utilizó la herramienta “Intersect” (Figura 20) para lo cual se establecieron tres periodos de tiempo 1998-2015, 2015-2024 y 1998-2024.

**Figura 20**

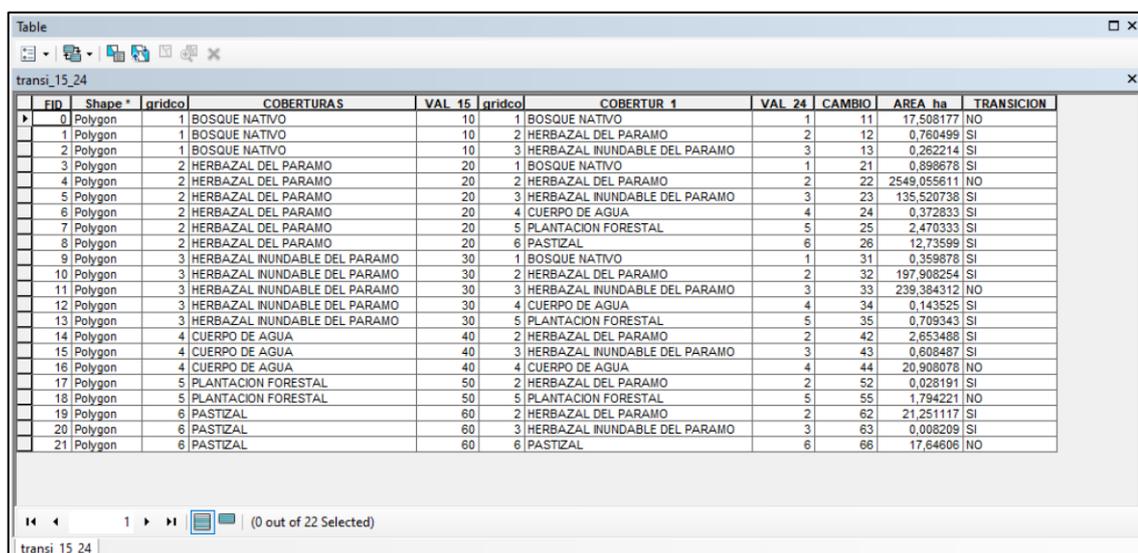
*Proceso para la sobreposición de mapas*



En la capa resultante se agregaron los campos “VAL\_año1 y VAL\_año2”, en la primera columna se utilizaron los códigos que representan la cobertura del primer año (año1: 10, 20, 30, 40, 50, 60) y en la segunda columna las del año final (año2: 1, 2, 3, 4, 5, 6); a suma de estos códigos indica si hubo un cambio o si se preservó el tipo de cobertura durante ese periodo. Luego, se procedió a añadir en la tabla de atributos los campos “CAMBIO, ÁREA Y TRANSICIÓN” los cuales permitieron identificar las zonas que sufrieron transición durante el periodo de estudio, así como el área (en hectáreas) de cada categoría, como se observa en la Figura 21.

**Figura 21**

*Resultado de la matriz de transición en ArcMap*

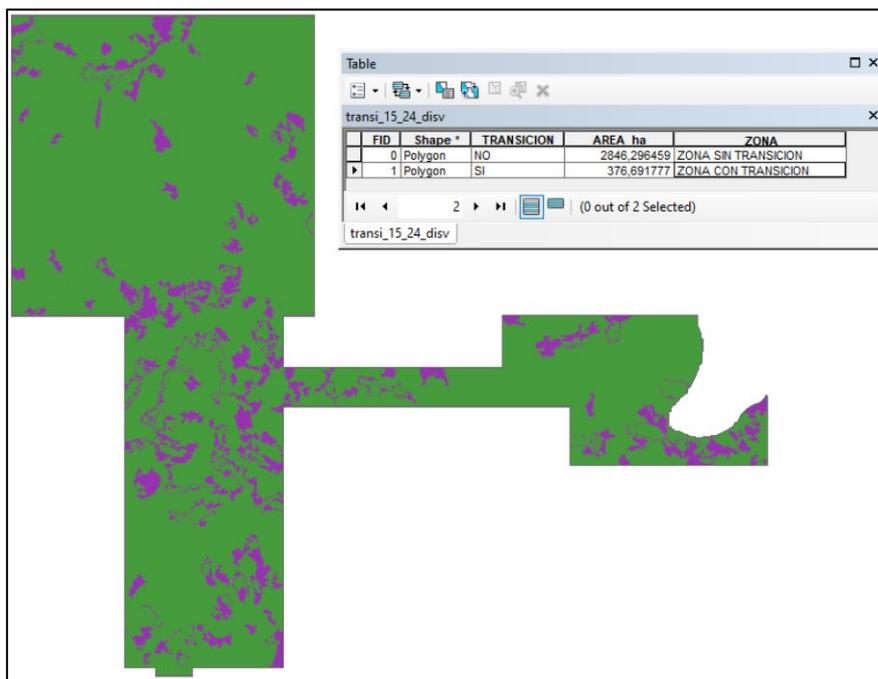


FID	Shape *	gridco	COBERTURAS	VAL 15	gridco	COBERTUR 1	VAL 24	CAMBIO	AREA ha	TRANSICION
0	Polygon	1	BOSQUE NATIVO	10	1	BOSQUE NATIVO	1	11	17.508177	NO
1	Polygon	1	BOSQUE NATIVO	10	2	HERBAZAL DEL PARAMO	2	12	0.760499	SI
2	Polygon	1	BOSQUE NATIVO	10	3	HERBAZAL INUNDABLE DEL PARAMO	3	13	0.262214	SI
3	Polygon	2	HERBAZAL DEL PARAMO	20	1	BOSQUE NATIVO	1	21	0.898678	SI
4	Polygon	2	HERBAZAL DEL PARAMO	20	2	HERBAZAL DEL PARAMO	2	22	2549.055611	NO
5	Polygon	2	HERBAZAL DEL PARAMO	20	3	HERBAZAL INUNDABLE DEL PARAMO	3	23	135.520738	SI
6	Polygon	2	HERBAZAL DEL PARAMO	20	4	CUERPO DE AGUA	4	24	0.372833	SI
7	Polygon	2	HERBAZAL DEL PARAMO	20	5	PLANTACION FORESTAL	5	25	2.470333	SI
8	Polygon	2	HERBAZAL DEL PARAMO	20	6	PASTIZAL	6	26	12.73599	SI
9	Polygon	3	HERBAZAL INUNDABLE DEL PARAMO	30	1	BOSQUE NATIVO	1	31	0.359878	SI
10	Polygon	3	HERBAZAL INUNDABLE DEL PARAMO	30	2	HERBAZAL DEL PARAMO	2	32	197.908254	SI
11	Polygon	3	HERBAZAL INUNDABLE DEL PARAMO	30	3	HERBAZAL INUNDABLE DEL PARAMO	3	33	239.384312	NO
12	Polygon	3	HERBAZAL INUNDABLE DEL PARAMO	30	4	CUERPO DE AGUA	4	34	0.143525	SI
13	Polygon	3	HERBAZAL INUNDABLE DEL PARAMO	30	5	PLANTACION FORESTAL	5	35	0.709343	SI
14	Polygon	4	CUERPO DE AGUA	40	2	HERBAZAL DEL PARAMO	2	42	2.853488	SI
15	Polygon	4	CUERPO DE AGUA	40	3	HERBAZAL INUNDABLE DEL PARAMO	3	43	0.808487	SI
16	Polygon	4	CUERPO DE AGUA	40	4	CUERPO DE AGUA	4	44	20.908078	NO
17	Polygon	5	PLANTACION FORESTAL	50	2	HERBAZAL DEL PARAMO	2	52	0.028191	SI
18	Polygon	5	PLANTACION FORESTAL	50	5	PLANTACION FORESTAL	5	55	1.794221	NO
19	Polygon	6	PASTIZAL	60	2	HERBAZAL DEL PARAMO	2	62	21.251117	SI
20	Polygon	6	PASTIZAL	60	3	HERBAZAL INUNDABLE DEL PARAMO	3	63	0.008209	SI
21	Polygon	6	PASTIZAL	60	6	PASTIZAL	6	66	17.64606	NO

Mediante la herramienta “Dissolve” se generó una capa con su correspondiente tabla de atributos, en donde se identifican dos zonas la primera corresponde a la zona sin transición (color verde) y la segunda a la zona con transición (color morado), como se puede observar en la Figura 22.

**Figura 22**

*Zonas con o sin transición definidas con la herramienta dissolve*



Con esta información se tabularon los datos en la matriz de transición final, en donde se agregaron una fila (T2) que contine la suma total de las superficies de las coberturas del año 2 y una columna representada como T1 que corresponde a la suma de las áreas de todas las coberturas del año 1. Así mismo, se incorporó a la matriz una fila que representa las ganancias y una columna en donde se incorporan las pérdidas para cada categoría (Pinta E et al., 2021).

La ganancia se calculó restando la persistencia, que es el área que no cambió y se encuentra en la diagonal de la matriz, del área total de la cobertura en el segundo año, mientras que, para estimar la pérdida se restó la persistencia del área total de la cobertura en el primer año (Quillupangui, 2023), teniendo así la matriz de transición completa, como se observa en la Tabla 10.

**Tabla 10**

*Detalle Matriz de Transición*

		Año 2024						Total, Año 1, T1	Pérdidas	
		Bosque nativo	Herbazal del Páramo	Herbazal inundable del Páramo	Cuerpo de Agua	Plantación forestal	Pastizal			
		1	2	3	4	5	6			
Año 2015	<b>Bosque nativo</b>	10	17,48	0,76	0,26	0,00	0,00	0,00	18,50	1,02
	<b>Herbazal del Páramo</b>	20	0,90	2544,41	135,27	0,37	2,47	12,71	2696,14	151,72
	<b>Herbazal inundable del Páramo</b>	30	0,36	197,55	238,95	0,14	0,71	0,00	437,71	198,76
	<b>Cuerpo de Agua</b>	40	0,00	2,65	0,61	20,87	0,00	0,00	24,13	3,26
	<b>Plantación forestal</b>	50	0,00	0,03	0,00	0,00	1,79	0,00	1,82	0,03
	<b>Pastizal</b>	60	0,00	21,21	0,01	0,00	0,00	17,61	38,83	21,22
	<b>Total, Año 2, T2</b>		18,73	2766,61	375,10	21,39	4,96	30,33	3217,12	376,01
	<b>Ganancias</b>		1,26	222,20	136,15	0,52	3,17	12,71	376,01	

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. INFORMACIÓN SATELITAL

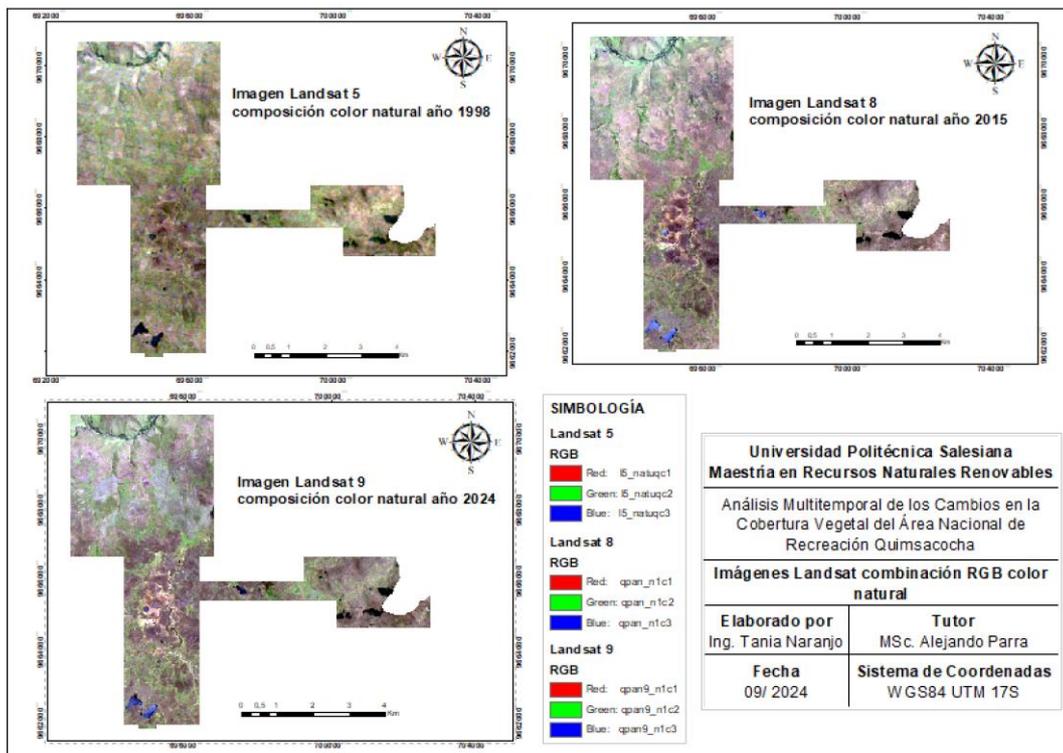
Dentro de los parámetros para la elección y descarga de imágenes satelitales se consideraron principalmente la calidad visual, que las imágenes satelitales sean de libre acceso, que tengan buena resolución espacial y temporal, que correspondan a la estación de menos precipitación del año (junio a septiembre), por lo que en este estudio se emplearon imágenes del satélite Landsat, comúnmente utilizadas para estudios ambientales, debido a su resolución espacial de 30 m (desde Landsat 7 se incrementa una banda pancromática de 15 m) y una resolución temporal de 16 días. De esta manera, se obtuvieron imágenes de Landsat 5 para el año 1998, Landsat 8 para 2015 y Landsat 9 para 2024, abarcando un periodo de estudio de 26 años.

Es importante mencionar que, en un principio se había propuesto una tasa de nubosidad inferior al 30%, sin embargo, se encontró que algunas de las imágenes que cumplían con este criterio presentaban nubosidad dentro del área de estudio, es por eso por lo que se amplió el rango de nubosidad al 35% (de toda la imagen) pero se verificó que no exista cobertura nubosa en el área de interés. Este hecho también influyó en la reducción del periodo de tiempo de 30 a 26 años, por lo que se debió descartar una imagen Landsat 5 del año 1991 y sustituirla por una imagen Landsat 5 de 1998, además no se encontró una imagen que cumpla con los criterios de calidad visual en el año 1994, eso en cuanto a la información de libre acceso disponible en las plataformas.

Tomando en cuenta estas consideraciones se obtienen las imágenes Landsat 5, Landsat 8 y Landsat 9 en color natural como se muestra en la Figura 23.

**Figura 23**

*Combinación RGB de las imágenes Landsat 5, Landsat 8 y Landsat 9 obtenidas para el desarrollo del estudio*



## 5.2. ANÁLISIS DEL ESTADO DE LA COBERTURA VEGETAL

Se obtuvo como resultados (Tabla 11) que el valor máximo de NDVI en 1998 fue de 0,78 mientras que en 2015 y 2024 se incrementa ligeramente a 0,80, lo que sugiere un pequeño aumento en la densidad de la vegetación o en la salud de las plantas en las áreas con la mayor cobertura vegetal entre 1998 y 2015, manteniéndose estable en 2024. En tanto que, el valor bajo de NDVI muestra fluctuaciones significativas, en 1998 fue de -0,28, mientras que en 2015 y 2024 aumenta a -0,12 y -0,17 respectivamente, el incremento de los valores mínimos sugiere una reducción en las áreas con poca o ninguna vegetación.

La media del NDVI permanece estable en 0,51 en 1998 y 2015 y muestra un ligero aumento 0,52 en 2024, a nivel general indica que la salud o la densidad de la

vegetación no ha cambiado significativamente entre los 3 periodos, aunque el pequeño aumento en 2024 sugiere una leve mejora en la calidad de la vegetación. Así mismo la desviación estándar presenta una variabilidad ligeramente mayor en 2015 (0,08) en comparación con 1998 y 2024 (0,07), lo que refleja mayor heterogeneidad en la cobertura vegetal en 2015 en donde la vegetación podría haber sido más dispersa o desigual que en 1998 que muestra mayor homogeneidad en la cobertura vegetal al igual que en 2024, esto se relacionaría con las modificaciones en la ocupación del suelo y aspectos ambientales.

**Tabla 11**

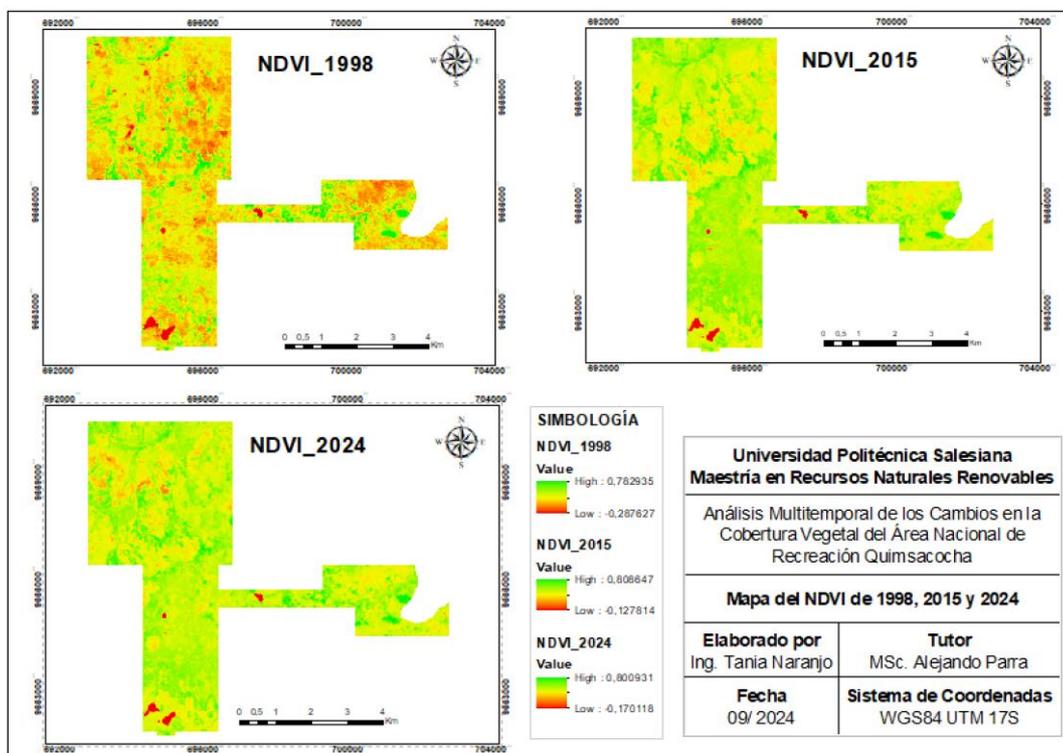
*Estadística de la clasificación del NDVI*

AÑO	MAX	MIN	MEDIA	DESV. EST.
1998	0,78	-0,28	0,51	0,07
2015	0,80	-0,12	0,51	0,08
2024	0,80	-0,17	0,52	0,07

Estos hallazgos se observan de manera gráfica en la Figura 24, en donde, como se indicó en la Tabla 6 el color rojo representa suelo desnudo, agua o roca, el color naranja corresponde a vegetación dispersa, el color amarillo refleja la vegetación moderada (arbustos, páramo húmedo, herbazal del páramo) y la tonalidad verde indica la vegetación espesa o vigorosa (Herbazal del páramo, arbustal siempreverde, pastizal, plantación forestal).

**Figura 24**

*Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada año 1998, 2015 y 2024*



El análisis de la dinámica porcentual del comportamiento vegetal resultante del NDVI (Tabla 12) muestra que el porcentaje de suelo desnudo, agua o roca se mantiene prácticamente constante en los tres años (0,62% en 1998, 0,64% en 2015 y 0,62 en 2024); el porcentaje de vegetación dispersa aumentó ligeramente entre 1998 y 2015 (de 1,26% a 1,79%) para luego descender a 1,13% en 2024; así mismo el porcentaje de vegetación moderada tuvo un ligero aumento entre 1998 y 2015 (de 42,57% a 45,33%) y en 2024 se redujo al 31,79%, finalmente el porcentaje de vegetación densa o vigorosa muestra una tendencia de mejora notable ya que en 1998 fue del 55,55%, en 2015 bajó ligeramente a 52,24% pero en 2024 se incrementó a 66,46%.

Además, la diferencia porcentual entre 1998 y 2024 destaca una disminución significativa en la vegetación moderada (-10,78%) que corresponde a una diferencia en hectáreas de aproximadamente 346,85, y un aumento paralelo en la vegetación densa (10,91%) que representa 350,97 Ha, lo que refuerza la tendencia hacia una vegetación más saludable y densa.

**Tabla 12**

*Dinámica Porcentual del NDVI en los años 1998, 2015 y 2024*

Rangos NDVI	Año	% Suelo desnudo, agua, roca	% Vegetación dispersa	% Vegetación moderada	% Vegetación densa o vigorosa	TOTAL
-0,28 a 0,78	1998	0,62	1,26	42,57	55,55	100
-0,12 a 0,80	2015	0,64	1,79	45,33	52,24	100
-0,17 a 0,80	2024	0,62	1,13	31,79	66,46	100
Diferencia %		0,00	-0,12	-10,78	10,91	
Diferencia (Ha)		-0,14	-3,97	-346,85	350,97	

Estos resultados, muestran que la vegetación del Área Nacional de Recreación Quimsacocha a lo largo del tiempo ha experimentado una mejora en la calidad de la vegetación, pues las áreas con vegetación densa y vigorosa han aumentado, mientras que las áreas con vegetación moderada y dispersa han disminuido. Las áreas no vegetadas se mantienen prácticamente estables lo que indica que los cuerpos hídricos no han experimentado cambios significativos.

### 5.3. COBERTURA TERRESTRE DEL ANRQ

Como se mencionó en el apartado 3.2. la cobertura terrestre incluye tanto la vegetación como las superficies acuáticas. Dado que para categorizar la cobertura vegetal se requirió considerar también los cuerpos de agua, en esta sección se utilizará el concepto de cobertura terrestre, que abarca todos los elementos que cubren el suelo del área de estudio, con el objetivo de determinar las transiciones que ha tenido la cobertura vegetal.

En este sentido, para la identificación de los cambios generados en la cobertura vegetal del Área Nacional de Recreación Quimsacocha, se llevó a cabo un análisis multitemporal entre 1998 y 2024 mediante clasificación supervisada, para lo cual se utilizaron imágenes satelitales Landsat que fueron procesadas mediante SIG,

para el análisis transicional se establecieron tres periodos de tiempo: 1998-2015, 2015-2024 y 1998-2024.

Las categorías de la cobertura terrestre para el área de interés se determinaron con base al Nivel II de la Metodología Unificada, Cobertura y Uso de la Tierra y Sistemas Productivos Agropecuarios, Escala 1:25.000, 2020 y al Sistema de Clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental, además del apoyo de la información cartográfica del IGM y MAATE, de lo cual se establecieron las siguientes seis categorías:

1. Bosque nativo (Arbustal siempreverde)
2. Herbazal del Páramo
3. Herbazal inundable del Páramo
4. Cuerpo de Agua
5. Plantación forestal
6. Pastizal

### 5.3.1. COBERTURAS DEL ANRQ AÑO 1998

La cobertura terrestre (cobertura vegetal y cuerpos de agua) del Área Nacional de Recreación Quimsacocha en el año 1998, inicio del periodo de estudio, de acuerdo con la clasificación supervisada se compone de cuatro clases como se observa en la Tabla 13, bosque nativo, herbazal del páramo, herbazal inundable del páramo y cuerpo de agua.

**Tabla 13**

*Clasificación de cobertura ANRQ año 1998*

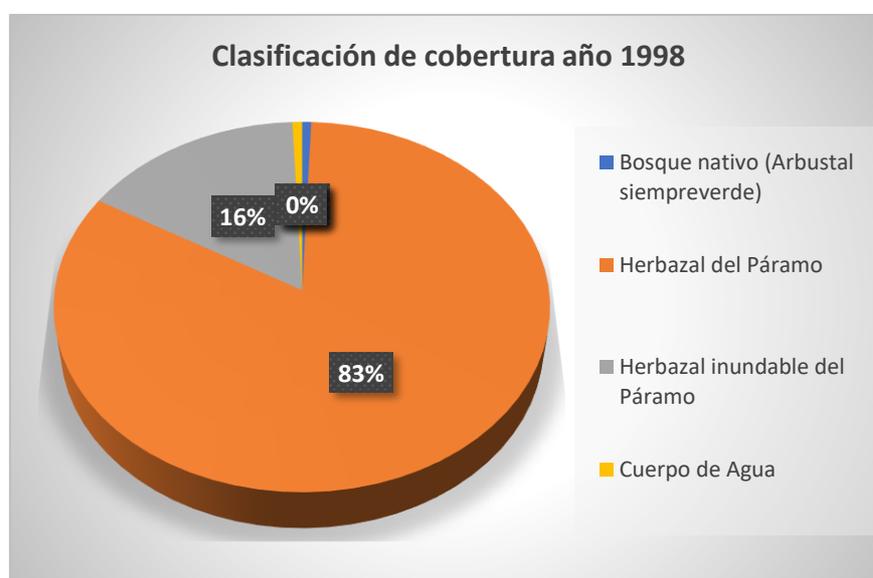
COBERTURA	AÑO 1998	
	Área (ha)	Porcentaje %
Bosque nativo (Arbustal siempreverde)	20,68	0,64
Herbazal del Páramo	2665,75	82,86
Herbazal inundable del Páramo	508,53	15,81
Cuerpo de Agua	22,16	0,69
Plantación forestal	0,00	0,00

Pastizal		0,00	0,00
<b>TOTAL</b>		<b>3217,12</b>	<b>100</b>

De las cuales, el mayor porcentaje lo ocupa el herbazal del páramo con 82,86% que corresponde a 2665,75 Ha del total del área, herbazal inundable del páramo ocupa el 508,53 Ha que representan el 15,81%, seguido de los cuerpos de agua con una superficie de 22,16 Ha que cubren el 0,69% y finalmente el bosque nativo con una extensión de 20,68 Ha que abarcan un porcentaje del 0,64% del ANRQ (Figura 25).

**Figura 25**

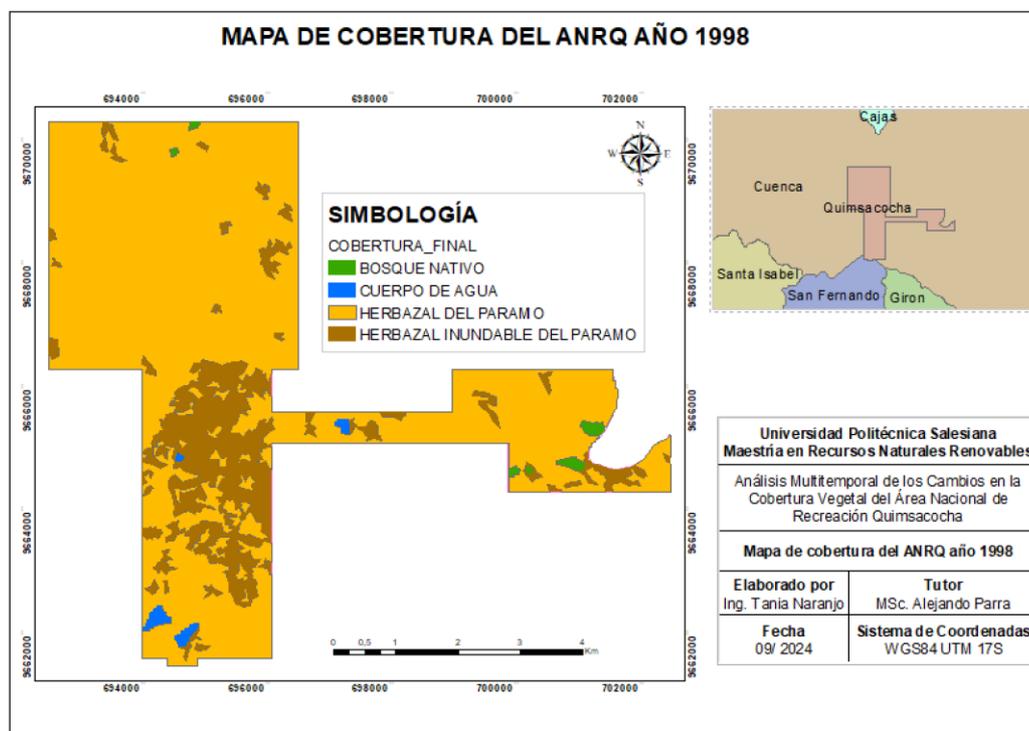
*Composición de coberturas en 1998*



A continuación, se puede observar el mapa de clasificación de cobertura de la Tierra para el año 1998 del Área Nacional de Recreación Quimsacocha, generado mediante clasificación supervisada de una imagen satelital Landsat 5 (Figura 26).

**Figura 26**

*Mapa de cobertura del ANRQ año 1998*



### 5.3.1.1. VALIDACIÓN DE RESULTADOS: MATRIZ DE CONFUSIÓN E ÍNDICE KAPPA 1998

La clasificación supervisada de 1998 presentó una buena definición de campos de entrenamiento, pues con la matriz de confusión se determinó una precisión observada del 97% y el índice Kappa fue del 96%, indicando una fuerza de concordancia “casi perfecta”. No obstante, al analizar los valores específicos de error, se identificaron variaciones en la exactitud según la cobertura.

El herbazal inundable del páramo presentó un 10,45% de error de comisión lo que indica cierta confusión con otras coberturas, posiblemente debido a características espectrales similares. Las demás coberturas (bosque nativo, herbazal del páramo y cuerpo de agua) no presentaron errores de comisión (0%). Por otro lado, herbazal del páramo tuvo un error de omisión del 11,67% lo cual podría reflejar insuficiencia en los datos de entrenamiento para esta clase. Las demás coberturas no presentaron errores de omisión.

Es así como, las clases bosque nativo y cuerpo de agua mostraron un desempeño perfecto (0% en errores de omisión y comisión) lo que evidencia una adecuada identificación de estas coberturas. Aunque existen limitaciones en el herbazal del páramo y el herbazal inundable del páramo, la robustez de la clasificación supervisada se respalda en la alta precisión global y la fuerza de concordancia del índice Kappa, siendo adecuada para el análisis multitemporal.

Las estadísticas de validación de la clasificación supervisada de 1998 se detallan en la Tabla 14.

**Tabla 14**

*Matriz de confusión e índice Kappa de validación de la clasificación supervisada año 1998*

COBERTURA	Bosque nativo	Herbazal del Páramo	Herbazal inundable del Páramo	Cuerpo de Agua	Total	Error de comisión	% Error de comisión
Bosque nativo	60	0	0	0	60	0	0,00
Herbazal del Páramo	0	53	0	0	53	0	0,00
Herbazal inundable del Páramo	0	7	60	0	67	7	10,45
Cuerpo de Agua	0	0	0	60	60	0	0,00
<b>Total</b>	60	60	60	60	<b>240</b>		
<b>Error de omisión</b>	0	7	0	0			
<b>% Error omisión</b>	0,00	11,67	0,00	0,00			
<b>Precisión observada (Po)</b>					0,97 = 97,00%		
<b>Precisión esperada (pe)</b>					0,25 = 25,00%		
<b>Índice Kappa</b>					<b>0,96 = 96%</b>		
<b>Fuerza de concordancia</b>					<b>Casi perfecta</b>		

### 5.3.2. COBERTURAS DEL ANRQ AÑO 2015

En el segundo periodo de estudio se distinguen dos tipos de cobertura nuevas que no se encontraban en el año 1998 que son plantación forestal y pastizal, por tanto, en el año 2015 se puede diferenciar seis clases de cobertura como se observa en la Tabla 15, bosque nativo, herbazal del páramo, herbazal inundable del páramo, cuerpo de agua, plantación forestal y pastizal.

**Tabla 15**

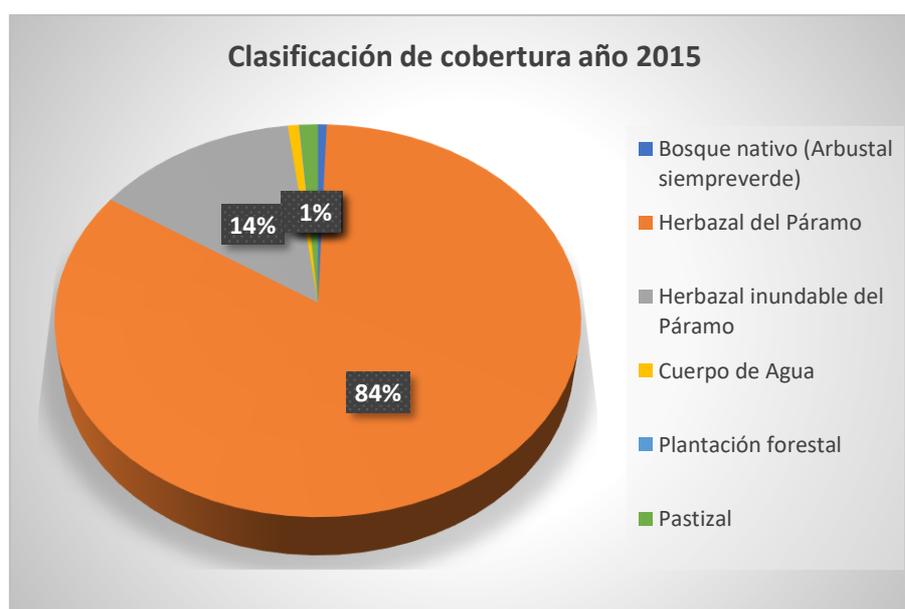
*Clasificación de cobertura ANRQ año 2015*

COBERTURA	AÑO 2015	
	Área (Ha)	Porcentaje %
Bosque nativo (Arbustal siempreverde)	18,52	0,58
Herbazal del Páramo	2695,99	83,80
Herbazal inundable del Páramo	437,82	13,61
Cuerpo de Agua	24,12	0,75
Plantación forestal	1,83	0,06
Pastizal	38,84	1,21
<b>TOTAL</b>	<b>3217,12</b>	<b>100</b>

Al igual que en el primer periodo de estudio, en 2015 el mayor porcentaje lo ocupa el herbazal del páramo con 83,80% que corresponde a 2695,99 Ha del total del área, herbazal inundable del páramo ocupa 437,82 Ha que representan el 13,61%, seguido del pastizal con un área de 38,84 Ha cuyo porcentaje es 1,21%, los cuerpos de agua tienen una superficie de 24,12 Ha que cubren el 0,75%, luego está el bosque nativo con una extensión de 18,52 Ha que abarcan un porcentaje de 0,58% y finalmente con el 0,06% se encuentra plantación forestal cuya superficie es de 1,83 Ha del ANRQ (Figura 27).

**Figura 27**

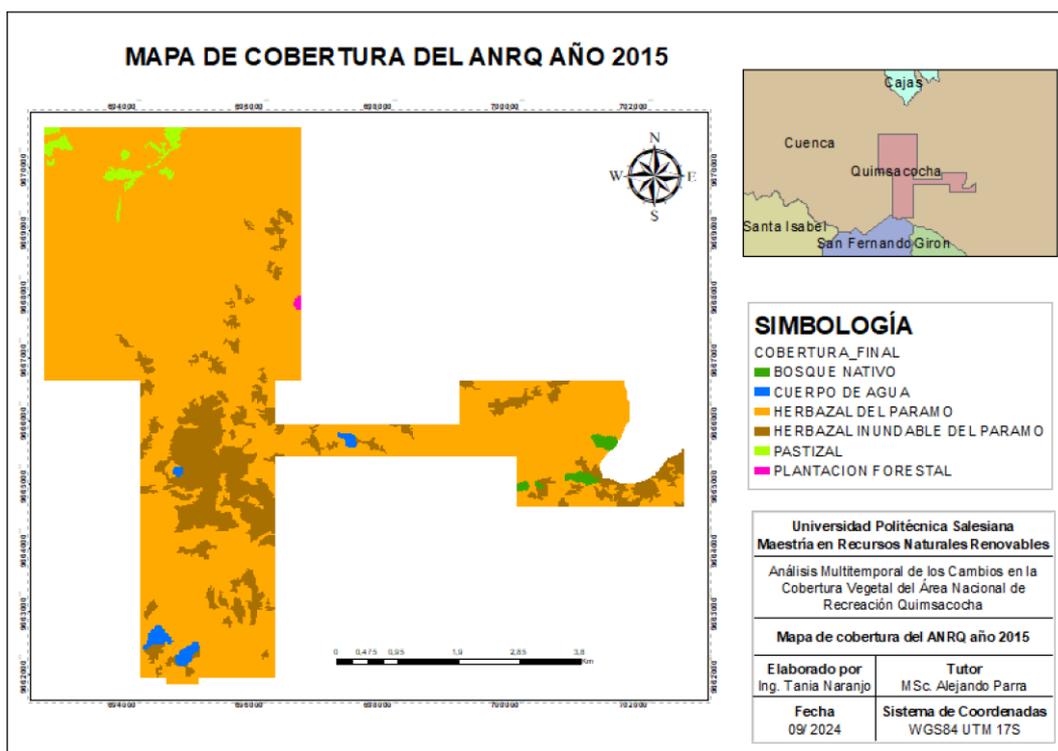
*Composición de cobertura año 2015*



En la Figura 28 se presenta el mapa de clasificación de cobertura de la Tierra para el año 2015 del Área Nacional de Recreación Quimsacocha, generado mediante clasificación supervisada de una imagen satelital Landsat 8.

**Figura 28**

*Mapa de cobertura del ANRQ año 2015*



### 5.3.2.1. VALIDACIÓN DE RESULTADOS: MATRIZ DE CONFUSIÓN E ÍNDICE KAPPA 2015

La clasificación supervisada de 2015 presentó una precisión observada del 94% y un índice Kappa del 93%, lo cual indica una fuerza de concordancia “casi perfecta”. Al analizar los errores específicos, se identificaron las siguientes observaciones:

Error de comisión: la clase herbazal del páramo mostró el mayor error (19,05%), seguida por el herbazal inundable del páramo (13,85%) y en menor proporción el pastizal (1,67%), lo que sugiere confusión entre estas categorías debido a similitudes espectrales. En contraste, las clases bosque nativo, cuerpo de agua y plantación forestal no presentaron errores de comisión.

Error de omisión: herbazal del páramo tuvo un error de 15%, el valor más alto, probablemente asociado con insuficiencia en los datos de entrenamiento o la variabilidad de las condiciones ecológicas. Herbazal inundable del páramo y pastizal presentaron errores moderados (6,67% y 1,67% respectivamente), mientras que las demás clases no presentaron errores de omisión.

En contraste, las clases bosque nativo y cuerpo de agua mostraron un desempeño perfecto (0% en errores de omisión y comisión) lo que evidencia una adecuada identificación de estas coberturas. Aunque existen limitaciones en las demás coberturas, la robustez de la clasificación supervisada se respalda en la alta precisión global y la fuerza de concordancia del índice Kappa, siendo adecuada para el análisis multitemporal. Las estadísticas de validación de la clasificación supervisada de 2015 se detallan en la Tabla 16.

**Tabla 16**

*Matriz de confusión e índice Kappa de validación de la clasificación supervisada año 2015*

COBERTURAS	Bosque nativo	Herbazal del Páramo	Herbazal inundable del Páramo	Cuerpo de Agua	Plantación forestal	Pastizal	Total	Error de comisión	% Error de comisión
Bosque nativo	60	0	0	0	0	0	60	0	0,00
Herbazal del Páramo	0	51	4	0	7	1	63	12	19,05
Herbazal inundable del Páramo	0	9	56	0	0	0	65	9	13,85
Cuerpo de Agua	0	0	0	60	0	0	60	0	0,00
Plantación forestal	0	0	0	0	53	0	53	0	0,00
Pastizal	0	0	0	0	0	59	59	1	1,69
<b>Total</b>	60	60	60	60	60	60	<b>360</b>		
<b>Error de omisión</b>	0	9	4	0	7	1			
<b>% Error de omisión</b>	0,00	15,00	6,67	0,00	11,67	1,67			
<b>Precisión observada (Po)</b>							0,94 = 94%		
<b>Precisión esperada (Pe)</b>							0,17 = 17%		
<b>Índice Kappa</b>							<b>0,93 = 93%</b>		
<b>Fuerza de concordancia</b>							<b>Casi perfecta</b>		

### 5.3.3. COBERTURAS DEL ANRQ AÑO 2024

En el tercer año de estudio (2024) se mantienen las seis clases de cobertura identificadas en el año 2015, como se muestra en la Tabla 17, diferenciándose la cobertura bosque nativo, herbazal del páramo, herbazal inundable del páramo, cuerpo de agua, plantación forestal y pastizal.

**Tabla 17**

*Clasificación de cobertura ANRQ año 2024*

COBERTURA	AÑO 2024	
	Área (Ha)	Porcentaje %
Bosque nativo (Arbustal siempreverde)	18,77	0,58
Herbazal del Páramo	2766,50	85,99
Herbazal inundable del Páramo	375,18	11,66
Cuerpo de Agua	21,38	0,66
Plantación forestal	4,97	0,15
Pastizal	30,32	0,94
<b>TOTAL</b>	<b>3217,12</b>	<b>100</b>

La tendencia del porcentaje de las clases de cobertura para el 2024 se mantiene semejante al 2015, en donde el mayor porcentaje lo ocupa el herbazal del páramo con 85,9% que corresponde a 2766,50 Ha del total del área, herbazal inundable del páramo ocupa 375,18 Ha que representan el 11,66%, seguido del pastizal con un área de 30,32 Ha cuyo porcentaje es 0,94%, los cuerpos de agua tienen una superficie de 21,38 Ha que cubren el 0,66%, luego está el bosque nativo con una extensión de 18,77 Ha que abarcan un porcentaje de 0,58% y finalmente con el 0,15% se encuentra plantación forestal cuya superficie es de 4,97 Ha del ANRQ (Figura 29).

**Figura 29**

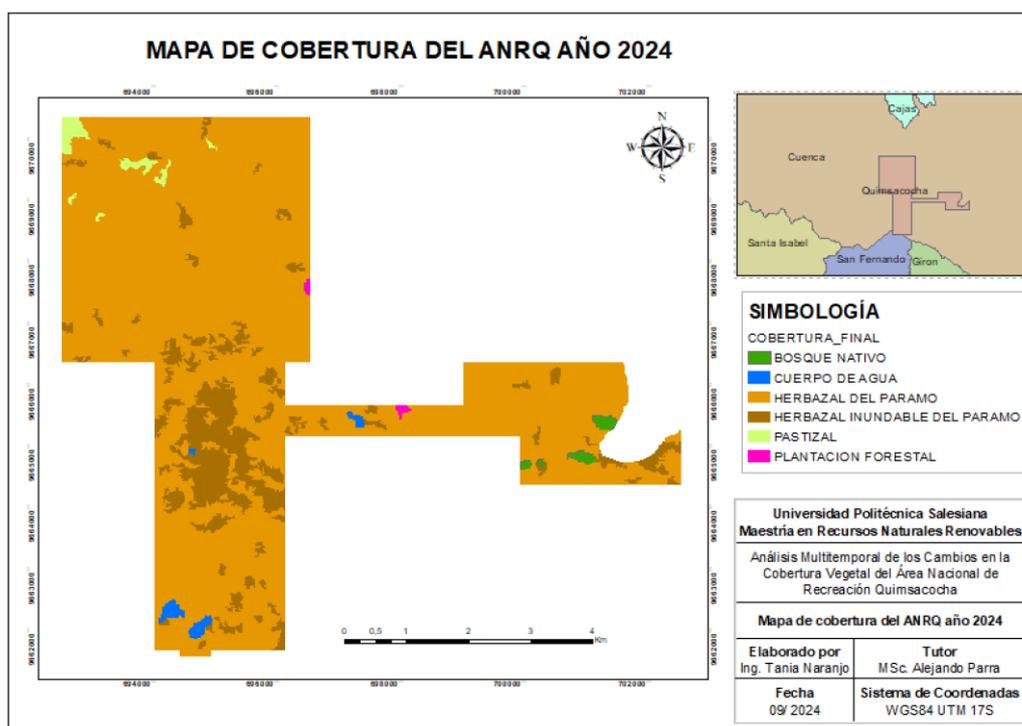
*Composición de cobertura año 2024*



En la Figura 30 se puede observar el mapa de clasificación de Cobertura de la Tierra para el año 2024 del Área Nacional de Recreación Quimsacocha, generado mediante clasificación supervisada de una imagen satelital Landsat 9.

**Figura 30**

*Mapa de cobertura del ANRQ año 2024*



### 5.3.3.1. VALIDACIÓN DE RESULTADOS: MATRIZ DE CONFUSIÓN E ÍNDICE KAPPA 2024

La clasificación supervisada de 2024 presentó una alta precisión, pues con la matriz de confusión se determinó una precisión observada del 97% y el índice Kappa fue del 96% lo cual indica una fuerza de concordancia “casi perfecta”. Así mismo en la Tabla 18, se observa que las categorías herbazal inundable del páramo y herbazal del páramo presentaron errores de comisión del 10,45% y 7,14% respectivamente, lo que evidencia confusión entre estas clases. Las categorías bosque nativo, cuerpo de agua y plantación forestal no presentaron errores de comisión. En cuanto a los errores de omisión, herbazal del páramo tuvo mayor error (13,33%), seguido por herbazal inundable del páramo (5%) y pastizal (1,67%), mientras que las clases de bosque nativo y cuerpo de agua no registraron errores de omisión.

Por tanto, las clases bosque nativo y cuerpo de agua mostraron un desempeño perfecto (0% en errores de omisión y comisión) lo que evidencia una adecuada identificación de estas coberturas. Aunque existen limitaciones en las demás coberturas, la robustez de la clasificación supervisada se respalda en la alta precisión global y la fuerza de concordancia del índice Kappa, siendo adecuada para el análisis multitemporal.

**Tabla 18**

*Matriz de confusión e índice Kappa de validación de la clasificación supervisada año 2024*

COBERTURA	Bosque nativo	Herbazal del Páramo	Herbazal inundable del Páramo	Cuerpo de Agua	Plantación forestal	Pastizal	Total	Error de comisión	% Error de comisión
Bosque nativo	60	0	0	0	0	0	60	0	0,00
Herbazal del Páramo	0	52	0	0	3	1	56	4	7,14
Herbazal inundable del Páramo	0	7	60	0	0	0	67	7	10,45
Cuerpo de Agua	0	0	0	60	0	0	60	0	0,00
Plantación forestal	0	0	0	0	57	0	57	0	0,00
Pastizal	0	1	0	0	0	59	60	1	1,67
<b>Total</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>360</b>		

<b>Error de omisión</b>	0	8	0	0	3	1	
<b>% Error omisión</b>	0,00	13,33	0,00	0,00	5,00	1,67	
<b>Precisión observada (Po)</b>							0,97 = 97%
<b>Precisión esperada (Pe)</b>							0,17 = 17%
<b>Índice Kappa</b>							<b>0,96 = 96%</b>
<b>Fuerza de concordancia</b>							<b>Casi perfecta</b>

## 5.4. ANÁLISIS DEL CAMBIO DE LA COBERTURA VEGETAL EN LOS AÑOS 1998, 2015 Y 2024

De acuerdo con la Tabla 19, las cinco categorías de cobertura vegetal y cuerpos de agua presentan cambios durante los años de estudio, se observa que en 1998 no existían las coberturas de plantación forestal ni pastizal, en el año 2015 se evidencia la presencia de 0,06% de plantación forestal que corresponde a 1,83 Ha valor que se incrementa al 0,15% en el 2024 con una superficie de 4,97 Ha; en cuanto al pastizal en 2015 ocupa el 1,21% que hace referencia a 38,84 Ha y en el año 2024 se reduce al 0,94% cuya extensión es de 30,32 Ha.

Otro cambio evidente es la reducción de herbazal inundable del páramo, pues en 1998 existían 508,53 Ha que representaban el 15,81% del área, en 2015 se reduce a 437,82 Ha con un porcentaje del 13,61% y en el año 2024 el área de esta cobertura llega a 375,18 Ha que corresponde al 11,66%.

La cobertura herbazal del páramo por el contrario muestra un incremento a través del tiempo y a su vez es la de mayor extensión dentro del área de estudio, pues en 1998 ocupa 2665,75 Ha que representa un porcentaje de 82,86%, en 2015 se incrementa a 2695,99 Ha cubriendo el 83,80% de la superficie y en 2024 el área aumenta a 2766,50 Ha que corresponde al 85,99%.

Mientras que la cobertura bosque nativo sufre una reducción de su superficie pues el 1998 cubría un área de 20,68 Ha que representaba el 0,64%, en 2015 baja a 18,52 Ha con un porcentaje de 0,58%, valores que se mantienen relativamente estables hasta 2024 con 18,77 Ha y 0,58% del porcentaje del área de estudio.

Finalmente, la cobertura cuerpo de agua en 1998 representaba el 0,69% que corresponde a 22,16 Ha, en 2015 este valor se incrementa hasta 0,75% con un área de 24,12 Ha, para en 2024 volver a valores similares a los del primer año de estudio, con un porcentaje de 0,66% que cubre una superficie de 21,38 Ha.

**Tabla 19**

*Cobertura terrestre del ANRQ del año 1998-2015-2024*

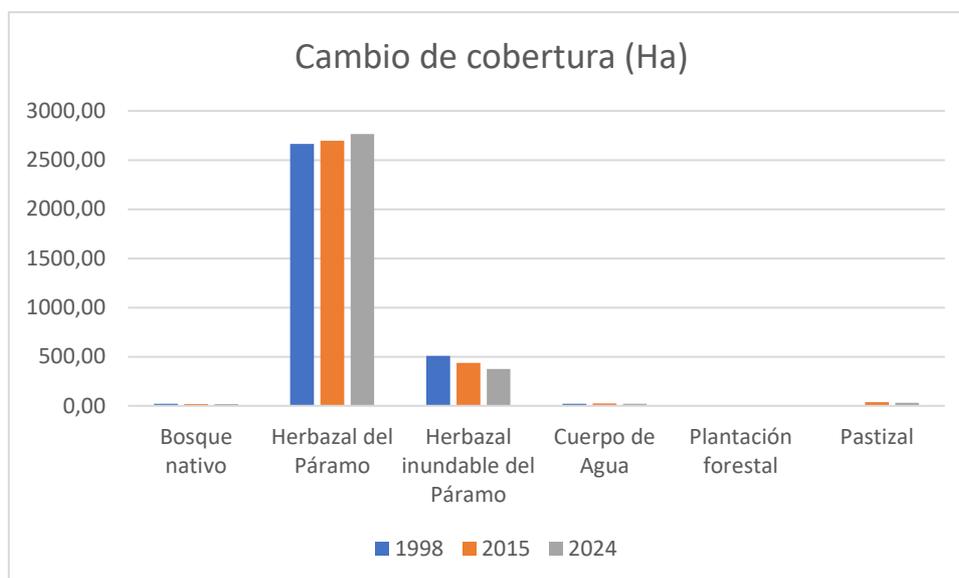
COBERTURA	AÑO 1998		AÑO 2015		AÑO 2024	
	Área (Ha)	%	Área (Ha)	%	Área (Ha)	%
Bosque nativo	20,68	0,64	18,52	0,58	18,77	0,58
Herbazal del Páramo	2665,75	82,86	2695,99	83,80	2766,50	85,99
Herbazal inundable del Páramo	508,53	15,81	437,82	13,61	375,18	11,66
Cuerpo de Agua	22,16	0,69	24,12	0,75	21,38	0,66
Plantación forestal	0,00	0,00	1,83	0,06	4,97	0,15
Pastizal	0,00	0,00	38,84	1,21	30,32	0,94
<b>TOTAL</b>	<b>3217,12</b>	<b>100</b>	<b>3217,12</b>	<b>100</b>	<b>3217,12</b>	<b>100</b>

La Figura 31 muestra un aumento de la cobertura herbazal del páramo para el intervalo de tiempo analizado (82,86% en 1998, 83,80% en 2015 y 85,99% en 2024), siendo la categoría que mayor superficie ocupa, estos hallazgos son consistentes con los observados por (INSIGMA et al., 2018) quienes, en el análisis de uso de la tierra realizado mediante una ortofoto 1:5000 del SIG Tierras del año 2010, determinaron que el uso de suelo páramo de pajonal ocupaba el área más extensa, empero cubre el 58,5% de las superficie que es significativamente menor a los resultados de este estudio, se coincide en que la cobertura que está en segundo lugar en extensión es el herbazal inundable de páramo, con el análisis multitemporal se aprecia una disminución del 15,81% en 1998 al 11,66% en 2024 pero en el estudio de (INSIGMA et al., 2018) los humedales (no incluye ríos y lagunas) ocupan el 24,56% en 2010 lo que es considerablemente mayor al porcentaje obtenido en este estudio. La cobertura de bosque nativo en 1998 ocupa el 0,64% y en 2015 y 2024 el 0,58% mostrando una ligera reducción y posterior

estabilización, del análisis de (INSIGMA et al., 2018) en 2010 obtienen un valor cercano, el bosque de Polylepis ocupaba el 0,94% de la superficie; la cobertura plantación forestal en este estudio muestra un porcentaje de 0,06% en 2015 y 0,15% en 2024 (INSIGMA et al., 2018) también menciona la existencia de plantaciones de pino en 2010 que ocupan el 0,14%, lo cual es muy cercano al porcentaje observado en 2024, obteniendo una correlación entre los datos. La cobertura cuerpo de agua muestra cambios que van de 0,69% en 1998, a 0,75% en 2015 y 0,66% en 2024, en el análisis de (INSIGMA et al., 2018) en 2010 las lagunas ocupan el 0,96% siendo mayor a los resultados obtenidos en este estudio.

Las discrepancias podrían atribuirse a diferencias en la categorización debido a que el análisis realizado por (INSIGMA et al., 2018) utilizó información satelital de alta resolución, lo que les permitió la identificar y clasificar de nueve clases de uso de suelo, mientras que en la presente investigación se identificaron seis categorías, pues si bien la resolución espacial de las imágenes satelitales Landsat es buena, no alcanza los detalles generados por una ortofoto 1:5000 empleada para el análisis de uso de la tierra del año 2010, por (INSIGMA et al., 2018). Por lo que en este estudio no fue posible identificar el páramo de almohadilla, ríos, vías y matorral, ya que la resolución de los píxeles fue de 30 m de la imagen de 1998 y 15 m de las imágenes de 2015 y 2024, pero si fueron caracterizados por (INSIGMA et al., 2018) para el año 2010; sin embargo, en esta investigación se identificó la cobertura pastizal en 2015 con un porcentaje de 1,21% que se reduce al 0,94% en 2024, la cual de acuerdo con el análisis de (INSIGMA et al., 2018) en el año 2010 no fue identificada, lo que indicaría que su aparición fue posterior o que no fue notoria en ese momento.

Cabe recalcar que la ortofoto 1:5000 utilizada por (INSIGMA et al., 2018) es de mejor resolución que las imágenes satelitales empleadas para este estudio, por ende existen diferencias en los resultados, sin embargo los dos análisis tienen concordancia, en este sentido se recomienda que para análisis de zonas con ecosistemas mosaico de vegetación, como es el páramo de Quimsacocha, se empleen imágenes de más alta resolución para una mejor interpretación.

**Figura 31***Cambio de la cobertura terrestre del ANRQ del año 1998-2015-2024*

### 5.4.1. TRANSICIÓN DE COBERTURA TERRESTRE PERIODO 1998-2015

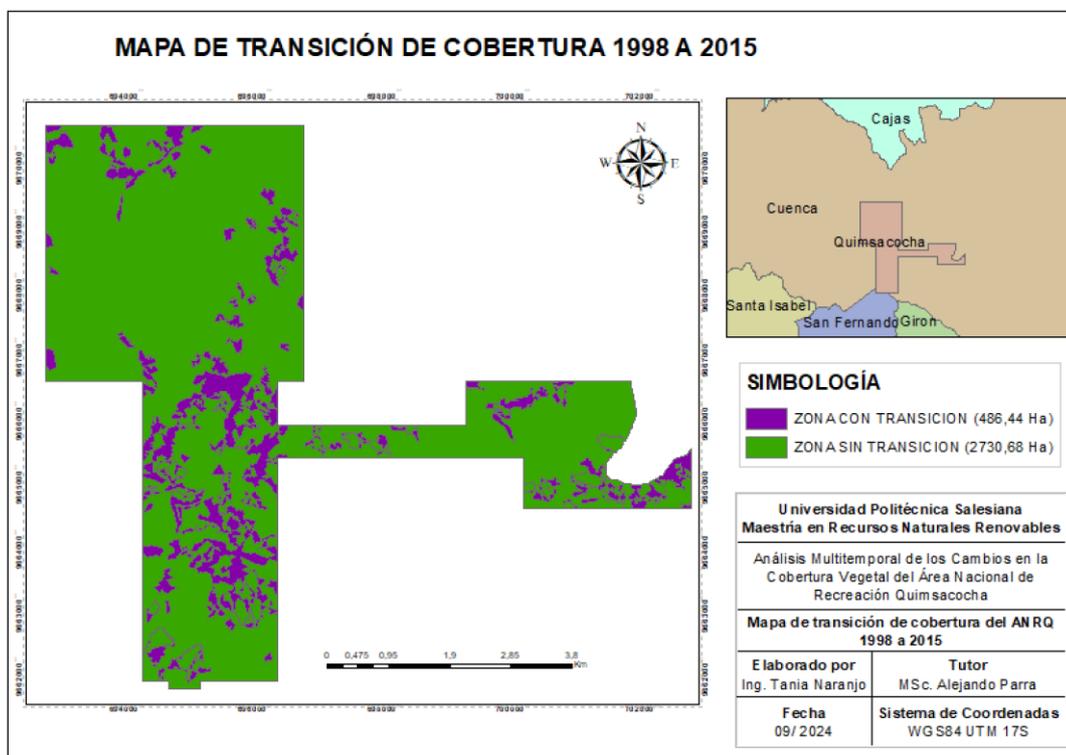
La Tabla 20 muestra el resultado de la transición de la cobertura terrestre en el Área Nacional de Recreación Quimsacocha correspondiente al periodo 1998-2015, en donde se observa que la superficie de bosque nativo que no ha sufrido cambio concierne a 16,35 Ha, con pérdidas de 4,28 Ha y ganancias de 2,05 Ha, detectando que durante estos años en total se han perdido 2,23 Ha de bosque nativo. El área de la cobertura herbazal del páramo que no ha cambiado es de 2438,61 Ha con ganancias de 258,08 Ha y pérdidas de 225,10 Ha, la transición durante este periodo muestra que en total esta cobertura ha ganado 32,89 Ha. Herbazal inundable del páramo por su parte ha mantenido 255,30 Ha sin cambios con pérdidas de 255,12 Ha y ganancias de 181,70 Ha, generando un cambio total con una disminución de 73,43 Ha. En 1998 no existe presencia de plantación forestal ni pastizal en 2015 se registra una superficie de 1,83 Ha y 38,98 Ha respectivamente. Finalmente, los cuerpos de agua han mantenido 20,42 Ha sin cambio, con ganancias de 3,79 Ha y pérdidas de 1,85 Ha, generando un incremento total de 1,95 Ha.

**Tabla 20**

*Matriz transición periodo 1998-2015*

Matriz transición periodo 1998-2015		Año 2015							Total, Año 1, T1	Pérdidas (Ha)
		Bosque nativo	Herbazal del Páramo	Herbazal inundable del Páramo	Cuerpo de Agua	Plantación forestal	Pastizal			
		1	2	3	4	5	6			
Año 1998	Bosque nativo	10	16,35	3,84	0,44	0,00	0,00	0,00	20,63	4,28
	Herbazal del Páramo	20	1,39	2438,61	180,97	2,02	1,83	38,98	2663,80	225,19
	Herbazal inundable del Páramo	30	0,66	252,69	255,30	1,77	0,00	0,00	510,42	255,12
	Cuerpo de Agua	40	0,00	1,56	0,29	20,42	0,00	0,00	22,27	1,85
	Plantación forestal	50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Pastizal	60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>Total, Año 2, T2</b>		18,40	2696,69	437,00	24,22	1,83	38,98	<b>3217,12</b>	486,44
<b>Ganancias (Ha)</b>		2,05	258,08	181,70	3,79	1,83	38,98	486,44		
<b>Cambio Total (Ha)</b>			-2,23	32,89	-73,43	1,95	1,83	38,98		
<b>Zona sin transición</b>			2730,68	Ha	84,88	%				
<b>Zona con transición</b>			486,44	Ha	15,12	%				
<b>Total, superficie</b>			3217,12	Ha	100,00	%				

Con este análisis de transición se determina que en el periodo 1998 a 2015 en el Área Nacional de Recreación Quimsacocha 2730,68 Ha no han sufrido transición alguna, generándose cambios en 486,44 Ha (Figura 32) como se visualiza en la Tabla 20 corresponden al 84,88% y 15,12% respectivamente, cuyo cambio total evidencia pérdidas de bosque nativo de herbazal inundable del páramo y ganancias de herbazal del páramo y cuerpo de agua, así como la aparición de plantación forestal y pastizal.

**Figura 32***Mapa de transición de cobertura de 1998 a 2015*

La presencia en 2015 de la cobertura plantación forestal se explicaría por el hecho que en áreas colindantes con el ANRQ existen plantaciones de pino que se atribuyen a los proyectos de forestación que iniciaron en el Ecuador en el año de 1953 y en la provincia del Azuay hace 50 años aproximadamente (Torres Celi, 2014), algunos de estos proyectos se centraron en objetivos económicos, como la producción de madera, otros en metas biofísicas, como el control de erosión y la captura de carbono, y varios de ellos simplemente consideraron la forestación como un fin en sí mismo, sin objetivos claros (Farley, 2008). Lo que ha generado que muchas plantaciones forestales de pino, hayan sido abandonadas y por tanto no se han realizado labores silviculturales (Jadán et al., 2019), generando su desplazamiento desmedido hacia zonas de protección ecológica como es el caso de estudio.

Junto a la zona en donde se determinó la presencia de plantación forestal existen, de acuerdo con el plan de manejo del área, predios individuales y comunitarios que se encuentran dentro del programa Socio-Bosque que fue ejecutado a partir del año 2008 (INSIGMA et al., 2018) que si bien es una estrategia de conservación

establecida por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, en este caso en particular al incluir estos predios plantaciones de pino, se afecta a la vegetación nativa de la zona, ya que como lo mencionan (Cargua et al., 2014; Jadán et al., 2019) estas especies exóticas compiten por recursos como la luz, agua y nutrientes, llevando al desplazamiento de especies vegetales nativas del páramo. La estructura y dinámica del ecosistema se modifica, pues los pinos pueden cambiar el microclima local y afectar los patrones de humedad y temperatura, así mismo, sus raíces consiguen compactar el suelo, lo que afecta su capacidad de retención de agua y nutrientes, en este sentido un estudio en Cotopaxi reveló que los suelos bajo pinos de 20-25 años retuvieron entre 39-63% menos agua en comparación con los suelos del páramo (Farley, 2008), además la acumulación de agujas de pino genera acidificación del suelo, llegando a erosionar el mismo. También la fauna nativa se ve afectada, ya que muchas especies dependen de las plantas nativas para alimentarse y refugiarse.

Es de suma importancia implementar prácticas de manejo sostenible que consideren la conservación de la flora y fauna nativas, porque si bien las plantaciones de pino generan beneficios económicos a las comunidades locales, se está comprometiendo el equilibrio ecológico del páramo del Área Nacional de Recreación Quimsacocha.

En cuanto a los pastizales ausentes en 1998 y que muestran presencia en 2015, se relacionaría con el hecho de que el páramo de Quimsacocha ha experimentado un proceso de ocupación debido a la necesidad de pastoreo durante inviernos severos y sequías prolongadas en las zonas bajas, ocasionando que los campesinos de la zona trasladaran su ganado (vacuno, lanar y equino) hacia el páramo. Lo que a su vez ha generado conflictos de tenencia de tierra, con lo cual se favoreció el avance de la frontera pecuaria, con el consecuente sobrepastoreo y quemas de pajonal (INSIGMA et al., 2018).

Evidentemente estas actividades sumadas a otras como los deportes motorizados y drenaje artificial dentro del Área Nacional de Recreación Quimsacocha, provocan cambios constantes en la vegetación natural como es el herbazal del páramo,

herbazal inundable del páramo, boque nativo e incluso los cuerpos de agua cuyo porcentaje de transición en este periodo es de 15,12%.

## 5.4.2. TRANSICIÓN DE COBERTURA TERRESTRE PERIODO 2015-2024

La transición de la cobertura terrestre en el Área Nacional de Recreación Quimsacocha correspondiente al periodo 2015 - 2024 se muestra en la Tabla 21, en donde se observa que la superficie de bosque nativo que no ha sufrido cambio concierne a 17,48 Ha con pérdidas de 1,02 Ha y ganancias de 1,26 Ha, detectando que durante estos años en total se han incrementado 0,24 Ha de bosque nativo. El área de la cobertura herbazal del páramo que no ha cambiado es de 25441,41 Ha con ganancias de 222,20 Ha y pérdidas de 151,72 Ha, la transición durante este periodo muestra que en total esta cobertura ha ganado 70,47 Ha. Herbazal inundable del páramo por su parte ha mantenido 238,95 Ha sin cambios, con pérdidas de 198,76 Ha y ganancias de 136,15 Ha, generando un cambio total con una disminución de 62,61 Ha. La cobertura de plantación forestal mantiene sin cambios 1,79 Ha con ganancias de 3,17 Ha y pérdidas de 0,03 Ha lo que genera un aumento total de 3,15 Ha. Del pastizal no se han modificado 17,61 Ha presenta pérdidas de 21, 22 Ha y ganancia de 12,71 Ha lo que hace evidente una reducción de 8,51 Ha de superficie. Finalmente, los cuerpos de agua han mantenido 20,87 Ha sin cambio, con pérdidas de 3,26 Ha y ganancias de 0,52 Ha lo cual genera una disminución total de 2,74 Ha.

**Tabla 21**

*Matriz transición periodo 2015 - 2024*

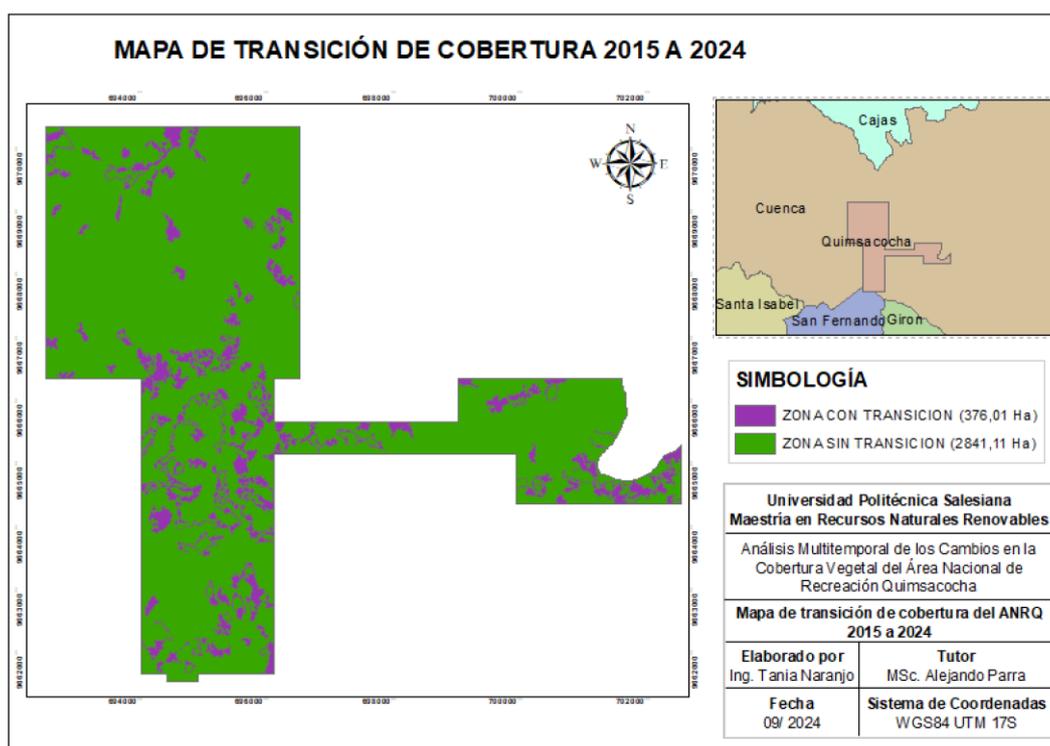
Matriz transición periodo 2015-2024		Año 2024								
		Bosque nativo	Herbazal del Páramo	Herbazal inundable del Páramo	Cuerpo de Agua	Plantación forestal	Pastizal	Total, Año 1, T1	Pérdidas	
		1	2	3	4	5	6			
Año 2015	Bosque nativo	10	17,48	0,76	0,26	0,00	0,00	0,00	18,50	1,02
	Herbazal del Páramo	20	0,90	2544,41	135,27	0,37	2,47	12,71	2696,14	151,72

<b>Herbazal inundable del Páramo</b>	30	0,36	197,55	238,95	0,14	0,71	0,00	437,71	198,76
<b>Cuerpo de Agua</b>	40	0,00	2,65	0,61	20,87	0,00	0,00	24,13	3,26
<b>Plantación forestal</b>	50	0,00	0,03	0,00	0,00	1,79	0,00	1,82	0,03
<b>Pastizal</b>	60	0,00	21,21	0,01	0,00	0,00	17,61	38,83	21,22
<b>Total, Año 2, T2</b>		18,73	2766,61	375,10	21,39	4,96	30,33	<b>3217,12</b>	376,01
<b>Ganancias</b>		1,26	222,20	136,15	0,52	3,17	12,71	376,01	
<b>Cambio Total</b>		0,24	70,47	-62,61	-2,74	3,15	-8,51		
<b>Zona sin transición</b>		2841,11	Ha	88,31	%				
<b>Zona con transición</b>		376,01	Ha	11,69	%				
<b>Total, superficie</b>		3217,12	Ha	100,00	%				

Con este análisis de transición se determina que en el periodo 2015 a 2024 en el Área Nacional de Recreación Quimsacocha 2841,11 Ha no han sufrido transición alguna generándose cambios en 376,01 Ha (Figura 33) como se visualiza en la Tabla 21 corresponden al 88,31% y al 11,69% respectivamente, cuyo cambio total evidencia pérdidas de herbazal inundable del páramo, cuerpo de agua y pastizal, y ganancias de bosque nativo, herbazal del páramo y plantación forestal.

### Figura 33

Mapa de transición de cobertura de 2015 a 2024



El porcentaje de transición del periodo 2015 a 2024 se reduce a 11,69%, lo cual tiene concordancia con el hecho de que en el año 2012 se declara esta zona como Área Nacional de Recreación administración a cargo de la Empresa Pública ETAPA EP, siendo evidente la disminución de la superficie de pastizal con la consecuente reducción de actividades de pastoreo, sin embargo, como lo señala (INSIGMA et al., 2018) y como se evidenció en la visita de campo (Figura 34), existe presencia de ganadería extensiva de camélidos que si no se gestiona adecuadamente podría provocar problemas de sobrepastoreo a futuro, lo cual aportaría a la degradación del suelo, pérdida de vegetación y disminución de la biodiversidad de la zona.

### **Figura 34**

*Evidencia de la presencia de ganadería extensiva de camélidos dentro del ANRQ*



Mientras que la cobertura de plantación forestal tiende a seguir creciendo, debido a que como se indicó anteriormente muchas plantaciones de pino han sido abandonadas sin tener el seguimiento y mantenimiento adecuado en cuanto a las actividades de silvicultura, ocasionando un crecimiento desmedido hacia las zonas aledañas.

Las alteraciones de las coberturas vegetales de herbazal inundable del páramo, bosque nativo y herbazal del páramo se relacionarían con actividades antrópicas como el drenaje artificial, la ganadería extensiva y los deportes extremos con vehículos motorizados, cuyas huellas son evidentes en una gran parte del área, lo cual se corroboró con la visita de campo y con las imágenes satelitales de alta

resolución que proporciona la plataforma Google Earth (Figura 35), pues mediante las imágenes satelitales Landsat utilizadas para este estudio no fue posible identificar las marcas dejadas por estos vehículos ya que los tamaños de los píxeles son demasiado grandes como para que se registre en una resolución de 30 y 15 metros, en este sentido se recomienda que para trabajos futuros así como para el monitoreo de esta área por parte de las entidades públicas competentes se realice mediante imágenes satelitales de alta resolución, que permitirá cuantificar con mayor precisión el área intervenida. Los efectos de estas prácticas prohibidas dentro del área de conservación generan contaminación por hidrocarburos y sedimentos, compactación y erosión del suelo, destrucción de la cobertura vegetal nativa, estrés y migración de la fauna nativa por causa del ruido e inclusive el desvío de quebradas y riachuelos alterando los tiempos de retención del agua (INSIGMA et al., 2018).

### Figura 35

*Marcas de los vehículos que ingresan al ANRQ*



Fuente: (Google Earth, 2024)

En el Plan de Manejo Ambiental del Área Nacional Quimsacocha, elaborado en 2018, se evidencian estos problemas que comprometen el equilibrio de este ecosistema de páramo por lo que se proponen varias medidas para erradicar estas prácticas, entre ellas está establecer un plan de vigilancia con los guardaparques y autoridades ambientales, construir un refugio con la infraestructura requerida para realizar actividades de control y vigilancia (INSIGMA et al., 2018), en la visita realizada al área se pudo evidenciar que el refugio fue construido, sin embargo, aparentemente no existe la presencia de guardaparques, por lo que el ingreso al área se realiza de forma libre y sin control.

### 5.4.3. TRANSICIÓN DE COBERTURA TERRESTRE PERIODO 1998-2024

Mediante este análisis de transición del periodo 1998 a 2024 se determinan los cambios de la cobertura terrestre en el Área Nacional de Recreación Quimsacocha durante los últimos 26 años, en la Tabla 22 se observa que la superficie de bosque nativo que no ha sufrido cambio concierne a 16,59 Ha con pérdidas de 4,04 Ha y ganancias de 2,02 Ha, detectando que durante estos años en total se han disminuido 1,98 Ha de bosque nativo. El área de la cobertura herbazal del páramo que no ha cambiado es de 2443,89 Ha con ganancias de 322,64 Ha y pérdidas de 219,89 Ha, la transición durante este periodo muestra que en total esta cobertura ha ganado 102,75 Ha. Herbazal inundable del páramo por su parte ha mantenido 190,28 Ha sin cambios, con pérdidas de 320,17 Ha y ganancias de 184,91 Ha, generando un cambio total con una disminución de 135,26 Ha. En 1998 no existe presencia de plantación forestal ni pastizal en 2024 se registra una superficie de 4,85 Ha y 30,44 Ha respectivamente. Finalmente, los cuerpos de agua han mantenido 18,85 Ha sin cambio, con pérdidas de 3,42 Ha y ganancias de 2,62 Ha lo cual genera una disminución total de 0,80 Ha.

**Tabla 22**

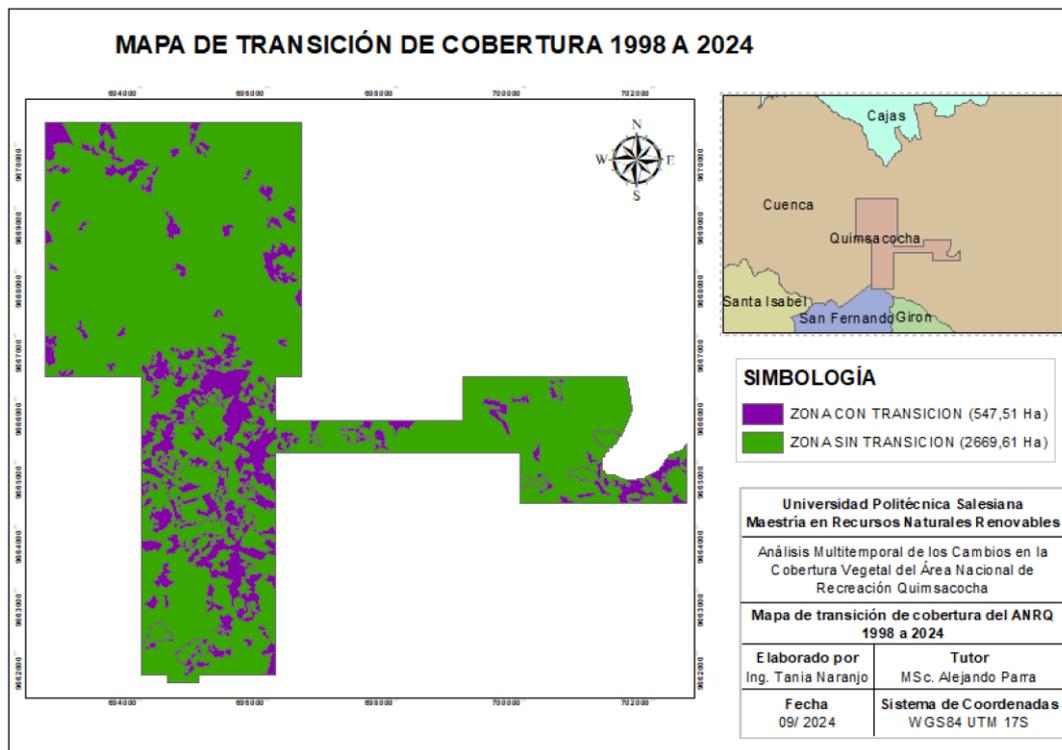
*Matriz transición periodo 1998 - 2024*

Matriz transición periodo 1998-2024		Año 2024						Total, Año 1, T1	Pérdidas	
		Bosque nativo	Herbazal del Páramo	Herbazal inundable del Páramo	Cuerpo de Agua	Plantación forestal	Pastizal			
		1	2	3	4	5	6			
Año 1998	Bosque nativo	10	16,59	2,95	1,09	0,00	0,00	0,00	20,63	4,04
	Herbazal del Páramo	20	1,54	2443,89	183,30	1,37	3,23	30,44	2663,78	219,89
	Herbazal inundable del Páramo	30	0,52	316,79	190,28	1,24	1,61	0,00	510,44	320,17
	Cuerpo de Agua	40	0,00	2,90	0,52	18,85	0,00	0,00	22,27	3,42
	Plantación forestal	50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Pastizal	60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	<b>Total, Año 2, T2</b>		18,64	2766,53	375,19	21,47	4,85	30,44	<b>3217,12</b>	547,51
	<b>Ganancias</b>		2,05	322,64	184,91	2,62	4,85	30,44	547,51	
<b>Cambio Total</b>			-1,98	102,75	-135,26	-0,80	4,85	30,44		
<b>Zona sin transición</b>			2669,61	Ha	82,98	%				
<b>Zona con transición</b>			547,51	Ha	17,02	%				
<b>Total, superficie</b>			3217,12	Ha	100,00	%				

Con este análisis de transición se determina que en el periodo 1998 a 2024 en el Área Nacional de Recreación Quimsacocha, 2669,61 Ha no han sufrido transición alguna generándose cambios en 547,51 Ha (Figura 36) como se visualiza en la Tabla 22 corresponden al 82,98% y al 17,02% respectivamente, en cuyo cambio total evidencian pérdidas de bosque nativo, herbazal inundable del páramo y cuerpo de agua, y ganancias herbazal del páramo, plantación forestal y pastizal.

Figura 36

Mapa de transición de cobertura de 1998 a 2024



Como ya se indicó en apartados anteriores, el porcentaje de zonas con transición en el periodo 1998 a 2015 corresponde a 15,12%, en el periodo 2015 a 2024 se redujo a 11,69%, mientras que, en el análisis transicional correspondiente a los 26 años de estudio, periodo 1998 a 2024, las zonas con cambios presentan un porcentaje del 17,02%, acotando a lo ya mencionado (Galeas et, al. 2013) citado en (INSIGMA et al., 2018) establecen que las transformaciones del ecosistema del ANRQ también se han generado por el drenaje artificial realizado con fines de riego para pastoreo, a ello se suma la eutrofización ocasionada por la escorrentía superficial y la presión del ganado sobre el suelo, con la modificación de las propiedades fisicoquímicas y un alto grado de erosión del suelo, lo que lleva a los “ecosistemas a estadios de degradación o transformación a ecosistemas de Herbazal del Páramo” (Galeas et, al. 2013), lo cual se relaciona con los resultados obtenidos en este periodo, pues se evidencian pérdidas de bosque nativo, herbazal inundable del páramo y cuerpo de agua, y ganancias herbazal del páramo, plantación forestal y pastizal.

## 6. CONCLUSIONES

Se obtuvieron imágenes satelitales Landsat 5, Landsat 8 y Landsat 9 correspondientes a los años 1998, 2015 y 2024, cubriendo un periodo de 26 años, la información obtenida permitió realizar el análisis de NDVI y la clasificación supervisada para el análisis multitemporal de la cobertura vegetal.

Los resultados del NDVI muestran una mejora general en la calidad de la vegetación, en donde las áreas con vegetación densa y vigorosa aumentan mientras que las áreas con vegetación moderada y escasa disminuyen, evidenciando un ligero aumento en los valores máximos de NDVI, pasando de 0,78 en 1998 a 0,80 en 2024 y la media pasó de 0,51 en 1998 y 2015 a 0,52 en 2024, lo que indica una vegetación más saludable a lo largo del tiempo.

De acuerdo con el uso de suelo que se ha dado en los últimos años dentro del Área Nacional de Recreación Quimsacocha, mediante la clasificación supervisada de imágenes satelitales, se visualiza que la cobertura terrestre en 1998 representaba cuatro categorías como son bosque nativo, herbazal del páramo, herbazal inundable del páramo y cuerpo de agua, en 2015 y 2024 a más de estas se presentan las coberturas plantación forestal y pastizal, obteniendo seis categorías de cobertura terrestre.

El análisis multitemporal de los años 1998, 2015 y 2024, destaca cambios significativos en la cobertura vegetal, con pérdida de bosque nativo de 0,64% en 1998 a 0,58% en 2024 y herbazal inundable del páramo de 15,81% en 1998 a 11,66% en 2024, los cuales fueron reemplazados por un incremento en el herbazal del páramo (82,86% en 1998 a 85,99% en 2024), plantación forestal y pastizal sin presencia en 1998 y en 2024 con 0,15% y 0,94% respectivamente.

El análisis de la matriz de confusión e índice Kappa arrojó una precisión superior al 93% lo que indica que el estudio tiene una fuerza de concordancia casi perfecta entre las clasificaciones generadas y los datos de referencia.

El análisis de transición de coberturas muestra que aproximadamente el 17,02% del área de estudio experimentó cambios entre 1998 y 2024, mientras que el 82,98% permaneció sin modificaciones. Estos procesos de transformación pueden estar vinculados tanto con la dinámica natural del ecosistema como por la influencia antrópica, incluyendo la ganadería extensiva, prácticas de deportes extremos, modificaciones ambientales como el drenaje artificial, proyectos forestales y minería cercana, que pesar de la implementación de un plan de manejo ambiental en 2018, estas actividades continúan amenazando el equilibrio ecológico de este ecosistema sensible.

Dado el papel fundamental de los ecosistemas de páramo en la regulación hídrica y la conservación de la biodiversidad, es esencial fortalecer las medidas de conservación, por lo que se recomienda aumentar el monitoreo utilizando tecnologías avanzadas de teledetección como imágenes satelitales de mayor resolución para obtener datos más detallados y precisos de los cambios en la vegetación y de las áreas de mayor vulnerabilidad. Ya que, si bien las imágenes satelitales Landsat tiene una buena resolución espacial para diversos estudios, para zonas con ecosistemas mosaico de vegetación, como es el páramo de Quimsacocha, se requieren de imágenes de más alta resolución para una mejor interpretación.

Los resultados de este estudio constituyen una base sólida para profundizar en el análisis de los factores que afectan la cobertura vegetal del páramo. Pues cumpliendo con el objetivo de identificar tendencias espaciales y temporales mediante análisis multitemporal y NDVI, se evidenciaron cambios significativos en la cobertura vegetal del Área Nacional de Recreación Quimsacocha entre 1998, 2015 y 2024. Sin embargo, los resultados subrayan la necesidad de investigaciones futuras que examinen las causas de estas transformaciones, integrando variables como actividades humanas, políticas locales y dinámicas climáticas, para comprender de manera integral los factores que afectan la conservación y funcionalidad de este ecosistema clave. Entre algunas líneas de investigación para futuros estudios se destacan las siguientes:

- Se recomienda explorar otros índices de vegetación como el EVI y SAVI, para evaluar las limitaciones y ventajas del NDVI en el monitoreo de la cobertura vegetal. Comparar estos índices podría enriquecer la interpretación de los cambios y mejorar las metodologías de análisis de ecosistemas de páramo.
- Se sugiere investigar la relación entre los cambios detectados en la cobertura vegetal y factores antrópicos (minería, ganadería) y climáticos (variabilidad de temperatura y precipitación). Esto permitirá comprender de manera integral las dinámicas que afectan al páramo y generar bases para su manejo sostenible.
- Incorporar análisis que correlacionen las tendencias observadas con políticas públicas implementadas en el área, como planes de manejo, conservación y restauración. Esto servirá para evaluar su efectividad y proponer ajustes basados en evidencia científica.
- Con la finalidad de orientar la planificación y manejo del área, se podría evaluar el impacto de los cambios de la cobertura sobre la regulación hídrica, la captura de carbono, la biodiversidad y los servicios ecosistémicos esenciales del páramo.
- Ampliar las investigaciones para incluir factores socioeconómicos, como el uso del suelo y conflictos por recursos, combinados con variables ecológicas. Este enfoque permitirá desarrollar estrategias de gestión que equilibren las necesidades humanas con la conservación de ecosistemas.

## 7. REFERENCIAS

---

- Achicanoy, J. A., Rojas-Robles, R., & Sánchez, J. E. (2018). Análisis y proyección de las coberturas vegetales mediante el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica en la localidad de Suba, Bogotá-Colombia. *Gestión y Ambiente*, 21(1), 41-58. <https://doi.org/10.15446/ga.v21n1.68285>
- Aguilar, C. G. (2015). Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales para análisis de coberturas vegetales en la provincia de Loja, Ecuador. *CEDAMAZ*, 5(1), Article 1. <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz/article/view/43>
- Alarcón H., J. C., & Pabón C., J. D. (2013). El Cambio Climático y la Distribución Espacial de las Formaciones Vegetales en Colombia. *Colombia Forestal*, 16(2), 171-185.
- Anzoategui, L. V., Gil-Leguizamón, P. A., & Sanabria-Marin, R. (2023). Frontera agrícola y multitemporalidad de cobertura vegetal en Páramo del Parque Regional Natural Cortadera (Boyacá, Colombia). *Bosque (Valdivia)*, 44(1), 159-170. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002023000100159>
- Arce, B. G. G., Hernández, J. C. M., Martínez, O. F., Olivas, M. L. B., & González, F. M. C. (2022). Cambio de cobertura vegetal y uso de suelo generado por actividades agrícolas en el municipio de Bahía de Banderas, Nayarit, México. *Acta universitaria*, 32, 1-18.
- Armenteras, D., González, T. M., Vargas Ríos, O., Meza Elizalde, M. C., Oliveras, I., Armenteras, D., González, T. M., Vargas Ríos, O., Meza Elizalde, M. C., & Oliveras, I. (2020). Incendios en ecosistemas del norte de Suramérica: Avances

- en la ecología del fuego tropical en Colombia, Ecuador y Perú. *Caldasia*, 42(1), 1-16. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v42n1.77353>
- Ayala, L., Villa, M., Mendoza, Z. A., & Mendoza, N. A. (2014). Cuantificación del carbono en los páramos del parque nacional Yasuni, provincias de Loja y Zamora Chinchipe, Ecuador. *CEDAMAZ*, 4(1), Article 1. <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz/article/view/237>
- Barrero M, H., Vistín, D., Bastidas, H., Muñoz, E., Zárate, Y., & Guerra, D. (2022). Dinámica de cambio de uso de suelo del sector Guangras en el Parque Nacional Sangay, Ecuador. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 10(1), 44-58.
- Bonilla V, D. M., & Taípe Q, J. M. (2021). *Análisis multitemporal de la cobertura vegetal a partir de la imagen satelital SENTINEL-2 y LANDSAT-8 mediante el uso de algoritmos de clasificación, en la Reserva Ecológica El Ángel y Reserva Ecológica Arenillas* [Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/20884/1/UPS%20-%20TTS499.pdf>
- Bravo M., N. (2017). *Teledetección Espacial Landsat, Sentinel-2, Aster L1T y MODIS* (Primera). Copyright ©. [https://acolita.com/wp-content/uploads/2018/01/Teledeteccion\\_espacial\\_ArcGeek.pdf](https://acolita.com/wp-content/uploads/2018/01/Teledeteccion_espacial_ArcGeek.pdf)
- Buytaert, W., Célleri, R., Bièvre, B. D., & Cisneros, F. (2014). *HIDROLOGÍA DEL PÁRAMO ANDINO*:
- Camacho López, C. O., Carrión Paqui, N. S., & Jaramillo Villa, A. F. (2021). Análisis multitemporal de la deforestación y cambio de la cobertura del suelo en Zamora Chinchipe. *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional*, 6(11), 1228-1241.

- Camacho S, J. M., Pérez, J. I. J., Jaimes, N. B. P., Vargas, E. G. C., & Peña, L. C. B. (2015). Transición Mexicana de Montaña. *Madera y Bosques*, 21(1), 93-112.
- Camacho-López, C. O., Jara-Franco, N. E., & González-Rivadeneira, J. L. (2022). *Multi-temporal analysis of deforestation and land cover change in Morona Santiago*. 7(1).
- Caranqui Aldaz, J. M., Lara Vasconez, N. X., Cushquicullma Colcha, D. F., Espinoza, V. M., & Ati Cutiupala, G. M. (2021). Caracterización florística en zonas con alto potencial de recarga hídrica del paramo de Ichubamba Yasepan. *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional*, 6(9), 605-624.
- Cargua, F. E., Rodríguez, M. V., Recalde, C. G., & Vinueza, L. M. (2014). Cuantificación del Contenido de Carbono en una Plantación de Pino Insigne (*Pinus radiata*) y en Estrato de Páramo de Ozogoché Bajo, Parque Nacional Sangay, Ecuador. *Información tecnológica*, 25(3), 83-92. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000300011>
- Cartaya, S., Zurita, S., Ríos, E., & Montalvo, V. (2014). Comparación de técnicas para determinar cobertura vegetal y usos de la tierra en áreas de interés ecológico, Manabí, Ecuador. *UD y la geomática*, 9, Article 9. <https://doi.org/10.14483/23448407.7883>
- Célleri Alvear, R., Bièvre, B. D., & Iñiguez, V. (2005). *Efectos de la cobertura vegetal en la regulación hidrológica de microcuencas de páramo*.
- CEPAL. (2021). *La pérdida de los bosques de América Latina y el Caribe 1990–2020: Evidencia estadística*. Temas estadísticos de la CEPAL. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/550dd2bf-8340-4bab-a313-742800b802fe/content>

- Cervantes, R., Sánchez, J. M., Alegre, J., Rendón, E., Baiker, J. R., Locatelli, B., Bonnesoeur, V., Cervantes, R., Sánchez, J. M., Alegre, J., Rendón, E., Baiker, J. R., Locatelli, B., & Bonnesoeur, V. (2021). Contribución de los ecosistemas altoandinos en la provisión del servicio ecosistémico de regulación hídrica. *Ecología Aplicada*, 20(2), 137-146. <https://doi.org/10.21704/rea.v20i2.1804>
- Cleef, A. M. (2013). *Aporte a la misión de los jardines botánicos de Colombia frente al cambio climático*4.
- Código Orgánico del Ambiente (2018). <https://www.ambiente.gob.ec/codigo-organico-del-ambiente-coa/>
- Colazo, J. C., Scherger, E., Torregrosa, R., Álvarez, C., & Almirón, S. (2023). Riesgo de erosión eólica en diferentes sistemas productivos del sur de Córdoba. *Ciencia del suelo*, 41(2), 213-222.
- Coleman, J. (2022). *Landsat cumple 50 años observando la Tierra desde el espacio—NASA Ciencia*. NASA. <https://ciencia.nasa.gov/ciencias-terrestres/landsat-cumple-medio-siglo-observando-la-tierra-desde-el-espacio/>
- Congedo, L. (2017). Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. *Journal of Open Source Software*. <https://semiautomaticclassificationmanual-v5.readthedocs.io/es/latest/#>
- Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172. <https://doi.org/10.21105/joss.03172>
- Constitución de la República del Ecuador, 219 (2008). <https://www.lexis.com.ec/biblioteca/constitucion-republica-ecuador>

Coronel, R. M. (2022). *Análisis multitemporal de la cobertura vegetal y uso del suelo en el área de influencia de la carretera Gualaceo—Plan de Milagro en el periodo 2013-2020 para la definición de zonas prioritarias de restauración ecológica* [Universidad Politécnica Salesiana].

<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24029>

Cortes Leon, Y. G., & Hernandez Martin, J. A. (2021). *Análisis multitemporal de la variación en la cobertura vegetal en el municipio de tenjo, Cundinamarca (2013-2020)*.

<https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/handle/20.500.12558/3757>

Cortes Vargas, J. C., & Rubio Zafra, D. M. (2017). *Comportamiento espacial de la cobertura vegetal del Municipio de Chía, Cundinamarca entre los años 1980-2012 y su relación con la conectividad ecológica del territorio* [Maestría, Univeridad de Manizales].

<https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/2881>

Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. (2020). *Landsat 8-9 Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor Level-1, Collection 2* [Other]. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.5066/P975CC9B>

Escandón, J., Ordóñez, J. A. B., Nieto, M. C. del C., & Ordóñez, M. de J. (2018). Cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo del 2000 al 2009 en Morelos, México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(46), 27-53.

<https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.135>

Espinel Ortiz, D., Muriel, P., Romoleroux, C., Romoleroux, K., Sklenář, P., & Ulloa, C.

(2023). *La flora de los páramos ecuatorianos: Orígenes, diversidad y endemismo* (pp. 104-123). <https://doi.org/10.18272/usfqpress.71.c260>

Estrada Zúñiga, A. C., La Torre Auccasi, F. A., Mendoza Pacheco, G. J., Ttito Nina, J. W., Ollachica Valverde, M., & Palomino Villa, T. (2024). Uso de Google Earth Engine para la estimación y variación de la cobertura vegetal del bosque amazónico generada por la actividad antropica en Huepetuhe periodo 2016 al 2022.

*Revista de Investigaciones Altoandinas*, 26(2), 79-85.

<https://doi.org/10.18271/ria.2024.579>

FAO. (2020). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020*. FAO.

<https://doi.org/10.4060/ca8753es>

Farfán, M. A., Forero, S. M., & Avellaneda-Torres, L. M. (2020). Evaluation of impacts of potato crops and livestock farming in Neotropical high Andean Páramo soils, Colombia. *Acta Agronómica*, 69(2), 106-116.

<https://doi.org/10.15446/acag.v69n2.82206>

Farley, K. (2008). *Plantaciones forestales y producción de servicios ambientales* (segunda edición). Abya Yala.

<https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/43344.pdf><https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/43344.pdf>

Farnum, F., & Murillo, V. (2019). Análisis multitemporal (1970-2017) del uso del suelo en cinco comunidades ubicadas a lo largo de la carretera Boyd Roosevelt, Panamá. *Tecnociencia*, 21(2), Article 2.

Figueredo F, J. L., Ramón P, A. M., & Barrero M, H. (2020). Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal en el área de manejo «Los Números» Guisa, Granma. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*. 2020; enero-abril 8(1): 1-15.

Flórez-Yepes, G. Y., Rincon-Santamaría, A., Cardona, P. S., & Alzate-Alvarez, A. M.

(2017). Análisis multitemporal de las coberturas vegetales en el área de

influencia de las minas de oro ubicadas en la parte alta del sector de Maltería en Manizales, Colombia. *DYNA*, 84(201), 95-101.

<https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.55759>

García C., C. L., & Hachi P., M. X. (2022). Análisis multitemporal de la dinámica de uso de suelo y cobertura vegetal en la microcuenca del Río Illangama. *Revista de Investigación Talentos*, 9(2), Article 2.

<https://doi.org/10.33789/talentos.9.2.173>

Gómez, S., Pino Vargas, E., Huayna, G., Espinoza Molina, J., Acosta Caipa, K., & Cabrera Olivera, F. (2024). Machine Learning para la Clasificación y Análisis de los Índices de Biomasa y su relación con el Cambio Climático, Desierto de Atacama. *Manglar*, 21(1), 95-106. <https://doi.org/10.57188/manglar.2024.010>

Hernández Moreno, M. M., Téllez Valdés, O., Martínez-Meyer, E., Islas-Saldaña, L. A., Salazar-Rojas, V. M., & Macías-Cuéllar, H. (2021). Distribución de la cobertura vegetal y del uso del terreno del municipio de Zapotitlán, Puebla, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 92.

<https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2021.92.3649>

Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., Vásquez, A., & Cerra, M. (2014). *Los Páramos Andinos ¿Qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo*. UICN, Quito, Ecuador. [www.uicn.org/sur](http://www.uicn.org/sur)

INSIGMA, I., Geomática y Ambiente, ETAPA EP, & GAD Municipal de Cuenca. (2018). *Plan de Manejo del Área Nacional de Recreación Quimsacocha*. 106.

<https://www.ambiente.gob.ec/wp->

content/uploads/downloads/2018/03/ACUERDO-002-ANEXO-AREA-NACIONAL-DE-RECREACION-QUIMSACOAHA.pdf

Jacobo, J., Cuéllar, J., Guevara, H., & Cruz, scar. (2024). *Teledetección y automatización en la agricultura del futuro*. 133, 79-84.

Jadán, O., Cedillo, H., Pillacela, P., Guallpa, D., Gordillo, A., Zea, P., Díaz, L., Bermúdez, F., Arciniegas, A., Quizhpe, W., & Vaca, C. (2019). Regeneración de árboles en ecosistemas naturales y plantaciones de *Pinus patula* (Pinaceae) dentro de un gradiente altitudinal andino (Azuay, Ecuador). *Revista de Biología Tropical*, 67(1), 182-195. <https://doi.org/10.15517/rbt.v67i1.32940>

Jantz, N., & Behling, H. (2012). A Holocene environmental record reflecting vegetation, climate, and fire variability at the Páramo of Quimsacocha, southwestern Ecuadorian Andes. *Vegetation History and Archaeobotany*, 21(3), 169-185. <https://doi.org/10.1007/s00334-011-0327-x>

Labrador García, M., Brondo, J., & Arbelo, M. (2012). *Satélites de teledetección para la gestión del territorio*.

Landsat Missions. (2021). *Common Landsat Band Combinations | U.S. Geological Survey* [Sitio Oficial del Gobierno de los EE.UU.]. USGS.

<https://www.usgs.gov/media/images/common-landsat-band-combinations>

Lee, T. E., Jr, Tinoco, N., Crockett, S. C., Camacho, M. A., & Burneo, S. F. (2021). Report on the mammals of Quimsacocha National Recreation Area, Azuay Province, Ecuador. *Check List*, 17(1), Article 1. <https://doi.org/10.15560/17.1.125>

Llambí, L., Soto Werschitz, A., Célleri, R., De Bièvre, B., Ochoa-Tocachi, B., & Borja, P. (2012). *Ecología, Hidrología y Suelos del Páramo*.

[https://www.researchgate.net/publication/263280481\\_Ecologia\\_Hidrologia\\_y\\_Suelos\\_del\\_Paramo](https://www.researchgate.net/publication/263280481_Ecologia_Hidrologia_y_Suelos_del_Paramo)

López-Giraldo, A.-T., Ríos-Pulgarín, M.-I., Gil-Guarín, I.-C., López-Giraldo, A.-T., Ríos-Pulgarín, M.-I., & Gil-Guarín, I.-C. (2023). Características del hábitat que regulan la estructura de las comunidades de macroinvertebrados en ríos tropicales de montaña (Antioquía, Colombia). *Revista de Biología Tropical*, 71(1).

<https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop..v71i1.52093>

MAATE. (2013). *Sistema de Clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental*.

Ministerio del Ambiente, agua y Transición Ecológica. Subsecretaría de Patrimonio, Quito. [https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/09/LEYENDA-ECOSISTEMAS\\_ECUADOR\\_2.pdf](https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/09/LEYENDA-ECOSISTEMAS_ECUADOR_2.pdf)

MAATE. (2015a). *Área Nacional de Recreación Quimsacocha | Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador*. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. <http://areasprotegidas.ambiente.gob.ec/areas-protegidas/%C3%A1rea-nacional-de-recreaci%C3%B3n-quimsacocha>

MAATE. (2015b). *Categorías de Manejo | Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador*. Sistema Nacional de Áreas Protegidas. <http://areasprotegidas.ambiente.gob.ec/es/content/categor%C3%ADas-de-manejo>

MAATE. (2018). *Estadísticas del patrimonio natural del Ecuador Continental*.

<https://sinias.ambiente.gob.ec/proyecto-sinias-web/informacionIndicadores.jsf?menuid=18&menu=01&faces-redirect=true>

- MAG. (2021). *Metodología unificada, Cobertura y uso de la tierra y Sistemas productivos agropecuarios, Escala 1:25.000, 2020*. Ministerio de Agricultura y Ganadería. <https://online.fliphtml5.com/wtae/gwtg/#p=41>
- Mamani-Vargas, A. J. P. M., & Román-Arce, C. R. (2021). Índice de vegetación y cambio climático: Una evaluación multitemporal de imágenes Landsat en la laguna Pucarani en el periodo 1972 al 2018. *INGENIERÍA INVESTIGA*, 3(2), Article 2. <https://doi.org/10.47796/ing.v3i2.535>
- Mena Vásconez, P., Castillo, A., Flores, S., Hofstede, R., Josse, C., Lasso, S., Medina, G., Ochoa, N., & Ortiz, D. (Eds.). (2011). *Páramo: Paisaje estudiado, habitado, manejado e institucionalizado ; selección de textos de la Serie Páramo, órgano de difusión del Grupo de Trabajo en Páramos del Ecuador (GTP)*. Ed. Univ. Abya-Yala [u.a.].
- Morales B., J. A., & Estévez V., J. V. (2006). El páramo: ¿ecosistema en vía de extinción? *Luna Azul*, 22, Article 22.
- Morbeck, A. K., & Vilhema, R. (2022). Análise multitemporal da cobertura vegetal na Bacia Hidrográfica do Córrego Ceroula, Mato Grosso do Sul. *Interações (Campo Grande)*, 997-1011. <https://doi.org/10.20435/inter.v23i4.3023>
- Mosquera, G. M., Marín, F., Stern, M., Bonnesoeur, V., Ochoa-Tocachi, B. F., Román-Dañobeytia, F., & Crespo, P. (2022). Progress in understanding the hydrology of high-elevation Andean grasslands under changing land use. *Science of The Total Environment*, 804, 150112. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150112>
- Osuna-Osuna, A. K., Díaz-Torres, J. D. J., Anda-Sánchez, J. D., Villegas-García, E., Gallardo-Valdez, J., & Davila-Vazquez, G. (2015). Evaluación de cambio de cobertura vegetal y uso de suelo en la cuenca del río Tecolutla, Veracruz,

México; periodo 1994-2010. *Revista Ambiente & Agua*, 10, 350-362.

<https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1539>

Paula, P. A., Zambrano, L., & Paula, P. (2018). Análisis Multitemporal de los cambios de la vegetación, en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo como consecuencia del cambio climático. *Enfoque UTE*, 9(2), 125-137.

Peñaloza-Miranda, L. K., Carvajal-S, F. A., & Hernández-Pérez, N. J. (2020). Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal de la microcuenca El Volcán a partir de la compra de áreas estratégicas. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.24054/aaas.v11i1.381>

Pinta E, M. F., Velasteguí C, J. D., Noboa S, V. F., Lara V, N. X., & Cushquicullma C, D. F. (2021). Análisis Multitemporal de la Cobertura Vegetal de la Subcuenca del Río Chambo Durante el Periodo 2015 A 2020. *Polo del Conocimiento*, 6(12), Article 12. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i12.3376>

Posada, E., Ramírez, H., & Espejo, N. (2012). Manual de prácticas de percepción remota con el programa ERDAS IMAGINE 2011. *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*. [https://un-spider.org/sites/default/files/ManualERDAS\\_web.pdf](https://un-spider.org/sites/default/files/ManualERDAS_web.pdf)

Poveda-Sotelo, Y., Bermúdez-Cella, M. A., & Gil-Leguizamón, P. (2022). Evaluación de métodos de clasificación supervisada para la estimación de cambios espacio-temporales de cobertura en los páramos de Merchán y Telecom, Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín de Geología*, 44(2), 51-72. <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n2-2022002>

Quezada, A. S., Sevilla, J. D., & Avilés, E. C. (2022). *Estimación de la tasa de deforestación en Pastaza y Orellana- Ecuador mediante el análisis*

*multitemporal de imágenes satelitales durante el período 2000-2020.*

<http://repositorio.cidecuador.org/jspui/handle/123456789/2112>

Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., & Célleri, R. (2012).

*Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: Páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador.*

Quillupangui, D. I. (2023). *Análisis multitemporal de la cobertura vegetal del páramo de la comunidad Salamalag Chico de la parroquia Guangaje, provincia de Cotopaxi 2014-2022* [Universidad Técnica de Cotopaxi].

<https://dspace.utc.edu.ec/handle/27000/11442>

Radeloff, V. C., Roy, D. P., Wulder, M. A., Anderson, M., Cook, B., Crawford, C. J., Friedl,

M., Gao, F., Gorelick, N., Hansen, M., Healey, S., Hostert, P., Hulley, G.,

Huntington, J. L., Johnson, D. M., Neigh, C., Lyapustin, A., Lymburner, L.,

Pahlevan, N., ... Zhu, Z. (2024). Need and vision for global medium-resolution

Landsat and Sentinel-2 data products. *Remote Sensing of Environment*, 300,

113918. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113918>

Regalado, M. D. C. (2018). *DETERMINACIÓN DE LA FIRMA ESPECTRAL DEL ESTRATO*

*HERBAZAL - ARBUSTAL DEL PÁRAMO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CHAMBO,*

*PROVINCIA DE CHIMBORAZO* [ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE

CHIMBORAZO].

<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/8767/1/33T0189.pdf>

Reyes Rodríguez, C. F., Rosas Chavoya, M., López Serrano, P. M., Prieto Ruiz, J. Á.,

Hinojosa Espinoza, F., & Vega Nieva, D. J. (2024). Análisis de la temperatura

superficial en las áreas verdes de la ciudad de Durango, Durango. *Revista*

*mexicana de ciencias forestales*, 15(81), 83-109.

<https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i81.1432>

Romo R., M. G., & Calero R., E. (2022). Degradación de la vegetación de páramo por efecto de la ganadería en el Parque Nacional Llanganates, Ecuador. *Revista Verde de Agroecología e Desenvolvimento Sustentável*, 17(1), 27-34.

Salto Fernández, N. B., Flores De la Torre, J. L., Salto Fernández, N. B., & Flores De la Torre, J. L. (2024). Análisis de los recursos naturales y prácticas campesinas en ecosistemas de altura. Caso de estudio: Comunidad Cochapata en Urcuquí-Ecuador. *Siembra*, 11(1). <https://doi.org/10.29166/siembra.v11i1.4486>

Santos P., J. M. (2020). *SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA*. Editorial UNED.

Segura Madrigal, M. A., Andrade Castañeda, H. J., & Mojica Sánchez, C. A. (2019). Estructura, composición florística y almacenamiento de carbono en bosques nativos del páramo de Anaime, Tolima, Colombia. *Ciência Florestal*, 29, 157-168. <https://doi.org/10.5902/1980509826551>

Suqui, A., Célleri, R., Crespo, P., & Carrillo-Rojas, G. (2021). Interacciones entre índice de área foliar, densidad del dosel y precipitación efectiva de un bosque de *Polylepis reticulata* ubicado en un ecosistema de páramo. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 34(2), 63-79. <https://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.04>

Tillaguango Pintado, J., Muñoz-Chamba, L., Muñoz, J., & Aguirre, Z. (2023).

Caracterización poblacional de *Pteridium arachnoideum* (Kaulf.) Maxon y su vegetación asociada al páramo antrópico del sur del Ecuador. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 20(47), 16-25.

<https://doi.org/10.18845/rfmk.v20i47.6820>

Torres Celi, J. I. (2014). *Diseño de un modelo de restauración ecológica aplicable a los ecosistemas de páramos degradados en el Ecuador* [Universidad Nacional de Loja]. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/12183>

USGS. (s. f.). *Cuáles son las mejores bandas espectrales de Landsat para usar en mi investigación? - UU. Estudio geológico*. Recuperado 9 de septiembre de 2024, de <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-best-landsat-spectral-bands-use-my-research>

USGS. (2020). *Landsat Collection 2 Level-1 Data*. USGS Landsat Missions. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-1-data>

Vasco Lucio, M., Cushquicullma Colcha, D., Ati, G., & Orna Puente, L. M. (2023). Monitoreo de la vegetación del páramo mediante la intersección de los índices NDVI y EVI de la microcuenca del río Cebadas, provincia de Chimborazo, periodo 2021. *Revista Científica Dominio de las Ciencias*, 9(4), 988-1006.

Vela Pelaez, A. A., Navarro Martínez, M. A., Mendoza Briseño, M. A., Sánchez Sánchez, J. A., & Esparza Olgún, L. G. (2024). Análisis multitemporal de cambios en el NDVI en una región con aprovechamiento forestal en la península de Yucatán, México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 15(81), 160-186. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i81.1425>

Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., & López-Morales, F. (2020). Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. *Idesia (Arica)*, 38(4), 99-107. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292020000400099>

---

Yarce, J. D. G., & Moncayo, D. F. G. (2024). Composición y estructura de la cobertura vegetal del ecosistema del páramo de Bordoncillo en Santiago, Putumayo. *Revista Criterios*, 31(1), Article 1. <https://doi.org/10.31948/rc.v31i1.3485>