



**Evaluación de la pérdida del espejo de agua de las lagunas Caricocha, Chiriyacu y Huarmicocha mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales en el período de 2000 a 2020 y propiedades físico-químicos de aguas y sedimentos para el manejo adecuado del recurso hídrico.**

Albán Mendoza, Denise Gabriela y Quilumba Pérez, Marilyn Sofía

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniera Geógrafa y del Medio Ambiente

Ing. Guevara García, Paulina Valeria, PhD.

23 de diciembre del 2021



### Document Information

Analyzed document	Tesis_Alban_Quilumba.docx (D122325041)
Submitted	2021-12-14T03:31:00.0000000
Submitted by	COOD
Submitter email	process.complete@edu.ec
Similarity	2%
Analysis address	admin@analysis.urkund.com



PAULINA VALERIA  
GUEVARA GARCIA

### Sources included in the report

<b>W</b>	URL: <a href="http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/13140/1/T-UCE-0012-38.pdf">http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/13140/1/T-UCE-0012-38.pdf</a> Fetched: 2021-12-14T03:31:39.4700000		11
<b>W</b>	URL: <a href="https://docplayer.es/84071821-Manejo-adaptativo-de-riesgos-y-vulnerabilidad-en-la-zona-lacustre-de-mojanda.html">https://docplayer.es/84071821-Manejo-adaptativo-de-riesgos-y-vulnerabilidad-en-la-zona-lacustre-de-mojanda.html</a> Fetched: 2019-10-29T22:13:13.1700000		4
<b>W</b>	URL: <a href="https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/5781/1/Ruiz%2C%20S-CON-002-Manejo.pdf">https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/5781/1/Ruiz%2C%20S-CON-002-Manejo.pdf</a> Fetched: 2021-08-10T16:51:01.5830000		2
<b>SA</b>	<b>TESIS_Klever Ordóñez.docx</b> Document TESIS_Klever Ordóñez.docx (D49558330)		2
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.goraymi.com/es-ec/pichincha/pedro-moncayo/lagunas/lagunas-mojanda-a933b37f9">https://www.goraymi.com/es-ec/pichincha/pedro-moncayo/lagunas/lagunas-mojanda-a933b37f9</a> Fetched: 2020-07-31T06:25:11.7870000		2
<b>SA</b>	<b>ANALISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO..1.docx</b> Document ANALISIS MULTITEMPORAL DE CAMBIO DE USO DE SUELO..1.docx (D34591439)		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://docs.qgis.org/3.10/es/docs/user_manual/processing_algs/gdal/rasteranalysis.html#gdal_fillnodataRam">https://docs.qgis.org/3.10/es/docs/user_manual/processing_algs/gdal/rasteranalysis.html#gdal_fillnodataRam</a> Fetched: 2021-12-14T03:32:00.0000000		1
<b>SA</b>	<b>JosePichazaca.docx</b> Document JosePichazaca.docx (D104761207)		1
<b>W</b>	URL: <a href="http://edafologia.ugr.es/introeda/tema01/procesp2.htm#:~:text=Se">http://edafologia.ugr.es/introeda/tema01/procesp2.htm#:~:text=Se</a> Fetched: 2021-12-14T03:32:00.0000000		4
<b>SA</b>	<b>Martha Romero.docx</b> Document Martha Romero.docx (D48654805)		1
<b>SA</b>	<b>INGRID_CHOEZ_DOCUMENTO_URKUND.docx</b> Document INGRID_CHOEZ_DOCUMENTO_URKUND.docx (D40818898)		2



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

### Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, **“Evaluación de la pérdida del espejo de agua de las lagunas Caricocha, Chiriyacu y Huarmicocha mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales en el período de 2000 a 2020 y propiedades físico-químicos de aguas y sedimentos para el manejo adecuado del recurso hídrico”** fue realizado por las señoritas Albán Mendoza, Denise Gabriela y Quilumba Pérez, Marilyn Sofía el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 23 de diciembre de 2021

Firma:



Paulina Valeria Guevara García  
PAULINA VALERIA  
GUEVARA GARCIA

Ing. Guevara García, Paulina Valeria, PhD.

C.C.: 1712021110



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

#### Responsabilidad de Auditoría

Nosotras, **Albán Mendoza, Denise Gabriela y Quilumba Pérez, Marilyn Sofía**, con cédulas de ciudadanía N° 1726265422 y N° 1726271578 , declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Evaluación de la pérdida del espejo de agua de las lagunas Caricocha, Chiriyacu y Huarmicocha mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales en el período de 2000 a 2020 y propiedades físico-químicos de aguas y sedimentos para el manejo adecuado del recurso hídrico”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 23 de diciembre de 2021

Firma:

**Albán Mendoza, Denise Gabriela**

Firma:

**Quilumba Pérez, Marilyn Sofía**



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

#### Autorización de Publicación

Nosotras **Albán Mendoza, Denise Gabriela y Quilumba Pérez, Marilyn Sofia**, con cédulas de ciudadanía N° 1726265422 y N° 1726271578, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: : **“Evaluación de la pérdida del espejo de agua de las lagunas Caricocha, Chiriyacu y Huarmicocha mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales en el período de 2000 a 2020 y propiedades físico-químicos de aguas y sedimentos para el manejo adecuado del recurso hídrico”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 23 de diciembre de 2021

Firma:

**Albán Mendoza, Denise Gabriela**

C.C.: 1726265422

Firma:

**Quilumba Pérez, Marilyn Sofia**

C.C.: 1726271578

### **Dedicatoria**

A mis padres, Aníbal y Doris, quienes me han dado su amor, apoyo y confianza.  
A mi abuelita Mérida, por darme su infinito amor.

*Denise Albán*

A mis padres quienes me enseñaron que, con constancia, perseverancia,  
esfuerzo y sacrificio se logran todas las metas propuestas.

*Sofía Quilumba*

## Agradecimiento

Agradezco primero a Dios por ser esa luz divina que ilumina mi camino, que me ha brindado la fortaleza para cumplir con este objetivo.

A mis padres que supieron guiarme con su cariño, consejos y enseñanzas, gracias por todo el esfuerzo que han puesto para darme una buena educación, este logro no hubiera sido posible sin ustedes.

A mi familia, por siempre compartir mi felicidad y en especial a mi abuelita por siempre confiar en mí y estar presente cuando más la necesito.

A Julián, por ser quien me impulsa a ser mejor cada día, por darme su amor y apoyo incondicional.

A mis compañeros y amigos con los cuales compartimos momentos de alegría que hicieron de esta etapa inolvidable.

Al Club de Taekwondo ESPE y al maestro Eduardo Loachamin, por permitirme desarrollar no solo como estudiante, sino también como deportista. Esa fue una experiencia que lleno mi alma y me hizo vivir la etapa universitaria más extraordinaria.

A los ingenieros Paulina Guevara y Oswaldo Padilla, por su tiempo, conocimiento y ser nuestra guía en este proyecto.

A todos los docentes que me brindaron sus conocimientos, y que ahora son la base para hacer de mí una buena profesional.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, mi segundo hogar, la llevare para siempre en mi corazón.

*Denise Albán*

### **Agradecimiento**

En primer lugar, a Dios y a la Virgen Santísima por haberme dado la sabiduría y fortaleza para no rendirme en medio del camino y poder culminar mi vida universitaria

A mis padres por el apoyo incondicional en esta etapa de mi vida, por su esfuerzo, dedicación y su entera confianza que se ven reflejados en la culminación de mi proyecto de grado.

A toda mi familia quienes han estado en todo momento con una palabra de aliento cuando más lo he necesitado y por estar presentes en cada uno de mis logros.

A Diego, quien ha sido un apoyo fundamental en todo este trayecto, por saber escucharme y darme esa voz de aliento, gracias por tu amor infinito y apoyo incondicional.

A mis amigas por hacer de este viaje tan gratificante y emocionante, gracias por todos los recuerdos infinitos y carcajadas compartidas.

De manera muy especial a los ingenieros Paulina Guevara y Oswaldo Padilla por toda su ayuda prestada, sus conocimientos, su paciencia y su gran don de docentes.

Finalmente, a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE por contar con el mejor equipo de educadores, quienes comparten sus amplios conocimientos y experiencias, contribuyendo de esta manera a la formación de profesionales exitosos.

*Sofía Quilumba*



## Tabla de contenido

Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Resumen .....	16
Abstract.....	17
Capítulo I .....	18
Generalidades.....	18
Antecedentes.....	18
Planteamiento del problema .....	20
Justificación e importancia .....	21
Objetivos.....	23
Objetivo General.....	23
Objetivos específicos .....	23
Descripción del área de estudio.....	24
Capítulo II .....	27
Marco teórico .....	27
Cambio Climático .....	27
Análisis Multitemporal.....	28
Teledetección.....	28
Matriz de confusión .....	36
Unidad Mínima de Mapeo .....	36
Análisis y cuantificación de los cambios .....	37
Variables Meteorológicas .....	38
Precipitación .....	38
Temperatura .....	39
Evapotranspiración .....	39
Humedad relativa.....	41
Interfaz de Google Earth para datos de temperatura terrestre CRUTEM4 .....	41
Modelo de Predicción .....	43
Autómatas Celulares.....	43
Cadenas de Márkov .....	44
Parámetros físico-químicos del agua y sedimentos.....	45
Potencial de Hidrogeno (pH).....	46

Conductividad Eléctrica (CE) .....	47
Sólidos Disueltos Totales (TDS) .....	48
Oxígeno Disuelto (OD) .....	48
Temperatura (T) .....	49
Nitratos .....	49
Sulfatos .....	50
Fosfatos .....	50
Textura del suelo .....	51
Materia Orgánica (MO) .....	51
Carbono Orgánico Total (COT) .....	52
Condiciones geoquímicas de los sedimentos en espacio-tiempo .....	52
Hierro (Fe) y Manganeso (Mn) .....	53
Capítulo III .....	56
Metodología .....	56
Análisis Multitemporal de la reducción del espejo de agua .....	56
Recolección de Imágenes Satelitales .....	56
Escala de Trabajo y Unidad Mínima de Mapeo .....	57
Preprocesamiento de las imágenes satelitales .....	59
Cálculo del Índice Diferencial de Agua Normalizado NDWI .....	60
Clasificación de las imágenes .....	60
Obtención de superficies de coberturas de agua y matriz de cambios .....	63
Análisis multitemporal de las variables meteorológicas .....	63
Modelo de Predicción con Cadenas de Márkov .....	68
Simulación del modelo con Cadenas de Márkov .....	69
Validación del Modelo .....	69
Proyección de la pérdida del espejo de agua al año 2030 .....	70
Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de agua y sedimentos .....	71
Recolección de muestras .....	71
Análisis de los parámetros físico químicos .....	74
Análisis estadístico entre las propiedades fisicoquímicas .....	77
Capítulo IV .....	78
Resultados .....	78

Resultados del análisis multitemporal de la reducción del espejo de agua .....	78
Cálculo del Índice Diferencial de Agua Normalizado NDWI.....	78
Validación de la clasificación.....	79
Obtención de superficies de coberturas de agua y matriz de cambios.....	79
Análisis multitemporal de las variables meteorológicas .....	88
Resultados del modelo de predicción con Cadenas de Márkov .....	91
Resultados de la generación de áreas de transición.....	91
Resultado de la validación del modelo de predicción .....	93
Resultados de la proyección de la pérdida del espejo de agua al año 2030 .....	93
Resultados de la caracterización de las propiedades fisicoquímicas de agua y sedimentos ....	95
Parámetros físico químicos del agua .....	95
Parámetros físico químicos de los sedimentos.....	99
Análisis estadístico entre las propiedades fisicoquímicas .....	102
Capitulo V.....	106
Conclusiones y Recomendaciones .....	106
Conclusiones .....	106
Recomendaciones.....	109
Referencias Bibliográficas .....	110

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Valoraciones del Índice Kappa</i> .....	35
<b>Tabla 2</b> <i>Calidad de agua en función de la conductividad</i> .....	48
<b>Tabla 3</b> <i>Rangos de concentración de oxígeno disuelto y condiciones ecosistémicas frecuentes</i> ...	49
<b>Tabla 4</b> <i>Clasificación del porcentaje de materia orgánica en el suelo</i> .....	51
<b>Tabla 5</b> <i>Características de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI</i> .....	56
<b>Tabla 6</b> <i>Códigos de intersección</i> .....	62
<b>Tabla 7</b> <i>Matriz de confusión del año 2000</i> .....	63
<b>Tabla 8</b> <i>Resumen de análisis de consistencia de datos de Precipitación</i> .....	65
<b>Tabla 9</b> <i>Resumen de análisis de consistencia de datos de Temperatura</i> .....	66
<b>Tabla 10</b> <i>Resumen de análisis de consistencia de datos de Humedad relativa</i> .....	67
<b>Tabla 11</b> <i>Identificación y codificación de muestras de agua</i> .....	72
<b>Tabla 12</b> <i>Identificación y codificación de sedimentos</i> .....	73
<b>Tabla 13</b> <i>Metodología aplicada en el análisis de muestras de agua</i> .....	75
<b>Tabla 14</b> <i>Metodología aplicada en el análisis de muestras de sedimentos</i> .....	76
<b>Tabla 15</b> <i>Clasificación de los coeficientes de correlación</i> .....	77
<b>Tabla 16</b> <i>Valores de validación mediante el índice Kappa en el periodo de 2000 - 2020</i> .....	79
<b>Tabla 17</b> <i>Cambio ocurrido en el espejo de agua en los años 2000 - 2005</i> .....	84
<b>Tabla 18</b> <i>Cambio ocurrido en el espejo de agua en los años 2005 - 2010</i> .....	84
<b>Tabla 19</b> <i>Cambio ocurrido en el espejo de agua en los años 2010 - 2015</i> .....	85
<b>Tabla 20</b> <i>Cambio ocurrido en el espejo de agua en los años 2015 - 2020</i> .....	86
<b>Tabla 21</b> <i>Cambio ocurrido en el espejo de agua en los años 2000 - 2020</i> .....	86
<b>Tabla 22</b> <i>Matriz de probabilidad de transición del año 2015 al 2020</i> .....	92
<b>Tabla 23</b> <i>Matriz de probabilidad de transición del año 2015 al 2030</i> .....	92
<b>Tabla 24</b> <i>Cambio ocurrido en el espejo de agua en los años 2020 - 2030</i> .....	94
<b>Tabla 25</b> <i>Parámetros físico químico del agua medidos in-situ</i> .....	95
<b>Tabla 26</b> <i>Parámetros físico químicos del agua analizados en laboratorio</i> .....	97
<b>Tabla 27</b> <i>Parámetros físico químicos de sedimentos analizados en laboratorio de la Laguna Caricocha</i> .....	99
<b>Tabla 28</b> <i>Parámetros físico químicos de sedimentos analizados en laboratorio de la Laguna Huarmicocha</i> .....	100

<b>Tabla 29</b> <i>Parámetros físico químicos de sedimentos analizados en laboratorio de la laguna Chiriyacu</i> .....	100
<b>Tabla 30</b> <i>Reducción de agua del año 2000 al 2020</i> .....	102
<b>Tabla 31</b> <i>Coefficientes de correlación de Person - Laguna Caricocha</i> .....	103
<b>Tabla 32</b> <i>Coefficientes de correlación de Person- Laguna Huarmicocha</i> .....	103
<b>Tabla 33</b> <i>Coefficientes de correlación de Person - Laguna Chiriyacu</i> .....	104

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Ubicación del área de estudio</i> .....	25
<b>Figura 2</b> <i>Elementos que pueden ser identificados por Teledetección</i> .....	29
<b>Figura 3</b> <i>Espectro Electromagnético</i> .....	30
<b>Figura 4</b> <i>Clasificación de imágenes satelitales</i> .....	33
<b>Figura 5</b> <i>Descomposición de la materia orgánica en sedimentos en relación con las condiciones redox</i> .....	53
<b>Figura 6</b> <i>Regiones de estabilidad de las formas del Fe y Mn en función del Eh/pH</i> .....	54
<b>Figura 7</b> <i>Flujograma cartográfico para análisis multitemporal de la reducción del espejo de agua</i> .....	58
<b>Figura 8</b> <i>Corrección de bandeo</i> .....	59
<b>Figura 9</b> <i>Combinación de bandas 543 del satélite Landsat 7</i> .....	61
<b>Figura 10</b> <i>Polígonos de la combinación 543 del satélite Landsat 7 para el año 2000</i> .....	62
<b>Figura 11</b> <i>Flujograma cartográfico para generar modelo predictivo</i> .....	68
<b>Figura 12</b> <i>Flujograma cartográfico para generar proyección de pérdida de espejo de agua año 2030</i> .....	70
<b>Figura 13</b> <i>Puntos de muestreo para el análisis fisicoquímico de agua</i> .....	72
<b>Figura 14</b> <i>Puntos de muestreo para el análisis fisicoquímico de sedimentos</i> .....	74
<b>Figura 15</b> <i>Índice de Agua Normalizado NDWI de las Lagunas Caricocha, Huarmicocha y Chiriyacu</i> .....	78
<b>Figura 16</b> <i>Variación de la superficie de agua de la laguna Caricocha cada 5 años en el periodo del año 2000 al 2020</i> .....	80
<b>Figura 17</b> <i>Variación de la superficie de agua de la laguna Huarmicocha cada 5 años en el periodo del año 2000 al 2020</i> .....	81
<b>Figura 18</b> <i>Variación de la superficie de agua de la laguna Chiriyacu cada 5 años en el periodo del año 2000 al 2020</i> .....	82
<b>Figura 19</b> <i>Variación de la superficie de agua del sistema lacustre Mojanda (Laguna de Caricocha, Huarmicocha y Chiriyacu) en el periodo de 20 años.</i> .....	83
<b>Figura 20</b> <i>Variación multitemporal de las variables Precipitación y temperatura en el periodo 2000 – 2019</i> .....	88
<b>Figura 21</b> <i>Variación multitemporal de la variable Humedad Relativa en el periodo 2000 – 2019</i> .....	89
<b>Figura 22</b> <i>Variación multitemporal de la variable Evapotranspiración Potencial en el periodo 2000 – 2019</i> .....	90
<b>Figura 23</b> <i>Validación del modelo de predicción</i> .....	93

**Figura 24** *Predicción al año 2030 de la reducción del espejo de agua de las lagunas Caricocha, Chiriyacu y Huarmicocha. .... 94*

## Resumen

El cambio climático genera impactos sobre los ecosistemas, en especial en los de páramo, siendo afectada la disponibilidad de agua en las cuencas bajas en donde el agua es un recurso vital para los habitantes. Tal es el caso del sistema lacustre Mojanda, en donde se ha podido observar la variación de los cuerpos de agua. Es así como se planteó realizar un análisis multitemporal de las lagunas Caricocha, Chiriyacu y Huarmicocha mediante el uso de imágenes satelitales y variables meteorológicas en el periodo del año 2000 al 2020. Además de hacer la caracterización físico química de agua y sedimentos con el fin de evaluar la calidad del agua de las lagunas e identificar si existen procesos de reducción del espejo de agua. También se generó un modelo predictivo con Cadenas de Márkov para estimar la pérdida futura del área de las lagunas. Como resultados se obtuvo que en veinte años se evidencia la disminución de las superficies de las lagunas, siendo de 2.62% para la laguna Caricocha, 21.97% para Huarmicocha y de 36.21% para Chiriyacu. Mientras que la predicción para el año 2030 refleja una reducción del espejo de agua en las lagunas Caricocha con 1.03 % y Chiriyacu 0.60%, sin embargo, la laguna Huarmicocha aumenta 15.72%. Por otro lado, la caracterización fisicoquímica de agua muestra que las lagunas se encuentran dentro de los niveles de calidad de agua para riego, consumo humano y doméstico. Sin embargo, para preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces, marinas y de estuarios la laguna Chiriyacu no cumple con los límites permisibles de Fe. Con las concentraciones de Fe y Mn en los sedimentos, se determinó que en laguna Huarmicocha existe un proceso nuevo de reducción, mientras que en Caricocha pudo haber una pequeña reducción en el pasado y en la laguna Chiriyacu se presenta un proceso antiguo y nuevo de reducción, que al ser comparada con el análisis multitemporal presenta una reducción evidente de su espejo de agua.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **ANÁLISIS MULTITEMPORAL**
- **MODELO PREDICTIVO**
- **PROCESOS GEOQUÍMICOS**
- **LAGUNAS**



### **Abstract**

Climate change has impacts on ecosystems, especially in paramo, affecting the availability of water in low-lying basins where water is a vital resource for the inhabitants. This is the case of the Mojanda lake system, where it has been possible to observe the variation of the water bodies. Therefore, a multitemporal analysis of the Caricocha, Chiriyacu and Huarmicocha lagoons was proposed through the use of satellite images and meteorological variables in the period from the years 2000 to 2020. In addition of doing the physicochemical characterization of water and sediments in order to evaluate the water quality of the lagoons and identify if there are processes of reduction of the water mirror. A predictive model was also generated with "Markov Chains" to estimate the future loss of the lagoon area. As results, it was obtained that in twenty years, it will be evident the decrease of the areas of the lagoons, being of 2.62% for the lagoon Caricocha, 21.97% for Huarmicocha and 36.21% for Chiriyacu. While the forecast for 2030 reflects a reduction of the water mirror in the Caricocha lagoons with 1.03% and Chiriyacu 0.60%, however, the Huarmicocha lagoon increases 15.72%. On the other hand, the physicochemical characterization of the water, shows that the lagoons are within the water quality levels for irrigation, human and domestic consumption. Nevertheless, for the preservation of aquatic and wildlife in fresh, marine and estuarine waters, the Chiriyacu Lagoon does not accomplish with the permissible limits of *Fe*. With the concentrations of *Fe* and *Mn* in the sediments, it was determined that in Huarmicocha lagoon there is a new process of reduction, meanwhile in Caricocha there may have been a small reduction in the past, and in Chiriyacu lagoon there is an old and new process of reduction, which, when compared with multitemporal analysis, presents a clear reduction of its water mirror.

#### **KEYWORDS:**

- **MULTITEMPORAL ANALYSIS**
- **PREDICTIVE MODEL**
- **GEOCHEMICAL PROCESSES**
- **LAGOONS**

## Capítulo I

### Generalidades

#### Antecedentes

La crisis del cambio climático mundial está relacionada con el agua. La variabilidad del ciclo del agua aumenta debido al cambio climático, lo que provoca fenómenos meteorológicos extremos, reduce la capacidad de previsión de la disponibilidad de recursos hídricos, disminuye la calidad del agua y constituye una amenaza al desarrollo sostenible, la biodiversidad y el disfrute de los derechos humanos al agua potable y el saneamiento en todo el mundo (ONU, 2019).

Dentro de los recursos hídricos se encuentran las lagunas, las cuales tienen relación con los paisajes de alta montaña que son sistemas que evolucionan a escalas geológicas que los seres humanos no alcanzan a percibir (Galleguillos A.-Schübelin & Ojeda Leal, 2016).

Las dinámicas físicas de estos paisajes están influenciadas tanto por las paleocondiciones al interior de la cuenca de drenaje (Syvitski, 2003) como por las perturbaciones de los seres humanos durante el Antropoceno, es decir, durante la era en que la civilización humana podría afectar de manera fundamental el clima planetario con consecuencias a posteriori que aún no son completamente conocidas (De la Cuadra, 2013). Estas alteraciones comprometen los servicios de los ecosistemas de agua dulce, generando erosión que reduce la productividad del suelo cercano a sus cauces e impulsa cambios ecológicos en los ecosistemas acuáticos a lo largo de toda la cuenca (Restrepo et al., 2015).

En el Ecuador, una de las zonas que oferta una gran cantidad de bienes y servicios a las comunidades cercanas y además a las ciudades principales, es el Páramo. Éste es un ecosistema

frágil de alta montaña. Así mismo, los páramos son de vital importancia para la regulación del clima, ciclo hidrológico y el desarrollo económico, social y cultural de la población; además, tienen importancia biológica, y capacidad para almacenar y regular agua (Chuncho Morocho & Chuncho, 2019).

Los servicios ecosistémicos que brindan los páramos son importantes, sin embargo, pueden verse afectados debido a los efectos del cambio climático y, consecuencia de ello, el ciclo hidrológico y redistribución de los recursos hídricos (Parry et al., 2007).

Con relación al páramo, es un paisaje de alta montaña integrado por múltiples lagunas las cuales proporcionan servicios y ventajas a los seres humanos. Dentro de este servicio hídrico se encuentra el sistema lacustre Mojanda. El sistema lacustre de Mojanda se identifican seis lagunas, de las cuales dos son estacionarias y cuatro lagunas permanentes (Caricocha, Huarmicocha, Chiriyacu, Yanacocha), estas lagunas son de origen volcánico y ocupan el cráter del volcán extinto Mojanda. De las dos lagunas estacionarias una de ellas se encuentra totalmente seca y la segunda cuenta con agua en épocas de invierno de noviembre a mayo (Calderón, 2018).

Por otro lado, la erosión del suelo permite el escurrimiento de una gran cantidad de agua y el arrastre de sedimentos que pueden llegar a presas, ríos o lagunas, entre otros cuerpos de agua (SEMARNAT, 2012).

El cambio de cobertura vegetal y las malas prácticas agropecuarias han aumentado el flujo de materiales sólidos a los componentes del sistema hídrico de Mojanda, y otras causas que están conllevando a la sedimentación sobredimensionada que están relacionadas con la construcción de embalses o canales artificiales perpendiculares a los cursos de agua, alterando también la escorrentía superficial y contribuyendo a sedimentación o almacenamiento de los materiales sólidos en aguas estancadas. Así pues, el Gobierno Autónomo Descentralizado del

Municipio de Pedro Moncayo, en el año 2002, promovió la “Ordenanza bicantonal para la protección y conservación de la zona de Mojanda” entre los GAD municipales de Pedro Moncayo y Otavalo. Su objetivo es la conservación de 10 000 hectáreas en la parte superior del nudo de Mojanda – Cajas. (GADPP, 2017).

### **Planteamiento del problema**

El cambio climático es un problema que está afectando a todo el mundo y está ocasionando la pérdida de ecosistemas y sus recursos naturales, que son importantes para todos los seres vivos.

Los ecosistemas más frágiles a los cambios ocasionados por el cambio climático son los páramos por su alta sensibilidad ante cualquier alteración o daño ambiental, que pueden convertirse en irreversibles (Isch, 2012). Es así como los efectos del cambio climático ya se están manifestando en los páramos, en donde la disponibilidad de agua se está viendo afectada por la disminución en cantidad y calidad del recurso hídrico (GADPP, 2017).

Un ejemplo de esta problemática son las lagunas de Caricocha, Chiriyacu y Huarmicocha, que son parte del área de conservación de Mojanda. La laguna Chiriyacu está enfrentando la pérdida de su espejo de agua y contaminación, esto debido a un sobreuso de su vertiente y la disminución de lluvias (URKU-KAMAS, 2016) , al igual que las lagunas Caricocha y Huarmicocha, pero en menor proporción según la observación de imágenes satelitales.

El problema radica en que las lagunas son de gran importancia por los servicios ambientales que brindan como fuente de agua para riego y consumo humano de los principales centros urbanos del norte de la provincia de Pichincha, así como de parroquias del municipio de Otavalo en la provincia de Imbabura (GAD Municipal de Pedro Moncayo, 2018).

Por tanto, en caso de no realizar un análisis detallado tanto en el ámbito geográfico y ambiental de las lagunas, esto podría provocar que aumente la pérdida del espejo de agua, hasta el punto en que estos recursos entren en crisis o en su pérdida total.

### **Justificación e importancia**

La escasez de agua, los cambios en la intensidad de la precipitación y la variabilidad de eventos extremos están cobrando una importancia significativa. Como consecuencia del aumento de la temperatura del aire y cambios en la precipitación, el cambio climático está incrementando la competencia por el agua dulce y está afectando los procesos y regímenes hidrológicos, generando en algunos casos un mayor flujo de contaminantes y sedimentos en lagos, lagunas y ríos, degradación de la calidad del agua, alteración de la velocidad de los procesos biogeoquímicos y reducción de la concentración de oxígeno disuelto (M. García et al., 2007).

El cambio de temperatura debido al calentamiento global ha afectado a grandes alturas más que a las tierras bajas y se considera que los ecosistemas de montaña y las áreas de transición son especialmente vulnerables. De hecho, esto significa un serio peligro para la conservación de los páramos y sus funciones biofísicas, las cuales influyen a ambos lados de la cordillera de Los Andes (Isch, 2012).

En los páramos el cambio climático produce alteraciones en el clima que se manifiestan en las variaciones de temperatura y precipitación; esto a su vez causa graves transformaciones, por ejemplo, en los suelos y en la biodiversidad afectando toda la gente que depende de este ecosistema (Camacho, 2013).

La alteración al páramo por el cambio climático se puede observar en las lagunas Caricocha, Chiriyacu y Huarmicocha, que están ubicadas en el páramo de Mojanda, ya que el espejo de agua de las lagunas se está reduciendo.

Estas lagunas son importantes por ser parte del sistema lacustre de Mojanda y este sistema a su vez abastece de agua a cerca de un 60 % de la ciudad de Otavalo y a más del 80 % del requerimiento urbano y rural del cantón Pedro Moncayo (GADPP, 2017).

Por esto, si se llegase a perder este recurso se generaría un problema socioeconómico de gran magnitud ya que por el desabastecimiento de agua se tendría que buscar otras fuentes de agua que puedan abastecer a las ciudades afectadas, sin mencionar la pérdida irreparable del patrimonio natural.

Un análisis completo de la situación actual del espejo de agua de las lagunas es vital para la población que depende de ellas, y es así como nace la necesidad de realizar este proyecto de investigación.

Con este proyecto se busca identificar el área total de pérdida de agua en las lagunas de estudio en las dos últimas décadas, mediante un análisis multitemporal y considerando variables meteorológicas. Además, con la caracterización físico-química de agua y sedimentos se analiza la calidad del agua de las lagunas y se identifica la reducción del área de las lagunas según sus procesos geoquímicos.

Al determinar la pérdida del espejo de agua se puede generar un modelo de predicción que identifica cual es la pérdida futura del espejo de agua de las lagunas, si no se toma medidas de conservación, y poder así concientizar a los habitantes sobre el cuidado de las lagunas.

Esto sirve también como insumo para la toma de decisiones de las organizaciones encargadas del cuidado de las lagunas, además de dar a conocer a la población y a las autoridades la pérdida que se está teniendo de este recurso hídrico y como se puede seguir

perdiendo si no se da la importancia necesaria a su cuidado. Así se puede crear programas y proyectos que busquen su adecuado manejo y evitar que se sigan deteriorando.

## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

Realizar un análisis multitemporal de la reducción del espejo de agua de las lagunas Caricocha, Chiriyacu y Huarmicocha mediante imágenes satelitales del periodo de 2000 al 2020 y hacer la caracterización físico-química de agua y sedimentos, con el fin de evaluar el estado del área para realizar el manejo adecuado del recurso hídrico y evitar su pérdida futura.

### ***Objetivos específicos***

- Determinar el área que se redujo del espejo de agua de las lagunas Caricocha, Chiriyacu y Huarmicocha en el periodo de 2000 al 2020 a través de un análisis multitemporal y variables meteorológicas (precipitación, temperatura, humedad y evapotranspiración), utilizando herramientas de software SIG para el tratamiento, interpretación y análisis de las imágenes.
- Predecir la reducción del área del espejo de agua a futuro, empleando el modelo de Cadenas de Márkov para estimar la pérdida del recurso lacustre.
- Recolectar muestras de agua y sedimentos en diferentes puntos de muestreo para el análisis de los parámetros físico-químicos.
- Caracterizar las propiedades físico-químicas del agua analizando los parámetros de pH, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, sólidos disueltos totales, nitratos, sulfatos, fosfatos, hierro y manganeso para determinar la calidad de agua de las lagunas.

- Caracterizar las propiedades físico-químicas de los sedimentos analizando los parámetros de pH, conductividad eléctrica, tamaño de partícula, porcentaje de materia orgánica, carbono orgánico total, Hierro y Manganeseo para identificar la reducción del área de las lagunas según sus procesos geoquímicos.
- Generar recomendaciones que permitan el adecuado manejo de las lagunas y prevenir la pérdida del espejo de agua.

### **Descripción del área de estudio**

Las lagunas Caricocha, Chiriyacu y Huarmicocha forman parte del sistema lacustre de Mojanda que es un sistema montañoso que se encuentra en la Sierra Norte del Ecuador. Ubicándose a los pies del cerro Fuya Fuya a 4.263 msnm, a 60 km de la ciudad de Quito (Tocagón & Rivadeneira, 2012). Políticamente, la zona está administrada por las provincias de Pichincha e Imbabura, compartiendo territorio entre tres gobiernos municipales que son Pedro Moncayo, Otavalo y el Distrito Metropolitano de Quito (GADPP, 2017).

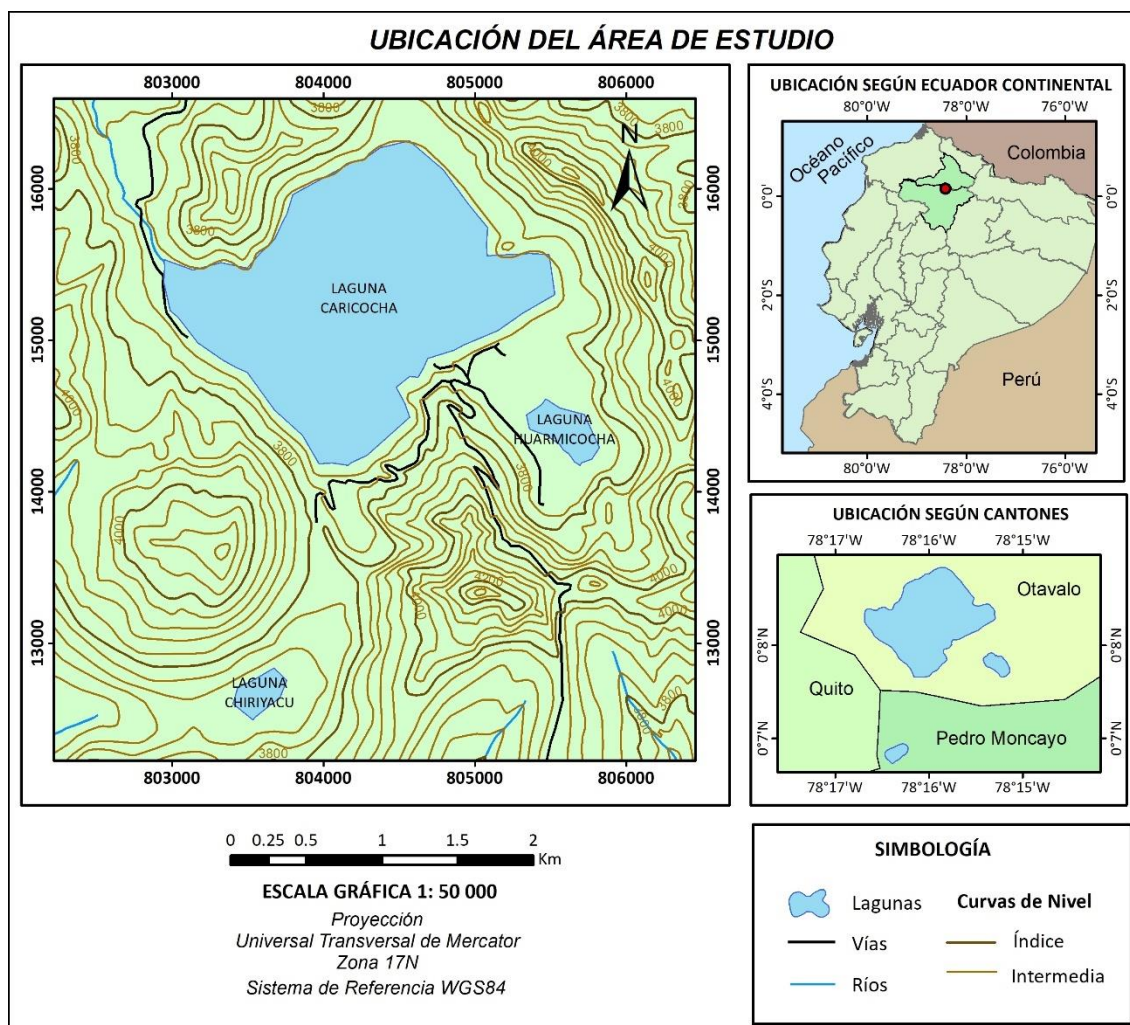
La laguna Chiriyacu se encuentran en territorio del cantón Pedro Moncayo, mientras que las lagunas Caricocha y Huarmicocha se encuentran compartiendo territorio en los cantones Pedro Moncayo y Otavalo (Ordóñez, 2019) (Ver Figura 1).

Mojanda es un importante complejo lacustre, compuesto por páramo y un gran reservorio de agua por lo que fue declarado Área de Protección Hídrica por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica el 23 de junio del 2021, con el objetivo de conservar alrededor de 6.097,03 hectáreas que proveen de agua a pobladores de la provincia de Pichincha (MAATE, 2021).



Figura 1

Ubicación del área de estudio



El clima característico del lugar es subhúmedo mesotérmico templado frío, con variaciones de temperatura de 4 a 12° C y precipitaciones desde 1.000 hasta 1.500 mm (INAMHI, 2005 citado por GAD-Pedro Moncayo, 2015).

Los ecosistemas presentes en el área según el MAE (2013), son Herbazal del Páramo, Bosque siempreverde de Páramo y Bosque siempreverde montano de Cordillera Occidental de los Andes.

La fauna que se puede observar en Mojanda es: perdiz de páramo, mirlos, quilicos, quinde de cola larga, quinde real, quinde café, torcazas, pava de monte, lobo de páramo, conejo de páramo, chucuri, zorrillo, zacha cuy, puma, entre otras (Morales, 2020a).

Según Morales, (2020) en referencia a la flora se encuentra diversas especies como por ejemplo: romero de monte, chuquiragua,, achupalla, totora, caucho, chocho de monte, quishuar, zarcillejo, puya fichana, paja , arrayán, mora, cerote, yagual (árbol de papel) y como especies nativas pajonal propio de los páramos, licopodio y chuquiragua.

## **Capítulo II**

### **Marco teórico**

En este capítulo se presenta la base teórica relacionada al tema de estudio del proyecto de investigación, el cual se basa en cuatro ejes fundamentales. El primero trata sobre el cambio climático y su relación con los ecosistemas de lagunas. El segundo involucra los conceptos de análisis multitemporal y variables meteorológicas para la evaluación de la pérdida del espejo de agua de las lagunas de Mojanda. Como tercer punto se expone los métodos de predicción que sirven para proyectar la pérdida futura del espejo de agua de las lagunas. El cuarto y último módulo comprende los parámetros físico químicos de agua y sedimentos que caracterizan la calidad de agua de las lagunas y los procesos geoquímicos que se desarrollan en ellas.

#### **Cambio Climático**

El cambio climático es un fenómeno global de interés científico, político, social y mediático, porque sus repercusiones afectan y alteran prácticamente la totalidad de las actividades humanas. De igual forma, perturba el funcionamiento de la biosfera y la integridad de los ecosistemas en su conjunto, con impactos variados en el soporte vital de los ciclos biogeoquímicos (Schewe et al., 2019). Además, afecta negativamente a los ecosistemas de agua dulce ya que altera los flujos fluviales y la calidad del agua, poniendo en riesgo la calidad del agua potable incluso con el tratamiento convencional. El origen de los riesgos se encuentra en el aumento de las temperaturas; el aumento de las cargas de sedimentos, nutrientes y contaminantes debido a las fuertes lluvias (ONU, 2019).

## **Análisis Multitemporal**

Es así como, el análisis multitemporal permite aseverar que la superficie de los cuerpos de agua está expuestos a cambios en el transcurso del tiempo, como es la influencia del cambio climático que incide directamente en la modificación de las temperaturas y precipitaciones (Paula et al., 2018).

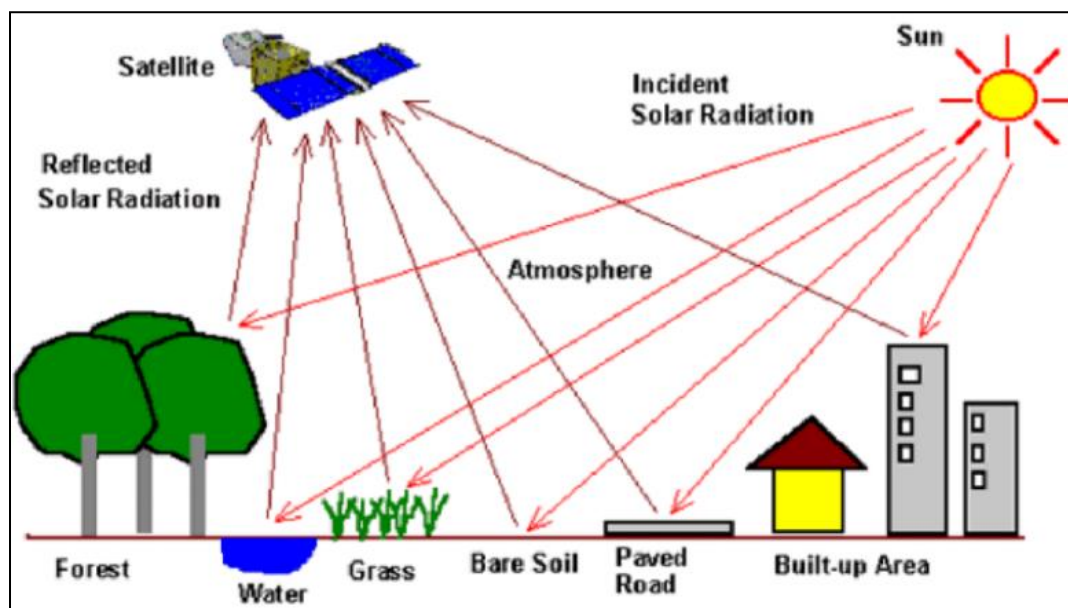
El análisis multitemporal es un método que consiste en obtener resultados y conclusiones de los cambios físicos espaciales de una región, por medio de la observación de los datos a través del tiempo provenientes de diferentes fechas, haciendo una secuencia, convirtiéndose en un conjunto único de datos (Chuvienco, 1995). Además, juega un papel importante en el uso práctico de aplicaciones como monitoreo forestal (Hansen & Loveland, 2012), monitoreo de desastres naturales (Hedhli et al., 2014), análisis espaciotemporal en la dinámica de cuerpos de agua (Rozo et al., 2014), entre otros. Como herramienta principal para ejecutar estas aplicaciones se tiene a la teledetección.

### ***Teledetección***

La teledetección es la técnica de adquisición de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales. La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor, genera una serie de datos que son procesados posteriormente para obtener información interpretable de la Tierra (Instituto Geográfico Nacional, 2018), mediante imágenes de satélite que contiene información para la clasificación de las mismas en donde se aplica técnicas de teledetección como método de identificación y delimitación de humedales, usos de suelo, mapeo de bosques, entre otros, como se puede observar en la Figura 2.

Figura 2

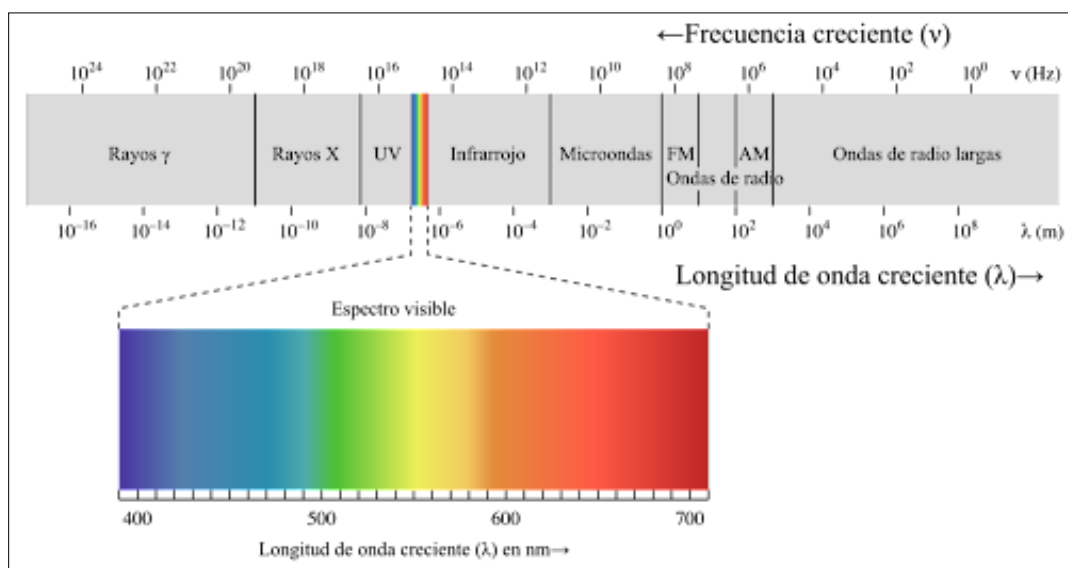
*Elementos que pueden ser identificados por Teledetección*



*Nota.* Recuperado de Canada Centre for Remote Sensing, (2019)

**Sensores Remotos.** Los sensores remotos son dispositivos que permiten la medición de la energía electromagnética emitida por los cuerpos. Por ende, la fuente de energía más utilizada es la del Espectro Electromagnético (D. Pérez, 2007). Este tipo de sensores miden la radiación electromagnética que interactúa con la superficie, las interacciones con la materia, intensidad, longitud de onda y polarización de la radiación y se categorizan de acuerdo a la fuente de radiación electromagnética y a las interacciones de la energía con la superficie terrestre (N. González & González, 2015).

El espectro electromagnético es una división arbitraria de la energía electromagnética en función de su longitud de onda y frecuencia, como se puede ver en la Figura 3.

**Figura 3***Espectro Electromagnético*

*Nota.* Figura modificada y recuperada de (Ronan, 2013)

Cada sensor tiene diferentes características conocidas como resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal (Marcos Gómez & Bustos, 2014).

**La Resolución Espacial.** Es la mínima distancia de la cual un objeto cambia de características en la superficie terrestre, por ejemplo, existen sensores como Landsat que cuentan con una resolución espacial de 30 m en sus bandas espectrales mientras que en su banda pancromática cuenta con una resolución espacial de 15 m, ASTER tienen una resolución espacial de 15, 30 y 90 m en sus diferentes bandas, los cuales son satélites que se puede acceder de forma libre (Mendivil Quijada, 2012).

**La Resolución Espectral.** Establece las bandas que se utilizan del espectro electromagnético, indicando el número y ancho de las bandas espectrales que puede distinguir el sensor; mientras mayor sea el número de bandas que ofrezca se facilitara la interpretación espectral de distintas cubiertas (Marcos Gómez & Bustos, 2014).

**La Resolución Radiométrica.** Es la cantidad de tonalidades que se puede visualizar dentro de una banda, las imágenes digitales están compuestas por píxeles que tienen un valor para cada banda espectral, que representa la cantidad de energía electromagnética reflejada captada por el sensor, el cual puede ser representado en bits. El número de bits define la resolución radiométrica del sistema de teledetección. Las características radiométricas definen la sensibilidad del sensor para detectar la mínima magnitud de energía electromagnética, mientras el sistema tenga mayor resolución radiométrica, entonces la capacidad para discriminar diferencias muy leves en energía es mayor (Roman-Gonzalez & Vargas-Cuentas, 2013).

**La Resolución Temporal.** Es el ciclo de repetición, o intervalo de tiempo, entre dos adquisiciones de imágenes sucesivas de una misma porción de la superficie y depende, en gran medida, de las características orbitales del satélite (Labrador & Arbelo, 2012).

**Preprocesamiento de imágenes satelitales.** Consiste en el tratamiento de dichas imágenes para eliminar el ruido, corregir las distorsiones, realzar características o caracterizar las entidades a partir de la manipulación de los datos crudos utilizando diferentes modelos y técnicas desarrolladas para realizar estos fines (Navia & Rivera, 2016). Para el presente estudio se aplica la corrección radiométrica y la corrección atmosférica.

**Corrección de Bandedo.** En el año 2002 el sensor del Landsat 7 (ETM+) presentó una falla, por la cual se comenzaron a generar imágenes satelitales llamadas SLC, por sus siglas en inglés Scan Line Corrector (A. González, 2018). El sensor delinea un patrón de zigzag que provoca un bandedo o efecto gaps en la imagen, que son líneas negras inclinadas (Issn, 2018).

Como método de corrección de esta falla en las imágenes existen herramientas como la llamada Rellenar sin datos del software libre QGIS. Esta herramienta rellena las regiones ráster

sin datos mediante la interpolación de los bordes mediante los valores de los píxeles circundantes utilizando la ponderación de distancia inversa (QGIS, 2002).

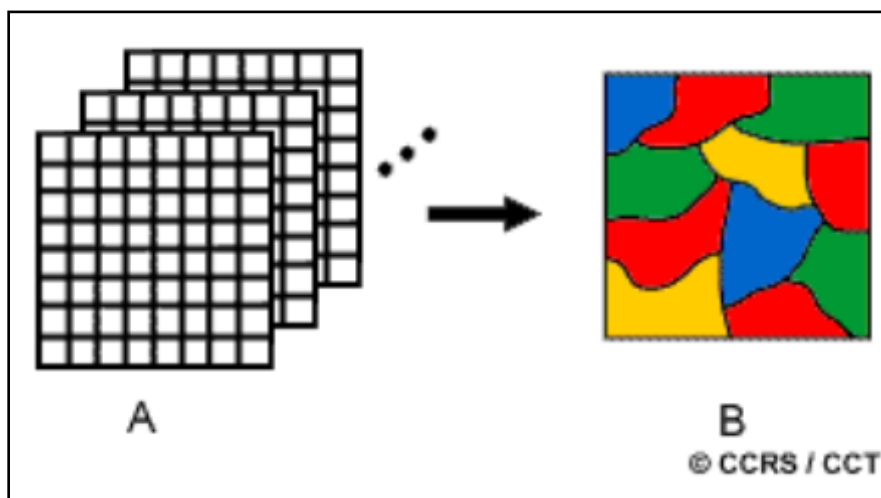
**Corrección Atmosférica.** Esta corrección busca recuperar la radiancia intrínseca del objeto de estudio, obtenida de la señal recibida por el sensor, para lo cual se requiere convertir los niveles digitales de cada banda a valores de radiancia y la radiancia transformar a valores de reflectividad (H. Aguilar et al., 2014).

Para realizar la corrección atmosférica en las imágenes se puede utilizar la herramienta Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) del software QGIS, esta herramienta aplica una conversión de niveles digitales a la medida física de reflectancia de la parte superior de la atmosfera (TOA) y aplica una corrección atmosférica con el método DOS (Dark Object Subtraction), siendo este método una familia de correcciones atmosféricas basadas en imágenes (Congedo, 2012).

Una vez realizada la corrección de las imágenes se puede seguir con el proceso de clasificación.

**Clasificación de Imágenes Satelitales.** La clasificación de imágenes satelitales es un proceso que pretende categorizar los píxeles de una imagen digital asignándoles a una o más clases de coberturas terrestres o clases temáticas (Cervantes, 2014), como se puede ver en la Figura 4. Por ende, esta clasificación se consigue mediante técnicas como: clasificación supervisada, clasificación no supervisada, por índices espectrales y otros. Además, para la validez de la clasificación de imágenes se aplica indicadores de calidad de los clasificadores.



**Figura 4***Clasificación de imágenes satelitales*

*Nota.* Recuperado de Canada Centre for Remote Sensing, (2019)

**Clasificación Supervisada.** En este caso, el analista identifica en la imagen muestras de los diferentes tipos de cobertura de interés las cuales son conocidas como áreas de entrenamiento, las áreas se escogen de acuerdo a un proceso similar al de interpretación visual para lo que se debe de tener cierto grado de conocimiento de los rasgos superficiales estudiados (Coronado, 2001). Es así como la cantidad de clases de información “cluster” serán definidas dependiendo de lo que quiera estudiar el analista.

**Índices espectrales.** Los índices espectrales son operaciones matemáticas entre las bandas de una imagen satelital las cuales permiten evidenciar objetos que responden a ciertas longitudes de onda (Herrera, 2017). Es así que, mediante esta tecnología se han desarrollado índices cuyos datos se obtienen de la interacción de la radiación solar con las diferentes coberturas terrestres como por ejemplo, NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada), NDWI (Índice de agua de diferencia normalizada), entre otros (Cargua & Cueva, 2018)

**Índice Diferencial de Agua Normalizado.** Es un método en aplicaciones de geoprocésamiento y estudios de agua (Pereira et al., 2018). Uno de los métodos que se utiliza para el cálculo del NDWI es el expuesto por McFeeters, (1996). En este método el NDWI es calculado utilizando las respuestas espectrales del canal del infrarrojo cercano (NIR) y la banda de luz verde (GREEN).

Por lo tanto, el método del NDWI discrimina cuerpos de agua. Para ello se utiliza la relación entre bandas que permite maximizar la reflectancia del agua al trabajar con longitudes de ondas en el verde, maximiza la reflectancia de la vegetación y minimiza la reflectancia de masas de agua gracias al NIR (Antón, 2019). El índice se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR} \quad (1)$$

El índice proporciona resultados en un rango de -1 a +1, donde los valores positivos corresponden a fuentes de agua, mientras el cero y valores negativos señalan la presencia de suelo o vegetación (McFeeters, 1996, citado por Ariza Ortiz et al., 2018)

**Indicadores de la calidad de los clasificadores.** La calidad final de un método de clasificación o de combinación de clasificadores, se puede hallar a partir de un coeficiente de precisión, de forma que se otorga mayor confianza a aquel clasificador que haya demostrado mayor acierto (Murillo Castañeda, 2021). Este es el caso de la matriz de confusión, que consta de una tabla de doble entrada, que compara los valores reales del terreno con los resultados de la clasificación, en donde la diagonal de la matriz muestra la cantidad de píxeles reales y la clasificación que coincide por categoría, mientras que los restantes, vienen a mostrar aquellos que se confunden con otras categorías (Borràs et al., 2017). Dentro de los índices de calidad de clasificadores se encuentra la índice kappa el cual se usa para evaluar la concordancia de

métodos cuyo resultado es categórico, con dos o más clases. Además, representa la proporción de acuerdos observados respecto del máximo acuerdo posible más allá del azar. En la interpretación del índice Kappa hay que tener en cuenta que el índice depende del acuerdo observado, pero también de la prevalencia del carácter estudiado y de la simetría de los totales marginales (Abraira, 2000). En este sentido Cohen, (1960) propuso el denominado índice kappa mediante la ecuación 2:

$$K = \left( \frac{p_0 - p_e}{1 - p_e} \right) \quad (2)$$

Donde:

$p_0$ : proporción de acuerdos observados

$p_e$ : proporción de acuerdos esperados en la hipótesis de independencia entre los observadores, es decir, de acuerdos por azar.

Finalmente Landis & Koch, (1977) propusieron, la escala de valoración del índice Kappa que se describe en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Valoraciones del Índice Kappa*

<b>Coefficiente de Kappa (k)</b>	<b>Fuerza de concordancia</b>
0.00	Pobre
0.01 – 0.20	Leve
0.21 – 0.40	Aceptable
0.41 – 0.60	Moderada
0.61 – 0.80	Considerable
0.81 – 1.00	Casi Perfecta

*Nota.* Esta tabla muestra los valores del coeficiente kappa con su respectiva fuerza de concordancia.

### **Matriz de confusión**

Es aquella que contiene información sobre los valores totales de datos clasificados temáticamente para cada cobertura resultante, y a partir de ésta se pueden calcular distintos parámetros que indican la precisión de la clasificación (Giménez et al., 2012, citado por (Hurtado, 2019)). Esta matriz contiene una serie de parámetros y errores que la conforman y se puede calcular mediante la siguiente Ecuación 3 de exactitud temática del mapa del índice kappa.

$$K = \left( \frac{N \sum_{i=1}^m X_{ij} - \sum_{i=1}^m X_i \sum X \sum i}{N^2 - \sum_{i=1}^m X_i \sum i} \right) \quad (3)$$

Donde:

$m$  = Número total de clases

$n$  = Número total de píxeles en las  $m$  clases de referencia

$x_i$  =  $i$  elementos de la diagonal principal de la matriz de confusión

$x_{\sum} = i$  suma de los píxeles de la clase  $i$  de referencia

$x_{\sum} =$  suma de los píxeles clasificados como la clase  $i$

### **Unidad Mínima de Mapeo**

La unidad mínima de mapeo define si un objeto será representado como área si sus dimensiones superan 0,2 mm a la escala del mapa, valor conforme al límite de percepción visual humana de diferenciar objetos a partir de separaciones de 0,2 mm, para lo que se recomienda que la unidad mínima cartografiable no sea menor  $4 \text{ mm}^2$  (Büttner et al., 2004, citado por Siebert, 2009).

El Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) del Ecuador, mediante el Programa de Regulación y Administración de Tierras Rurales en el 2008 empleo una metodóloga para el cálculo de la unidad mínima de mapeo aplicando la Ecuación 3 (Mejía & Moncayo, 2012).

$$UMM = UMV * ET \quad (3)$$

Donde:

*UMM*: Unidad Mínima de Mapeo

*UMV*: Unidad Mínima Visible

*ET*: Escala de Trabajo

### ***Análisis y cuantificación de los cambios***

**Variación de cambio.** Representa el cambio ocurrido en la cobertura medida en hectáreas, durante los periodos de estudio. Se calcula con la ecuación aplicada en los estudios de (Medina, 2015):

$$Porcentaje\ de\ cambio = \left( \frac{A2 * 100}{A1} \right) - 100 \quad (4)$$

Donde:

A1: Área de la cobertura vegetal para el primer período.

A2: Área de la cobertura vegetal para el segundo período.

**Tasas anuales de cambio.** Proceso mediante el cual se pueden estimar los cambios de cobertura y uso del suelo para un estudio multitemporal. Se puede calcular a partir de las superficies correspondientes a las coberturas que se encuentran representadas espacialmente

en los mapas (Camacho-Sanabria et al., 2015). La tasa de cambio anual se calcula en base a la Ecuación 5 propuesta por (FAO, 1996):

$$TDA = \left[ \left( \frac{A2}{A1} \right)^{\left( \frac{1}{n} \right)} - 1 \right] * 100 \quad (5)$$

Dónde:

*TDA*: tasa de cambio anual

*A1*: Área de cobertura para el primer periodo

*A2*: Área de cobertura para el segundo periodo

*n*: es el número de años entre los dos periodos

Este índice se expresa en porcentaje, por tal motivo, cuando resulta de manera negativa se estima que la cobertura se ha ido degradando, mientras que si resulta positiva se deduce que la cobertura ha ganado extensión en comparación a su situación inicial (Arevalo & Duarte, 2021).

### **Variables Meteorológicas**

Las variables meteorológicas son aquellas que cambian tanto en el espacio como en el tiempo (Agron, 2021), dentro de estas tenemos la precipitación, temperatura, humedad relativa, la evapotranspiración, entre otras.

#### ***Precipitación***

La precipitación se genera en las nubes, cuando alcanzan un punto de saturación; en este punto las gotas de agua aumentan de tamaño hasta alcanzar una masa en que se precipitan por la fuerza de gravedad (J. Aguilar, 2017).

### ***Temperatura***

La temperatura ocurre como unas consecuencias directas de la insolación y de la radiación, su determinación es fundamental para el cálculo de la evaporación (Ccaira, 2018).

### ***Evapotranspiración***

La evapotranspiración es considerada como uno de los principales componentes del ciclo hidrológico y se lo define como la sumatoria entre la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas. Como referencia mundial se tiene que aproximadamente más del 80% de las precipitaciones es agua que llega desde la evapotranspiración (reciclaje de la lluvia) que representa un gran aporte para la agricultura, hidrología, climatología, etc (Fisher et al., 2017).

**Evapotranspiración Potencial.** Es la medida de la transferencia máxima de agua posible a la atmósfera bajo condiciones ideales de textura del suelo y vegetación (Pérez-Briceño et al., 2017).

La necesidad de conocer los datos de evapotranspiración para sus diversas aplicaciones ha obligado a desarrollar métodos directos y empíricos.

Los directos calculan ET a través de instrumental específico y mediciones precisas de varios parámetros físicos, e incluso empleando instrumentación de alta complejidad y coste que registran la velocidad de viento y los contenidos de agua y de dióxido de carbono (Castellvi & Snyder, 2010). Estos métodos poseen la ventaja de arrojar resultados más cercanos a la realidad, sin embargo, son de costes muy elevados, además de requerir de bastante tiempo para llegar a resultados confiables (Marini et al., 2017).

Los métodos indirectos surgen precisamente por la dificultad de obtener mediciones de campo precisas, por lo que se valen de diversas ecuaciones empíricas o semi-empíricas para

estimar la capacidad de evaporación utilizando datos meteorológicos (Marini et al., 2017). Por este motivo, son muy utilizados en los estudios geográficos y medioambientales. Entre ellos se pueden mencionar el Método de Thornthwaite, Wilm et al. (1944).

**Método de Thornthwaite.** La fórmula empírica de Thornthwaite, Wilm et al. (1944) se basa en la temperatura y en la latitud determinando que esta última constituye un buen índice de la energía en un lugar específico. Sirve para estimar la evapotranspiración potencial y tiene la ventaja de que la fórmula usa datos climatológicos accesibles (Choque, 2021).

$$ETP = ETP_{\sin corr} * \frac{N}{12} * \frac{d}{30} \quad (6)$$

Donde:

$ETP$  = Evapotranspiración potencia corregida

$N$  = número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y la latitud

$d$  = número de días del mes

Se calcula la  $ETP_{\sin corr}$  mediante la formula:

$$E = 1.6 * \left(\frac{10 * t}{I}\right)^a \quad (7)$$

Donde:

$t$  = Temperatura media mensual en °C

$I$  = Índice de calor anual

$$a = 675 * 10^{-9} * I^3 - 771 * 10^{-7} * I^2 + 1792 * 10^{-5} * I + 0.49239$$

Para el cálculo del índice de calor mensual se utiliza la siguiente formula:

$$I = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514} \quad (8)$$



### ***Humedad relativa***

La humedad relativa (HR) es la proporción de vapor de agua real que contiene a una determinada temperatura y la cantidad que podría contener si estuviera saturado a la misma temperatura, se expresa comúnmente como porcentaje (Machaca Apaza, 2016).

La obtención de datos meteorológicos está disponible en entidades técnicas locales de cada país, así como el INAMHI, sin embargo, la disponibilidad de dichos datos es escasa, por lo que se recurre a plataformas mundiales que recolectan datos meteorológicos, dentro de ellas se encuentra la plataforma de la NASA y la interfaz de Google Earth.

### ***Interfaz de Google Earth para datos de temperatura terrestre CRUTEM4***

Los estudios de (Osborn & Jones, 2014) mencionan que CRUTEM es un conjunto de datos derivado de las temperaturas del aire cerca de la superficie terrestre registradas en estaciones meteorológicas en todos los continentes de la Tierra. Ha sido desarrollado y mantenido por la Unidad de Investigación Climática desde principios de la década de 1980, con fondos proporcionados principalmente por el Departamento de Energía de EE. UU. CRUTEM se ha combinado con el conjunto de datos de temperaturas de la superficie del mar del (MOHC) para proporcionar un conjunto de datos casi global de temperaturas en la superficie de la Tierra, llamado HadCRUT. Estos conjuntos de datos se han utilizado ampliamente para evaluar la posibilidad de un cambio climático antropogénico, y el comportamiento de las variables meteorológicas en el tiempo, por ello, es necesario un análisis estadístico de la consistencia de datos.

La confiabilidad de los datos se obtiene realizando un análisis de consistencia de la información disponible mediante criterios físicos y estadísticos que permitan identificar, evaluar

y eliminar los posibles errores sistemáticos. La inconsistencia de datos es sinónimo de error sistemático y se presenta como saltos o tendencias.

**Análisis de consistencia.** El análisis de consistencia de la información, es el proceso que consiste en la identificación o detección y remoción de la homogeneidad e inconsistencia de una serie de tiempo hidrológica (Salas Flores, 2014), es decir se basa en analizar o verificar la hipótesis nula en función de su probabilidad de ocurrencia, mediante pruebas paramétricas o no paramétricas con ayuda de las pruebas “T” de student y “F” de Fisher en donde se obtienen datos estadísticos de la media aritmética y desviación estándar, la cual permite aceptar o rechazar la hipótesis. Si la estación que se analiza ha sido bien observada, los puntos deberán alinearse en una recta, pero si existe algún quiebre, o cambio de pendiente en la recta, indicará que la estadística de la estación analizada debe ser corregida (Cahuana & Yugar, 2009).

**Análisis de saltos.** En los estudios de (Chúa A., 2017) se plantea que el análisis de saltos consiste en evaluar los cambios producidos en una serie periódica y no periódica, descartando si dicha respuesta fue a causa de cambios hechos por el hombre o a cambios naturales continuos en la cuenca.

El análisis de consistencia del tipo estadístico descrito anteriormente permite identificar los saltos en la media y desviación estándar de series temporales, y en base a dicha identificación se puede proseguir con la corrección del salto mediante la siguiente Ecuación 9 (Mejia, 2012).

$$X'_{(t)} = \frac{X_t - X_1}{S_1(x)} * S_2(x) + \overline{X_2} \quad (9)$$

Donde:

$X'_{(t)}$  = valor corregido de saltos

$X_1$  = valor a ser corregido

S = desviación estándar

### **Modelo de Predicción**

Un modelo puede ser una representación conceptual, numérica o gráfica de un objeto, sistema, proceso, actividad o pensamiento; destaca las características que el modelador considera más importantes del fenómeno en cuestión, por lo que se emplea para analizar exhaustivamente cada una de sus relaciones e interacciones y con base en su análisis, predecir posibles escenarios futuros para dicho fenómeno (García, 2008), y prever probables consecuencias de las transformaciones proyectadas (Henríquez & Azócar, 2007).

Para predecir el escenario futuro de las lagunas se puede emplear procesos combinados de predicción de coberturas terrestres. Estos procesos son autómatas celulares y predicción de cambios Márkov en la cubierta terrestre, que aporta un elemento de contigüidad espacial y el conocimiento sobre la distribución espacial probable de las transiciones al análisis de cambio Markov (Eastman, 2012).

### ***Autómatas Celulares***

Un autómata celular es un modelo matemático para un sistema dinámico, compuesto por un conjunto de celdas o células que adquieren distintos estados o valores (Reyes, 2011). Este modelo se originó por John Von Neumann en 1940, quien estaba interesado en buscar una teoría general de autómatas para el procesamiento de información que fuera aplicable tanto a sistemas biológicos como a aparatos tecnológicos (Padilla et al., 2015).

Los autómatas celulares replican un modelo o fenómeno dado en base al estado anterior a este y se diferencia de un proceso Markoviano porque considera la incidencia que tienen sobre una entidad dada sus entidades vecinas (León, 2015).

### **Cadenas de Márkov**

Las Cadenas de Márkov es un proceso estocástico, lo que quiere decir que es proceso que evoluciona en el tiempo de una manera probabilística (Velásquez, 2019). Además son procesos que carecen de memoria, por lo que la transición a un estado futuro solo depende del estado presente en que se encuentre el sistema y no importa el recorrido que ha hecho para llegar al estado presente (Zapata & Campos, 2005). Esto significa que la modelización no tiene en cuenta las variables explicativas y descriptivas, sino que se basa exclusivamente en el análisis de la dinámica interna del sistema (E. Jiménez, 2019).

Según (Taha, 2012) los datos con tiempos cronológicos  $t_0, t_1, \dots, t_n$ , la familia de variables aleatorias  $\{X_{t_n}\} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  es un proceso de Márkov si:

$$P\{X_{t_n} = x_n \mid X_{t_{n-1}} = x_{n-1}, \dots, x_{t_0} = x_0\} = P\{X_{t_n} = x_n \mid X_{t_{n-1}} = x_{n-1}\} \quad (10)$$

En un proceso de Markov con  $n$  estados exhaustivos y mutuamente excluyentes, las probabilidades en un punto específico del tiempo  $t = 0, 1, 2, \dots$  se define como (Taha, 2012):

$$P_{ij} = P\{X_t = j \mid X_{t-1} = i\}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n, t = 0, 1, 2, \dots, T \quad (11)$$

Esto se conoce como probabilidad de transición en un paso al ir del estado  $i$  en instante  $t - 1$  al estado  $j$  en el instante  $t$ .

$$\sum_j P_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$P_{ij} \geq 0, (i, j) = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

Lo que se resume en la matriz de probabilidad de transición, es decir el algoritmo compara dos mapas de ocupación del suelo que se suceden cronológicamente, y evalúa y

configura una matriz de probabilidad de transición. La predicción se lleva a cabo en una serie de mapas de ocupación del suelo (uno para cada categoría) para un tiempo futuro, en donde el nivel digital de cada píxel expresa la probabilidad de pertenecer a la categoría analizada (Paegelow et al., 2003).

**Matriz de probabilidad de transición.** La matriz de transición es una matriz cuadrada cuyos elementos son no negativos y tal que la suma de los elementos de cada fila es igual a 1 (Espinoza, 2007). Esta matriz expresa la probabilidad de que un píxel de cierta clase cambie a cualquier otra clase (o permanezca en la misma) en el próximo periodo de tiempo (Eastman, 2012).

### **Parámetros físico-químicos del agua y sedimentos**

Los parámetros físico-químicos en el agua dan una información extensa de la naturaleza de las especies químicas y sus propiedades físicas, estos parámetros sirven para valorar la calidad de diferentes tipos de agua (Samboni et al., 2007).

Puesto que la alteración de la calidad del agua puede venir provocada tanto por efectos naturales como por la actividad humana derivada de la actividad industrial, agropecuaria, doméstica o de cualquier otra índole, no es de extrañar que el análisis de los parámetros de calidad del agua se deba realizar a todo tipo de aguas, independientemente de su origen (A. Jiménez, 2000).

En el Ecuador, el Anexo 1 Libro VI del Acuerdo Ministerial 097-A, Anexos de Normativa, Reforma del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) sirve como referencia para evaluar los parámetros fisicoquímicos del recurso agua. (Ministerio del Ambiente de la República del Ecuador, 2015)

Por otra parte, los sedimentos en sistemas acuáticos, son matrices complejas y dinámicas, compuestas de materia orgánica en diversos estados de descomposición, material particulado que varía en tamaño y composición química, así como material inorgánico de origen biológico y antropogénico (Leal et al., 2009). En los lagos y lagunas existen varios factores fisicoquímicos que influyen en la tasa de crecimiento de los organismos que las habitan; el estado de desarrollo, la actividad y la disponibilidad del alimento, el fotoperiodo, la salinidad y la temperatura (Espina & Venegas, 2005). Los estudios de sedimentación lacustre son realizados por medio de testigos sedimentarios que son muestras de sedimentos, extraídas de diferentes maneras, que mantienen la secuencia de deposición de los sedimentos y que son posteriormente analizados en laboratorios para determinar las condiciones geológicas, meteorológicas, los cambios en el ecosistema e incluso acciones de origen humano que pueden haber afectado los regímenes de sedimentación y la composición de los sedimentos (Moreira-Turcq et al., 2014).

Los parámetros fisicoquímicos de agua y sedimentos importantes para esta investigación son los siguientes:

### ***Potencial de Hidrogeno (pH)***

Es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución que indica la concentración de iones hidronio [ $H_3O^+$ ] presente en determinadas disoluciones (Vázquez & Rojas, 2016). El pH es medido en una escala desde 0 a 14, en la cual 7 indica que la sustancia es neutra, valores de pH por debajo de 7 significa que la sustancia es ácida y valores por encima de 7 muestra que la sustancia es básica (Fernández & García, 2006).

Mantener un pH balanceado en el agua es muy importante para la vida acuática dado que los peces y otros organismos dependen de la alta calidad del agua con la cantidad necesaria de oxígeno disuelto y nutrientes, es así como un alto o bajo pH puede romper el balance de los

químicos del agua y movilizar a los contaminantes, causando condiciones tóxicas. Por esa razón, generalmente los científicos de la calidad del agua la analizan para determinar la salud de los arroyos, los lagos, los ríos y el agua del suelo (JAPAC, 2016).

Los niveles altos o bajos de pH también pueden originar otros problemas para la calidad del agua, como por ejemplo si el nivel de pH es bajo aumenta la solubilidad de nutrientes tales como fosfatos y nitratos, provocando que haya más nutrientes de este tipo a disposición de las plantas acuáticas y algas, lo que fomenta una proliferación de brotes de algas y cuando estos brotes mueren, aumenta el número de bacterias en respuesta a la mayor oferta de alimentos y a su vez, estas bacterias consumen más oxígeno disuelto del agua, lo que con frecuencia genera problemas o mortandad en los peces y los macroinvertebrados acuáticos (Project WET Foundation, 2011).

### ***Conductividad Eléctrica (CE)***

Es la medida de la capacidad de una solución para conducir una corriente eléctrica (Hach Company, 2017).

Según Otero (2011) el agua si es químicamente pura no es conductora y el agua natural tiene iones en disolución y su conductividad es mayor y proporcional a la cantidad y características de esos electrolitos, es por lo que la conductividad se usa como índice aproximado de concentración de solutos, pudiendo estimar así la calidad del agua y su posible nivel de contaminación (Ver tabla 2).

**Tabla 2***Calidad de agua en función de la conductividad eléctrica*

<b>Conductividad Eléctrica (uS/cm)</b>	<b>Calidad de Agua</b>
<280	Pura
280-430	Poco contaminada
430-600	Contaminada
600-860	Muy contaminada
>860	Excesivamente contaminada

*Nota.* Recuperado de Massol (2010)

También, es importante mencionar que en soluciones acuosas el valor de la conductividad es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos (C. García, 2013).

***Sólidos Disueltos Totales (TDS)***

Es una medida de la materia en una muestra de agua, más pequeñas de 2 micrones que no pueden ser removidos por un filtro tradicional, por lo tanto los TDS es la suma de todos los minerales, metales, y sales disueltas en el agua y es un buen indicador de la calidad del agua (Bauder & Sigler, 2017).

***Oxígeno Disuelto (OD)***

El Oxígeno Disuelto es uno de los indicadores más importantes de la calidad del agua y la fuente principal de oxígeno es el aire. En los lagos, la fotosíntesis es la fuente más importante de oxígeno y su medición se usa para determinar la productividad primaria, y en cierta medida deducir el estado de eutrofización (Roldán Pérez, 2012). Si es consumido más oxígeno que el que se produce y capta en el sistema, el tenor del oxígeno caerá, pudiendo alcanzar niveles por debajo de los necesarios para la vida de muchos organismos (Goyenola, 2007), es así que las



condiciones ecosistémicas según las concentraciones de Oxígeno Disuelto se clasifican según la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Rangos de concentración de oxígeno disuelto y condiciones ecosistémicas frecuentes*

OD (mg/l)	Condición	Consecuencias
0	Anoxia	Muerte masiva de organismos aerobios.
0-5	Hipoxia	Desaparición de organismos y especies sensibles.
5-8	Aceptable	OD adecuadas para la vida en la gran mayoría de
8-12	Buena	especies de peces y otros organismos acuáticos.
>12	Sobresaturada	Sistemas en plena producción fotosintética.

*Nota.* Recuperado de Goyenola (2007)

### **Temperatura (T)**

La temperatura es un parámetro físico que mide las sensaciones de calor y frío, desde el punto de vista microscópico, la temperatura se considera representación de la energía cinética interna media de las moléculas que integran el cuerpo estudiado (Castilla, 2015).

La temperatura tiene una gran importancia en el desarrollo de los diversos fenómenos que se realizan en el agua, por ejemplo en la solubilidad de los gases y sales, así como en las reacciones biológicas, las cuales tienen una temperatura óptima para poder vivir (Rodríguez, 2009).

### **Nitratos**

Los nitratos son iones formados por tres átomos de oxígeno, uno de nitrógeno y con una carga negativa ( $NO_3^-$ ), no tienen color ni sabor y se encuentran en la naturaleza disueltos en el agua, su presencia natural en las aguas superficiales o subterráneas es consecuencia del ciclo

natural del nitrógeno, sin embargo, en determinadas zonas ha habido una alteración de este ciclo por el aumento en la concentración de nitratos, debido a un excesivo uso de abonos nitrogenados y a su posterior arrastre por las aguas de lluvia o riegos (Palomares, 2013).

Las reacciones de los nitratos ( $NO_3^-$ ) en el agua dulce pueden causar el agotamiento del oxígeno y esto causaría la muerte de los organismos acuáticos (Sánchez et al., 2007).

### **Sulfatos**

Los sulfatos son sales que tienen en común la presencia del ion sulfato ( $SO_4^{-2}$ ), este ion sulfato está compuesto de un átomo de azufre en el centro de un tetraedro formado por cuatro átomos de oxígeno (Vega, 2019).

El ion sulfato es abundante en aguas naturales y su determinación proporciona información respecto a la contaminación y a los fenómenos ambientales, además puede aportar datos acerca de la información de ácido sulfúrico proveniente del dióxido de azufre presente en la atmósfera (Arboleda Valencia, 2000).

### **Fosfatos**

El ion fosfato ( $PO_4^-$ ) se forma a partir del fósforo inorgánico que existe como mineral y contribuye directamente en el ciclo de este elemento en el ambiente (Bolaños-Alfaro et al., 2017). Puede existir en solución como partículas, como fragmentos sueltos o en los cuerpos de organismos acuáticos, también el agua de lluvia puede contener distintas cantidades de fosfatos (Sánchez et al., 2007). Son sustancias solubles que las plantas necesitan para su desarrollo y que si se encuentran en el agua en cantidades excesivas promueven el crecimiento de algas y otros organismos provocando procesos de polución y eutroficación (Lavie et al., 2010).

En la norma ecuatoriana no se establece criterio de calidad para las concentraciones de fosfatos por lo cual se puede comparar con los Criterios Ecológicos de Calidad de Aguas del

acuerdo mexicano CE-CCA-001/89, en donde se establece que los fosfatos no deberán exceder de 0.05 mg/l en afluentes a lagos o embalses ni de 0.025 mg/l dentro del lago o embalse para prevenir el desarrollo de especies biológicas indeseables y para controlar la eutroficación acelerada (SEDUE, 1989).

### ***Textura del suelo***

La textura indica el contenido relativo de partículas de diferente tamaño, como la arena, el limo y la arcilla, en el suelo. La textura tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra en el suelo y lo atraviesa (FAO, n.d.).

### ***Materia Orgánica (MO)***

La materia orgánica del suelo es el almacén más importante de carbono orgánico en el planeta (López, 2020). En sentido amplio puede definirse a la Materia Orgánica (MO) como una larga serie de compuestos carbonados en diferentes estados de degradación y síntesis, provenientes de restos vegetales y animales y de la propia biota que en ella se desarrolla (Carreira, 2011). En la Tabla 4 se muestra la clasificación del % de materia orgánica según sus niveles de disponibilidad en el suelo.

**Tabla 4**

*Clasificación del porcentaje de materia orgánica en el suelo*

<b>Nivel de disponibilidad</b>	<b>Materia Orgánica (%)</b>
Bajo	Menor del 1,2 %
Medio	1,2 - 2,8 %
Alto	Mayor a 2,8 %

*Nota.* Recuperado de Villasanti et al., (2013)

### ***Carbono Orgánico Total (COT)***

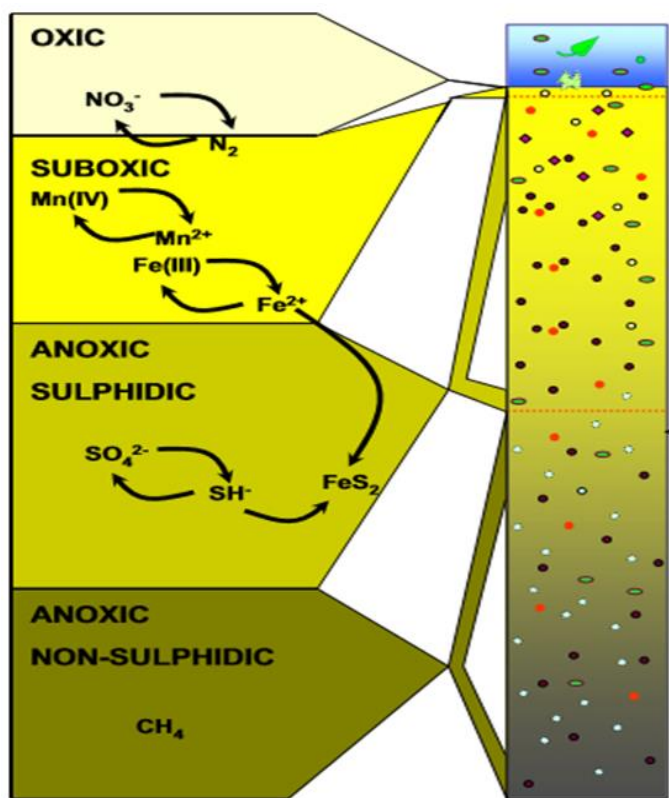
Se denomina Carbono Orgánico Total al carbono que forma parte de las sustancias orgánicas, existen muchas sustancias naturales y artificiales que contribuyen a incrementar los niveles de COT en el ambiente, no obstante, esta sustancia puede ser descompuesta por microorganismos, durante el proceso de consumo de oxígeno (PRTR España, 2007).

### **Condiciones geoquímicas de los sedimentos en espacio-tiempo**

Las condiciones geoquímicas difieren significativamente en suelos, sedimentos y también a diferentes profundidades. Los suelos inundados se clasifican de acuerdo al potencial redox en óxicos ( $Eh > 350$  mV), subóxicos ( $Eh: 350-100$  mV) y anóxicos ( $Eh < 100$  mV) en profundidad, mientras que en el sedimento prevalecen las condiciones anóxicas en todas las profundidades, pero con una concentración menor de sulfuros en el agua de los poros y pirita en la fracción sólida (Guevara, 2020). En estas condiciones geoquímicas, el Fe se retiene en los suelos, mientras que el Mn tiende a movilizarse y perderse. La forma más abundante de oxihidróxido de hierro en condiciones oxicas /suboxicas son ferrihidrita, lepidocrocita y gohetita, siendo menor el contenido de pirita, mientras que en los sedimentos la fracción dominante es la pirita en todas las profundidades lo que evidencia procesos de sulfato-reducción, como se indica en la Figura 5, donde las condiciones óxicas prevalecen en superficie y anóxicas en profundidad, siendo las elevadas concentraciones de la pirita evidencia de ambiente anóxico en sedimentos que se encuentran bajo columnas de agua óxicas/suboxicas. Con este análisis se identifica si un suelo se formó a partir de sedimentos anóxicos que se encontraban cubierto por aguas óxicas.

Figura 5

Descomposición de la materia orgánica en sedimentos en relación con las condiciones redox



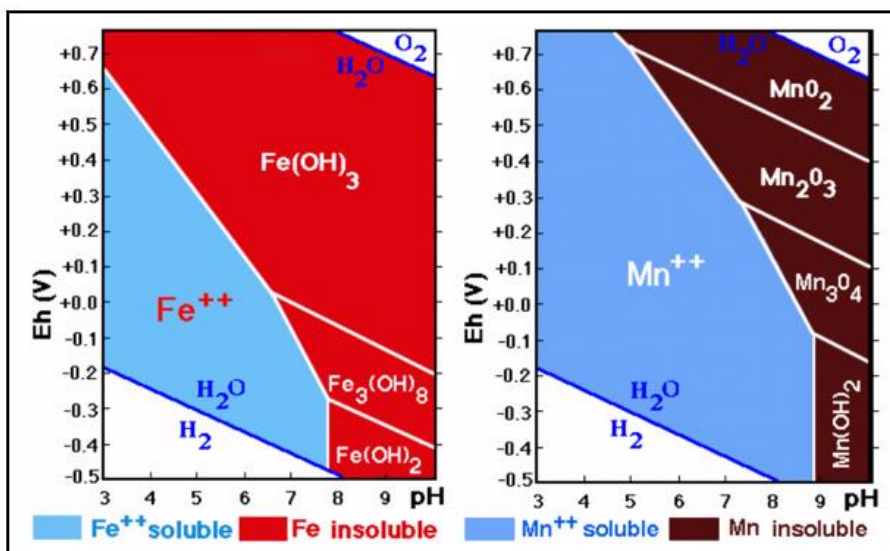
Nota. Recuperado de Álvarez-Iglesias & Rubio (2012)

### Hierro (Fe) y Manganeso (Mn)

Las formas de Fe y Mn se encuentran fuertemente influenciadas por las condiciones redox y de acidez/alcalinidad que existen en el suelo como se puede ver en la Figura 6. Es así como en ambientes con alto contenido de oxígeno son oxidantes y les corresponden altos valores de Eh, mientras que los ambientes saturados en agua y bajo contenido de oxígeno suelen ser medios reductores y se definen por bajos valores de Eh (Universidad de Granada, 2021).

Figura 6

Regiones de estabilidad de las formas del Fe y Mn en función del Eh/pH

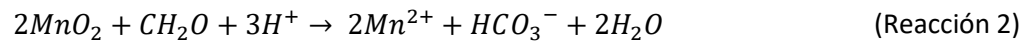


Nota. Recuperado de Universidad de Granada (2021)

Las condiciones redox y de pH pueden influenciar también en la disolución y movilización del Hierro y Manganeseo. En el caso de Hierro cuando se encuentra en condiciones reductoras, el Fe (III) es reducido a Fe (II) por la transferencia de electrones, dada por la condición deficiente de oxígeno (Acevedo-Sandoval et al., 2004). Un ejemplo se presenta durante los procesos de reducción de los oxihidroxidos de Fe que se muestra en la Reacción 1 (Guevara, 2020).



Por otra parte, y de igual manera con un potencial redox bajo y condiciones reductoras con bajos contenidos de oxígeno se favorece la movilización del manganeseo incrementando el  $Mn^{2+}$  soluble (M Gómez & Sotés, 2014). Tal es el caso de los óxidos e hidróxidos de Mn en suelos encharcados que son rápidamente reducidos por los microorganismos del suelo según la reacción 2 y una vez formado el  $Mn^{2+}$  pasa a la disolución del suelo (Guevara, 2020).



Es importante resaltar el hecho de que el Manganese se reduce siempre a valores más altos de Eh que el Hierro, por lo que al humedecerse el suelo será el primero en movilizarse (Universidad de Granada, 2021).

## Capítulo III

### Metodología

Debido a que el análisis de las lagunas es multitemporal, en 5 épocas diferentes, se utilizó técnicas de teledetección y herramientas SIG como programas académicos y el software libre QGIS con el fin de aplicar un método automatizado y robusto que permita identificar la reducción del espejo de agua. Además, de un análisis físico químico que identifica el estado actual de las lagunas y posible afectación por incidencia del cambio climático y una predicción futura de la pérdida de agua en el año 2030.

#### **Análisis Multitemporal de la reducción del espejo de agua**

##### ***Recolección de Imágenes Satelitales***

Para la selección de imágenes satelitales del área de estudio se recurrió a la base de datos de imágenes de los sensores Landsat 7 ETM+ y 8 OLI que posee el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés). Estos están disponibles de manera gratuita y poseen una resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal conveniente para los objetivos de esta investigación (Ver Tabla 5).

**Tabla 5**

*Características de imágenes satelitales Lansat 7 ETM+ y Lansat 8 OLI*

<b>Sensor</b>	<b>Resolución espectral</b>	<b>Resolución espacial</b>		<b>Resolución temporal</b>	<b>Resolución radiométrica</b>
<b>Lansat 7 ETM+</b>	8 bandas	Bandas 1-5 y 7	30 metros	16 días	8 bits
		Banda 6	60 metros		
		Banda 8	15 metros		



Sensor	Resolución espectral	Resolución espacial		Resolución temporal	Resolución radiométrica
Lansat 8 OLI	11 bandas	Bandas 1-7 y 9	30 metros	16 días	16 bits
		Banda 8	15 metros		
		Bandas 10 y 11	100 metros		

*Nota.* Recuperado de Bravo Morales, 2017

Se seleccionaron escenas de los sensores Landsat 7 (ETM+) para los años 2000, 2005 y 2010 y Landsat 8 (OLI) para el 2015 y 2020. Las escenas fueron seleccionadas en base al siguiente criterio: el periodo en que fueron tomadas las imágenes, entre los meses de julio, agosto y septiembre siendo estos los más adecuados, debido a que en este periodo es la temporada seca en la Cordillera de los Andes y las imprecisiones relacionadas al porcentaje de nubes es mínima por ende el análisis de las imágenes se hace más precisa.

### ***Escala de Trabajo y Unidad Mínima de Mapeo***

Un aspecto importante que se tomó en cuenta para la realización de este proyecto de investigación es la escala de trabajo y la unidad mínima de mapeo. La escala de trabajo depende de la resolución espacial de las imágenes y del área de estudio, mientras que la unidad mínima de mapeo está dependerá de la escala de trabajo y la unidad mínima visible.

En este caso las imágenes obtenidas tienen una resolución espacial de 30 metros, para lo cual la escala de trabajo óptima es de 1:50 000.

Una vez determinada la escala de trabajo se calcula la unidad mínima de mapeo con la Ecuación 3:

$$UMM = (4m * 4m) * [(50m * 50m)/(1mm * 1mm)]$$

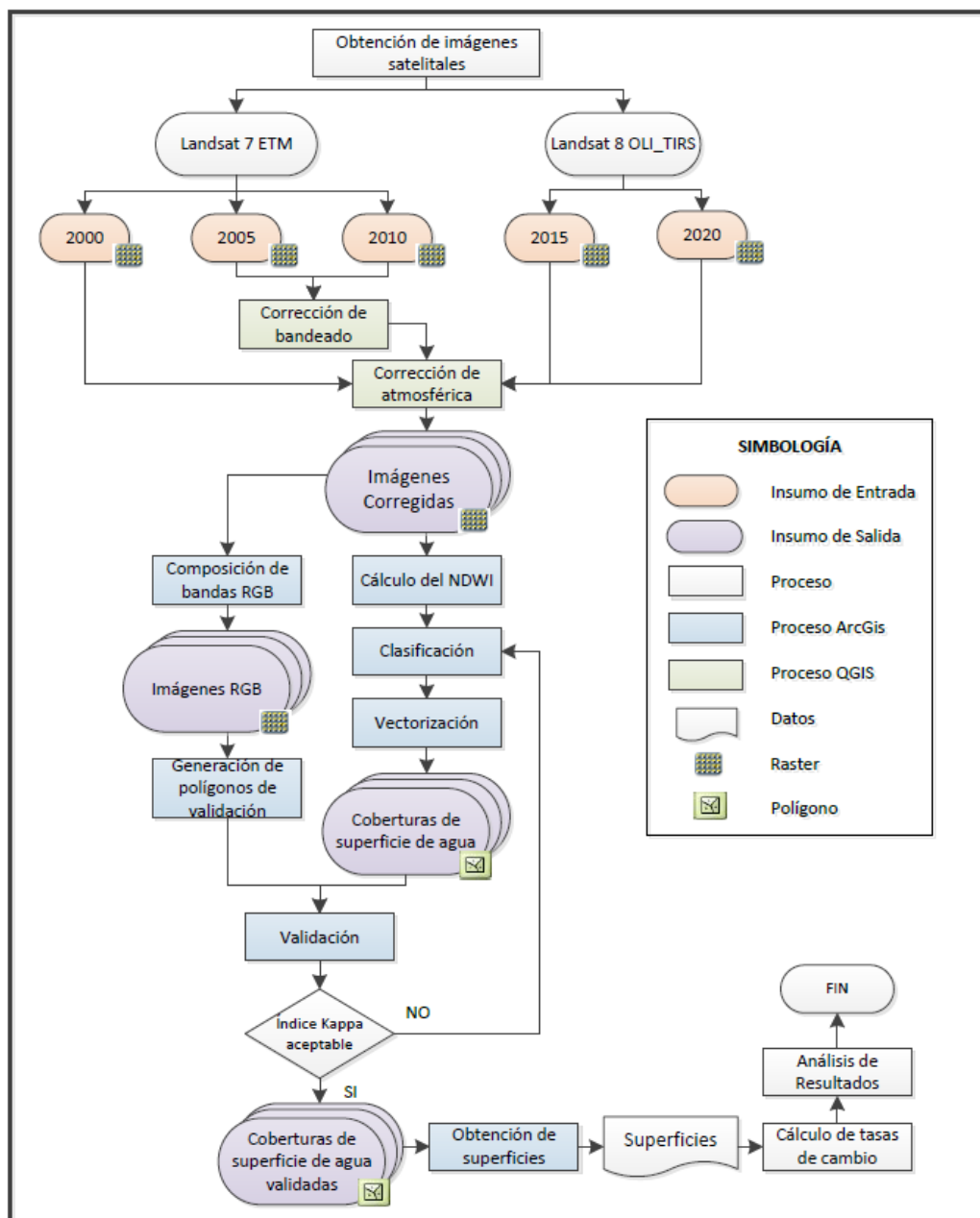
$$UMM = 16mm^2 * 2500 m^2/mm^2$$

$$UMM = 40\ 000 m^2$$

Una vez obtenidas las imágenes satelitales y seleccionado la escala de trabajo se siguió la metodología descrita en el diagrama de flujo de la Figura 7.

**Figura 7**

*Flujograma cartográfico para análisis multitemporal de la reducción del espejo de agua*



## ***Preprocesamiento de las imágenes satelitales***

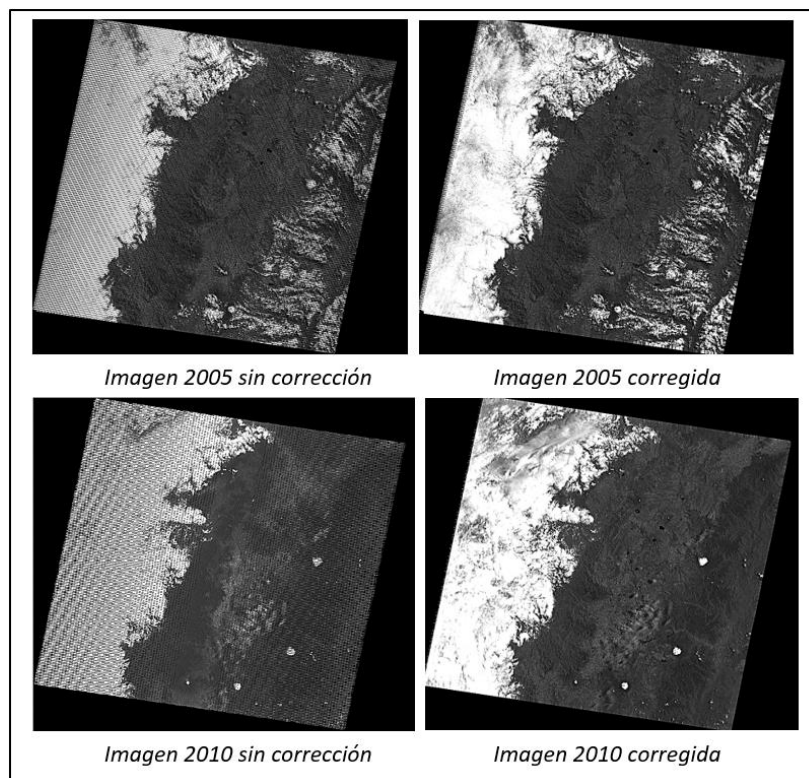
### **Corrección de Bandeado**

En las imágenes Landsat ETM+ del 2005 y 2010 se observó una falla conocida como bandeado o gaps. Para corregir este error de bandeado en las imágenes del año 2005 y 2010 se utilizó la herramienta Rellenar sin datos del software libre QGIS. En este proceso se requirió de las máscaras de validación que vienen adjuntas en los archivos de las imágenes satelitales Landsat 7.

La corrección de bandeado se realizó a cada banda de las imágenes por separado, dado que las imágenes al ser multiespectrales tienen varias bandas. En la Figura 8, se puede observar la diferencia entre las bandas originales y las bandas corregidas.

### **Figura 8**

#### *Corrección de bandeado*



### **Corrección Atmosférica**

Para realizar la corrección atmosférica de las imágenes satelitales se utilizó la herramienta Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) del software QGIS. Los insumos que se necesitaron para estas correcciones fueron: el directorio que contiene las bandas de la imagen satelital y el archivo MTL, el cual es el archivo de metadatos de la imagen.

### ***Cálculo del Índice Diferencial de Agua Normalizado NDWI***

Después de haber corregido las imágenes satelitales se realizó un recorte del área de interés y se procedió a calcular los índices espectrales NDWI con la ecuación 1, que muestra valores dentro de un rango de -1 a 1. Se optó por este índice ya que se usa específicamente para estimar la humedad de la cobertura terrestre y para cuantificar la cantidad de agua de la superficie del sistema lacustre Mojanda que ha ido variando en el periodo de estudio.

### ***Clasificación de las imágenes***

Una vez calculado el NDWI se procedió a clasificar en dos clases: Cuerpos de agua y Otras coberturas. Esta clasificación se llevó a cabo siguiendo los valores del NDWI, donde los valores mayores a cero corresponden a la presencia de agua (Ariza Ortiz et al., 2018) y menores a cero a la ausencia de agua.

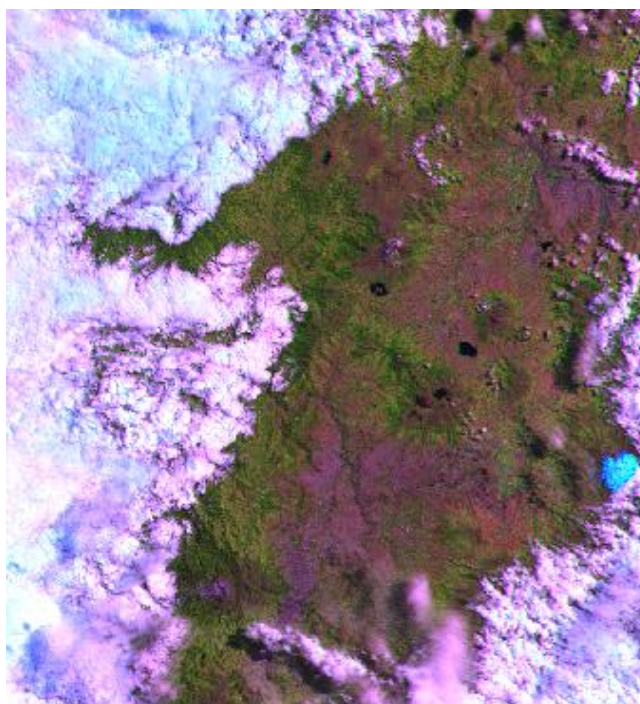
**Validación de la Clasificación e Índice Kappa.** El índice Diferencial Normalizado de Agua (NDWI) realiza una clasificación para obtener coberturas de agua, por tal motivo es necesario validarlo. Para la validación se utilizó una combinación de bandas acorde al estudio de agua para crear matrices de confusión y calcular el índice kappa de todos los periodos de estudio.

***Combinación de Bandas.*** La combinación de bandas se realizó en el Software ArcGis en la herramienta de Image Analysis que permite asignar diferentes bandas a los canales RGB.

Se empleo la combinación 543 para el satélite Landsat 7 y la combinación 654 para el satélite Landsat 8. Estas combinaciones permiten una mayor diferenciación entre la cobertura de agua y suelo, mostrando de color gris oscuro los cuerpos de agua como se observa en la Figura 9.

**Figura 9**

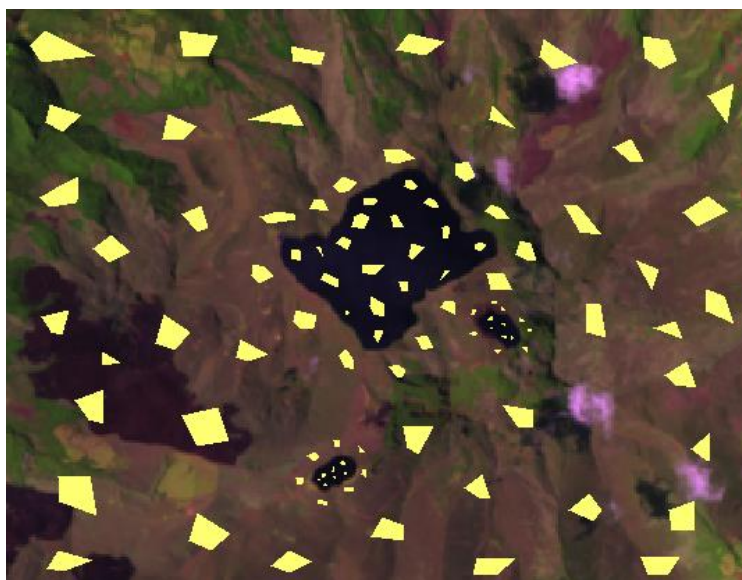
*Combinación de bandas 543 del satélite Landsat 7*



Una vez realizada la combinación de bandas, se crearon 30 polígonos en la parte de cuerpos de agua y 70 polígonos en la parte de otras coberturas de cada uno de los periodos de tiempo estudiados (Ver Figura 10) para utilizarlos en la validación.

**Figura 10**

*Polígonos de la combinación 543 del satélite Landsat 7 para el año 2000*



**Matriz de confusión.** A las capas finales de la cobertura de agua obtenidas por el NDWI, se les creó un campo tipo Short Integer y se asignó un código 1 a la clase de Cuerpos de agua y un código 2 a la clase de Otras coberturas, mientras que a las capas de polígonos de la combinación de bandas se les asignó un código 10 a la parte de Cuerpos de agua y un código 20 a la parte de Otras coberturas. Estas capas fueron intersecadas y a sus capas resultantes se les creó otro campo tipo Short Integer para poder sumar los códigos de los campos creados anteriormente (Ver Tabla 6).

**Tabla 6**

*Códigos de intersección*

Código	Combinación Bandas	NDWI
11	Cuerpos de agua	Cuerpos de agua
12	Cuerpos de agua	Otras coberturas
22	Otras coberturas	Otras coberturas

*Nota.* Esta tabla muestra el código obtenido en la intersección y su significado en la combinación de bandas con el NDWI para el año 2000.

La matriz de confusión es creada a partir del número de polígonos que existen por código para cada uno de los de los periodos de estudio (Ver Tabla 7).

**Tabla 7**

*Matriz de confusión del año 2000*

<b>Matriz de confusión del año 2000</b>				
		NDWI		
		Cuerpos de agua	Otras coberturas	Total
Combinación	Cuerpos de agua	26	4	30
	Otras coberturas	0	70	70
Total		26	74	100

El mismo procedimiento se aplica a los otros años de estudio para el cálculo del índice Kappa. Los índices se presentan en el apartado de Resultados.

#### ***Obtención de superficies de coberturas de agua y matriz de cambios***

Validada la clasificación del NDWI, se convirtió los ráster a polígono y se obtuvo la superficie en hectáreas de las coberturas de cuerpos de agua en sus diferentes años.

Posteriormente se calculó el porcentaje de variación y las tasas de cambio mediante las ecuaciones 4 y 5 respectivamente. El mismo procedimiento se aplicó a cada uno de los años de estudio.

Finalmente se realizó una comparación cada 5 años y entre el año inicial y el año final de las coberturas de cuerpos de agua para obtener las zonas de cambio.

#### ***Análisis multitemporal de las variables meteorológicas***

Debido a la escasa información climatológica, se han utilizado datos de las estaciones meteorológicas en un periodo de tiempo del 2000 – 2015 para el caso de precipitación,

temperatura y humedad relativa, mientras que para el periodo de 2016 – 2019 se han utilizado datos de satélite, una de ellas desarrollado por la NASA (power larc) que dispone de registros climáticos en periodos mayores a diez años, otra fuente de datos utilizada es mediante la interfaz de Google Earth para datos de temperatura terrestre (CRUTEM).

A continuación, se detalla la obtención de cada una de las variables meteorológicas para el caso de estudio.

Los datos de precipitación y temperatura se obtuvieron del estudio de Calderón, (2018) el cual contaba con la base de datos otorgada por el Instituto Nacional de Meteorológica e Hidrología de los años 2000 al 2015 de una de las estaciones más cercanas al sistema lacustre Mojanda de nombre Tomalon – Tabacundo, Código M1094 y coordenadas: Latitud  $0^{\circ} 0' 40.16''$ N Longitud:  $78^{\circ} 15' 18.19''$  W en unidades de mm/mes, mientras que de los años 2016 al 2019 se obtuvo de CRUTEM de coordenadas: Latitud  $0^{\circ} 15' 0''$  N Longitud  $78^{\circ} 15' 0''$  W en unidades de mm/mes (Ver Anexo B1 y B2).

Por otro lado, los datos de humedad se obtuvieron de los anuarios meteorológicos del Instituto Nacional de Meteorológica e Hidrología de los años 2000 al 2014 de dos de las estaciones más cercanas al sistema lacustre Mojanda de nombre Tomalon – Tabacundo, Código M1094, coordenadas: Latitud  $0^{\circ} 0' 40.16''$ N Longitud:  $78^{\circ} 15' 18.19''$  W y de la estación de Otavalo, Código M0105, coordenadas: Latitud:  $0^{\circ} 14' 36''$  N Longitud  $78^{\circ} 15' 0''$  W en unidades de %, mientras que de los años 2015 al 2019 se obtuvo de la página de la NASA de coordenadas: Latitud  $0^{\circ} 8' 5.28''$  N Longitud  $78^{\circ} 15' 59.04''$  W en unidades de % (Ver Anexo B3).

Antes de la utilización de los datos de la investigación, se realizó un análisis de consistencia de datos mediante las técnicas estadísticas de la media aritmética y la desviación estándar que consistió en probar mediante las pruebas “T” de Student y “F” de Fisher, si los valores de estos datos estadísticos difieren estadísticamente en las submuestras consideradas,



de ser el caso se corrige mediante la ecuación 9. Además, se determinó la variabilidad interanual de la serie mediante la construcción de un gráfico de líneas y columnas en Microsoft Excel 2013.

A continuación, en las Tablas 8, 9 y 10 se presenta un resumen del análisis de consistencia de datos de las variables meteorológicas de precipitación, temperatura y humedad a lo largo de los años 2000 – 2019, para la prueba estadística “T” de Student y “F” de Fisher.

**Tabla 8**

*Resumen de análisis de consistencia de datos de Precipitación*

<b>DATOS DUDOSOS</b>		<b>DATOS CONFIABLE</b>	
<b>Periodos Muestrales</b>		<b>Periodos Muestrales</b>	
<b>ENTRE LOS AÑOS 2017 -2019</b>		<b>ENTRE LOS AÑOS 2000 - 2016</b>	
Tamaño de la muestra(n1) =	<b>36</b>	Tamaño de la muestra (n2)	<b>204</b>
Media de la muestra $\bar{X}_1 =$	<b>52.30</b>	Media de la muestra $\bar{X}_2 =$	<b>52.30</b>
Desviación Estándar. (S1) =	<b>39.28</b>	Desviación Estándar (S2) =	<b>39.28</b>
Grados de libertad (GL1) =	<b>35</b>	Grados de libertad (GL2) =	<b>203</b>
<b>RESULTADOS</b>			
<b>PRUEBA "T" DE STUDENT</b>			
Desviación estándar ponderada		39.28	
Desviación de las diferencias de los promedios		7.10	
Cálculo del T, calculado (Tc) según:		0.00	
Cálculo del valor crítico de t, tabular Tt:		1.97	
Grados de libertad		238.00	
<b>Conclusión:</b>			
$ t_c  =$	<b>0.00</b>	$< t_t =$	<b>1.97</b> <b>HOMOGENEIDAD OK</b>
<b>PRUEBA "F" DE FISHER</b>			
Cálculo de F calculado (Fc)según:		<b>1.00</b>	
Cálculo del F tabular (valor crítico de Ft) Ft		<b>1.4813</b>	
<b>Conclusión:</b>			
$F_c =$	<b>1.00</b>	$< F_t =$	<b>1.4813</b> <b>HOMOGENEIDAD OK</b>

*Nota.* Esta tabla muestra los datos esenciales de precipitación para el cálculo de la prueba “T” de Student y “F” de Fisher con el fin de demostrar homogenización de datos.

Tabla 9

Resumen de análisis de consistencia de datos de Temperatura

DATOS DUDOSOS		DATOS CONFIABLE	
Periodos Muestrales		Periodos Muestrales	
ENTRE LOS AÑOS 2000 - 2016		ENTRE LOS AÑOS 2017- 2019	
Tamaño de la muestra(n1) =	<b>204</b>	Tamaño de la muestra (n2) =	<b>36</b>
Media de la muestra $\bar{X}_1$ =	<b>14.11</b>	Media de la muestra $\bar{X}_2$ =	<b>14.11</b>
Desviación Estándar (S1) =	<b>0.34</b>	Desviación Estándar (S2) =	<b>0.34</b>
Grados de libertad (GL1) =	<b>203</b>	Grados de libertad (GL2) =	<b>35</b>
RESULTADOS			
PRUEBA "T" DE STUDENT			
Desviación estándar ponderada			0.34
Desviación de las diferencias de los promedios			0.06
Cálculo del T, calculado (Tc) según:			0.00
Cálculo del valor critico de t, tabular Tt:			1.97
Grados de libertad			238.00
Conclusión:			
$ t_c  =$	<b>0.00</b>	$< t_t =$	<b>1.97</b> <b>HOMOGENEIDAD OK</b>
PRUEBA "F" DE FISHER			
Cálculo de F calculado (Fc) según:			<b>1.00</b>
Cálculo del F tabular (valor critico de Ft) Ft			<b>1.597</b>
Conclusión:			
$F_c =$	<b>1.00</b>	$< F_t =$	<b>1.597</b> <b>HOMOGENEIDAD OK</b>

Nota. Esta tabla muestra los datos esenciales de Temperatura para el cálculo de la prueba "T" de Student y "F" de Fisher con el fin de demostrar homogenización de datos.

Tabla 10

Resumen de análisis de consistencia de datos de Humedad relativa

DATOS DUDOSOS		DATOS CONFIABLE	
Periodos Muestrales ENTRE LOS AÑOS 2000 -2015		Periodos Muestrales ENTRE LOS AÑOS 2015 - 2016	
Tamaño de la muestra(n1) =	<b>181</b>	Tamaño de la muestra (n2) =	<b>59</b>
Media de la muestra $\bar{X}_1$ =	<b>83.20</b>	Media de la muestra $\bar{X}_2$ =	<b>83.22</b>
Desviación Estándar (S1) =	<b>2.91</b>	Desviación Estándar (S2) =	<b>2.92</b>
Grados de libertad (GL1) =	<b>180</b>	Grados de libertad (GL2) =	<b>58</b>
RESULTADOS			
PRUEBA "T" DE STUDENT			
Desviación estándar ponderada		2.91	
Desviación de las diferencias de los promedios		0.44	
Cálculo del T, calculado (Tc) según:		0.04	
Cálculo del valor critico de t, tabular Tt:		1.97	
Grados de libertad		238.00	
<b>Conclusión:</b>			
$ t_c  =$	<b>0.04</b>	$< t_t =$	<b>1.97</b> <b>HOMOGENEIDAD OK</b>
PRUEBA "F" DE FISHER			
Cálculo de F calculado (Fc) según:		<b>1.01</b>	
Cálculo del F tabular (valor critico de Ft) Ft		<b>1.4507</b>	
<b>Conclusión:</b>			
$F_c =$	<b>1.01</b>	$< F_t =$	<b>1.4507</b> <b>HOMOGENEIDAD OK</b>

Nota. Esta tabla muestra los datos esenciales de Humedad relativa para el cálculo de la prueba "T" de Student y "F" de Fisher con el fin de demostrar homogenización de datos.

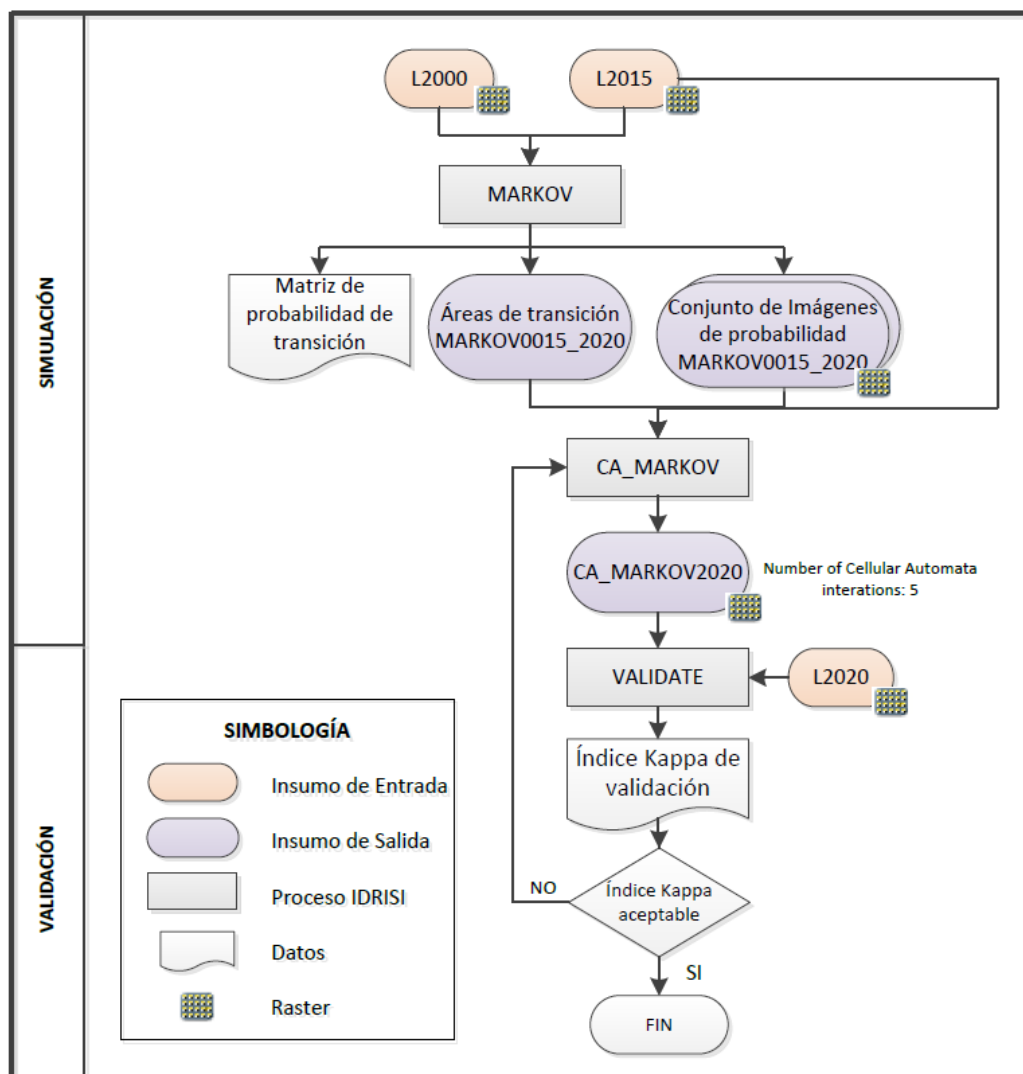
En cuanto, a los datos de evapotranspiración se calculó con el método de Thornthwaite aplicado en los estudios de (Huaccoto, 2017) mediante las ecuaciones 6, 7 y 8.

## Modelo de Predicción con Cadenas de Márkov

El proceso para generar los modelos de predicción de pérdida del espejo de agua de las lagunas de Caricocha, Chiriyacu y Huarmicocha para el año 2030 con Cadenas de Márkov se dividió en tres etapas; simulación, validación y predicción. Se utilizó como insumo las coberturas de suelo generadas anteriormente del año 2000, 2015 y 2020 importadas en formato “rst.”, el cual es compatible con el software Idrisi. Las primeras dos etapas se muestran en la Figura 11.

**Figura 11**

*Flujograma cartográfico para generar modelo predictivo*



### ***Simulación del modelo con Cadenas de Márkov***

En la primera etapa se llevó a cabo una simulación del modelo, prediciendo la cobertura de las lagunas en un periodo ya conocido, en este caso la cobertura del año 2020.

Se utilizó la herramienta MARKOV en la cual se trabajó con las coberturas correspondientes a los años 2000 y 2015, seleccionando 15 años como el periodo de tiempo entre las dos imágenes y 5 como el periodo de tiempo a proyectar referente al último año. Esto permitió generar una matriz de probabilidad de transición y áreas de transición que muestran el número de píxeles que pueden sufrir una transformación de una cobertura a otra (Paegelow et al., 2003), además de un conjunto de imágenes de probabilidad condicional para cada una de las coberturas de suelo proyectadas en base a las dos épocas anteriores.

Posteriormente, se realizó la predicción al año 2020 con la herramienta CA\_MARKOV. En esta herramienta se requirió de las áreas de transición de Márkov, el conjunto de imágenes de probabilidad y la cobertura del año 2015 y se seleccionó 5 iteraciones de Autómatas Celulares, que corresponden a los años entre el año 2015 y 2020.

### ***Validación del Modelo***

Una vez obtenida la proyección al año 2020 se ejecutó la segunda etapa que consistió en una validación del modelo mediante las coberturas predichas del año 2020 y las coberturas conocidas del mismo año. Para la validación se usó la herramienta VALIDATE, esta herramienta permitió estimar la similitud entre las coberturas mencionadas otorgando el estadístico Kappa que nos da una referencia de la precisión de la proyección.

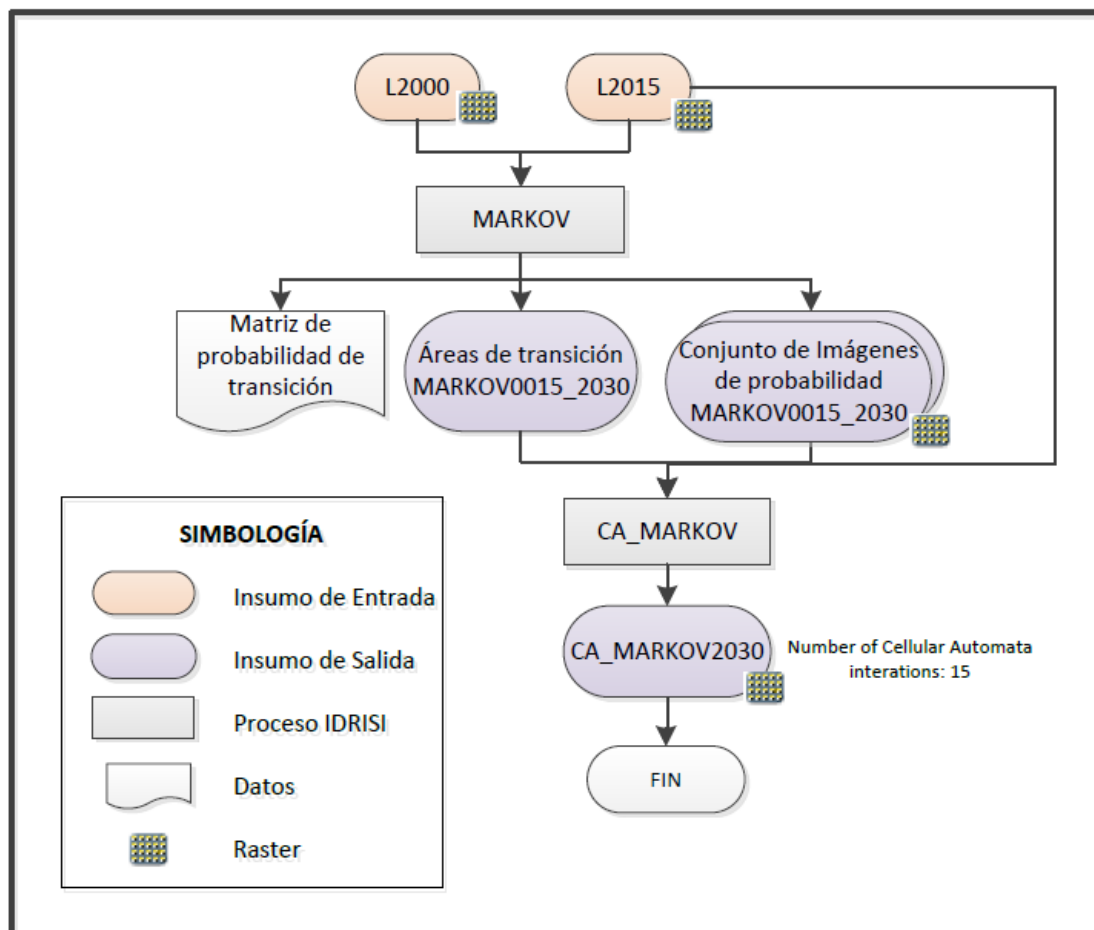
Validado el modelo y su precisión se aceptó el mismo como un modelo óptimo para generar proyecciones de la pérdida del espejo de agua de las lagunas para el año 2030.

### Proyección de la pérdida del espejo de agua al año 2030

La tercera y última etapa que sirvió para generar la proyección de la pérdida del espejo de agua al año 2030 se describe en la Figura 12.

**Figura 12**

*Flujograma cartográfico para generar proyección de pérdida de espejo de agua año 2030*



Se generó nuevamente las áreas de transición y un conjunto de imágenes de probabilidad para el año a 2030 en base a las coberturas de los años 2000 y 2015. En número de periodo de tiempo entre las dos imágenes se seleccionó como 15 y para el número de periodo de tiempo a proyectar hacia la segunda imagen fue de 15.

Finalmente, empleando la herramienta CA\_MARKOV con 15 iteraciones de Autómatas Celulares y usando como insumos la cobertura del año 2015, las áreas de transición y el conjunto de imágenes de probabilidad creados previamente, se generó la proyección de pérdida de espejo de agua del año 2030.

Con las proyecciones de pérdida de espejo de agua del año 2030 se calculó el área de las coberturas de presencia de agua. Con estas áreas se calculó el porcentaje de variación y las tasas de cambio con las ecuaciones 4 y 5 respectivamente, en base a las coberturas del año 2020.

### **Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de agua y sedimentos**

La caracterización físico química de agua y sedimentos se dividió en tres fases; la recolección de muestras, el análisis de los parámetros físico químicos y el análisis estadístico entre las propiedades fisicoquímicas.

#### ***Recolección de muestras***

Las muestras de agua fueron tomadas en dos puntos de cada laguna (ver Figura 13) y en el caso de las muestras de sedimentos se tomaron cuatro por cada laguna, en el mismo sitio donde se tomó la muestra de agua y los otros dos a una distancia de 2 metros de las muestras anteriores (ver Figura 14). En las Tablas 11 y 12 se puede observar la identificación y codificación de las muestras de agua y sedimentos respectivamente.

El muestreo se realizó según la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2169:2013, (INEN, 2013) para calidad del agua, muestreo, manejo y conservación de muestras. Las muestras recolectadas se almacenaron a baja temperatura y posteriormente llevadas al laboratorio “ALS Ecuador” para su posterior análisis.

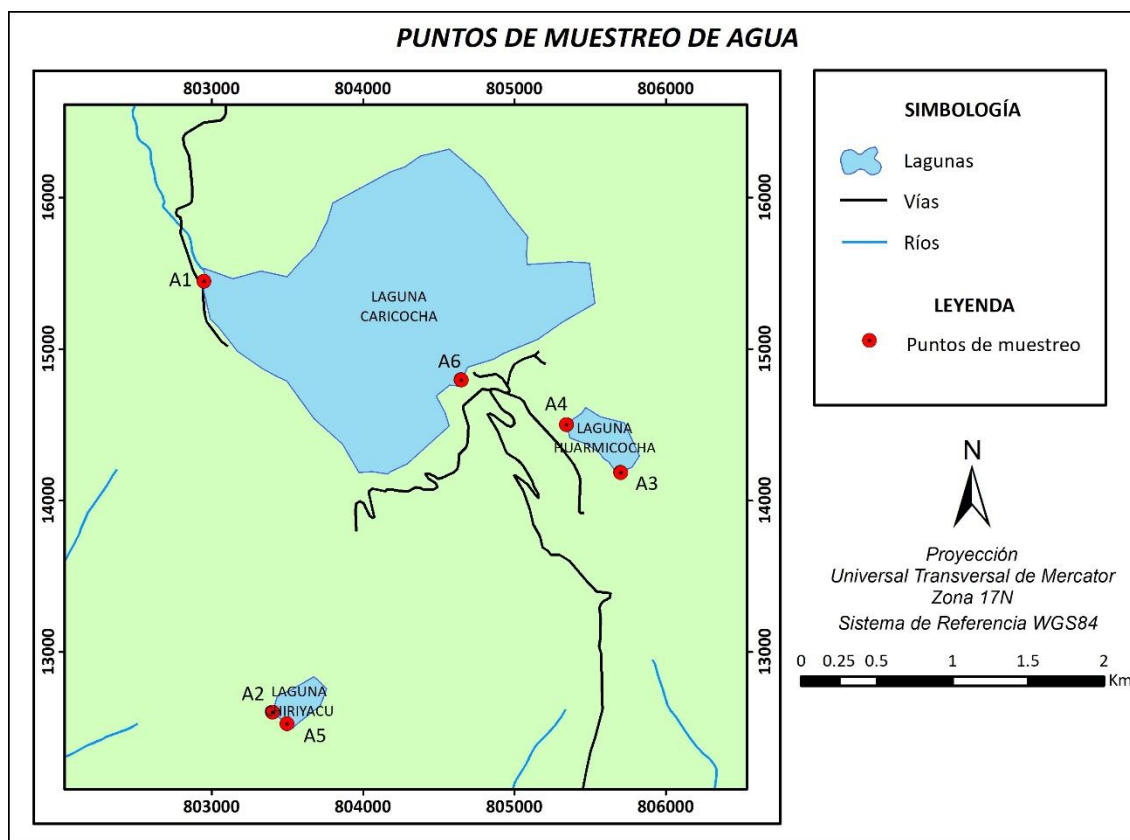
Tabla 11

*Identificación y codificación de muestras de agua*

Laguna	Código	Coordenadas	
		X	Y
Caricocha	A1	802949.6	15446.4
	A6	804646.9	14796.2
Huarmicocha	A3	805688.6	14180.6
	A4	805345.1	14501.2
Chiriyacu	A2	803403.0	12601.9
	A5	803497.4	12526.0

Figura 13

*Puntos de muestreo para el análisis fisicoquímico de agua*



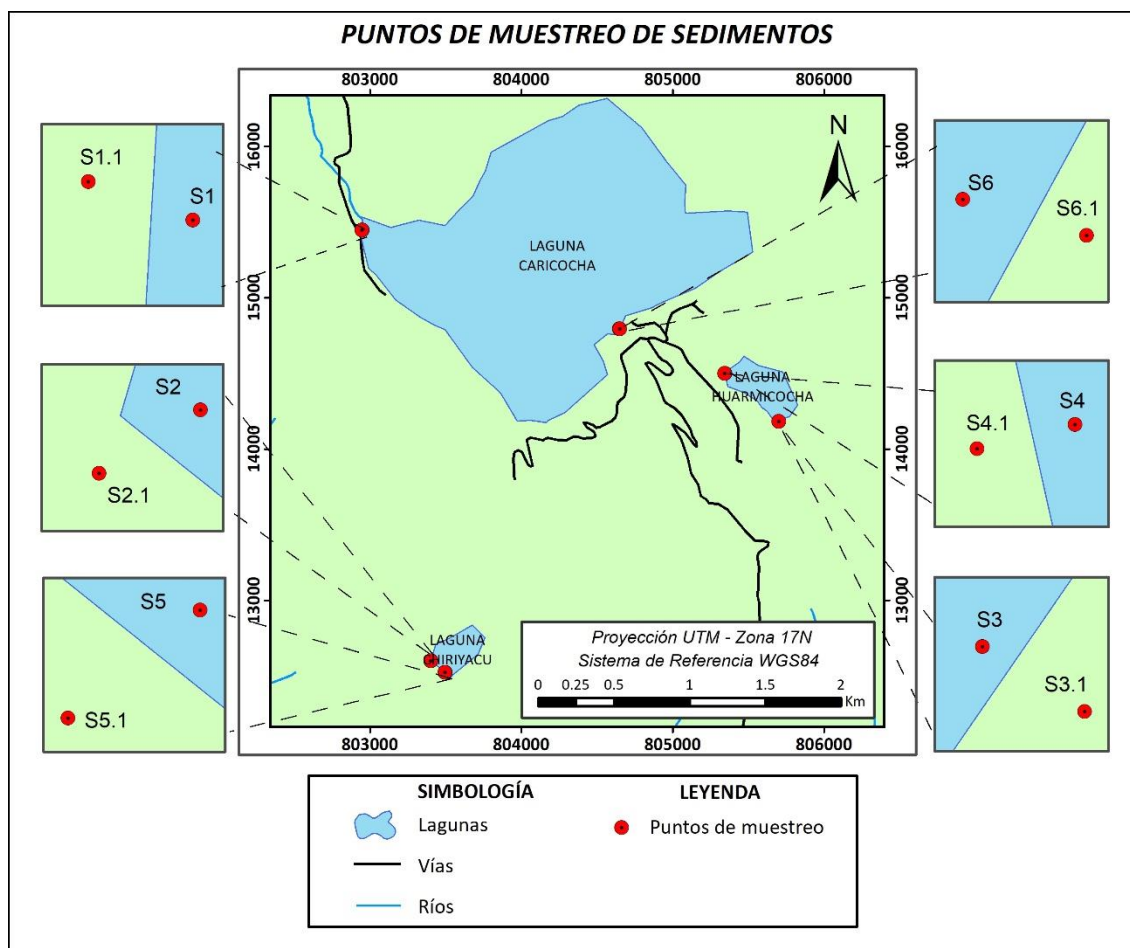


**Tabla 12***Identificación y codificación de muestras de sedimentos*

Laguna	Código	Referencia	Coordenadas	
			X	Y
Caricocha	S1	Dentro del agua	802949.6	15446.4
	S1.1	Fuera del agua	802947.9	15447.1
	S6	Dentro del agua	804646.9	14796.2
	S6.1	Fuera del agua	804649.1	14795.5
Huarmicocha	S3	Dentro del agua	805700.6	14184.0
	S3.1	Fuera del agua	805702.1	14183.0
	S4	Dentro del agua	805345.1	14501.2
	S4.1	Fuera del agua	805343.1	14500.7
Chiriyacu	S2	Dentro del agua	803403.0	12601.9
	S2.1	Fuera del agua	803401.3	12600.8
	S5	Dentro del agua	803497.4	12526.0
	S5.1	Fuera del agua	803496.0	12524.8

Figura 14

*Puntos de muestreo para el análisis fisicoquímico de sedimentos*



### ***Análisis de los parámetros físico químicos***

Para el análisis de las muestras se utilizó la metodología descrita en la tabla 13 y 14. En el caso de la temperatura, conductividad y sólidos disueltos en el agua se midieron in situ con un Medidor TDS & EC (Hold).

**Tabla 13***Metodología aplicada en el análisis de muestras de agua*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>LD Método</b>		<b>Método Referencia</b>
Potencial de Hidrógeno	pH	----	pH	Standard Methods Ed. 23, 2017, 4500-H+ A y 4500-H+ B
Sulfatos	mg/l	2,96	mg/l	EPA 375.4 SO <sub>4</sub> , 1978
Oxígeno Disuelto (OD)	mg/l	0,023	mg/l	Standard Methods Ed. 23, 2017, 4500-O G
Fosfatos	mg/l	0,735	mg/l	Standard Methods Ed. 23, 2017, 4500-P B y 4500-P C
Hierro (Fe)	mg/l	0,015	mg/l	EPA 3005 A, Rev. 01, 1992 EPA 6010 B, December 1996 Standard Methods Ed. 23, 2017, 3120 B
Manganeso (Mn)	mg/l	0,0009	mg/l	EPA 3005 A, Rev. 01, 1992 EPA 6010 B, December 1996 Standard Methods Ed. 23, 2017, 3120 B
Nitratos	mg/l	0,252	mg/l	Standard Methods Ed. 23, 2017, 4500-NO <sub>3</sub> - E

*Nota.* Recuperado de ALS Ecuador

**Tabla 14***Metodología aplicada en el análisis de muestras de sedimentos*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>LD Método</b>		<b>Método Referencia</b>
Potencial de Hidrógeno	pH	---	pH	EPA 9045 D, Rev. 04, 2004
Conductividad Eléctrica (CE)	uS/cm	---	uS/cm	EPA 9050 A, Rev. 1, 1996
Hierro (Fe)	mg/l	6,741	mg/l	EPA 3005 A, Rev. 01, 1992 EPA 6010 B, December 1996 Standard Methods Ed. 23, 2017, 3120 B
Manganeso (Mn)	mg/l	0,0862 2	mg/l	EPA 3005 A, Rev. 01, 1992 EPA 6010 B, December 1996 Standard Methods Ed. 23, 2017, 3120 B
Materia* Orgánica (MO)	%	0,066	%	Primo Yúfera, Química Agrícola I, Método Walkley Black, 1934
Textura*	---	---	---	Primo Yúfera y Carrasco Dorrien, España 1934, Método Walkley Black

*Nota.* Recuperado de ALS Ecuador. Los ensayos marcados con (\*) no están incluidos en el alcance de acreditación del Servicio de Acreditación Ecuatoriano, de ALS Ecuador (ALS Ecuador, 2021).

Para determinar el porcentaje de carbono orgánico total (COT) se calculó dividiendo el porcentaje de materia orgánica con el factor de conversión de 1,724 (Van Bemmelen, 1890).

### ***Análisis estadístico entre las propiedades fisicoquímicas***

Para determinar la reducción de espejo de agua de las lagunas según las propiedades fisicoquímicas de agua y sedimentos se calculó la reducción de las lagunas en los puntos de muestreo comparando las áreas del año 2000 y 2020. Posteriormente se evalúa la relación que existe entre las diferentes variables analizadas mediante el coeficiente de correlación (r) de Person y se clasifico según la Tabla 15. El análisis estadístico se llevó a cabo en el software Excel.

**Tabla 15**

*Clasificación de los coeficientes de correlación*

<b>Clasificación</b>	<b>Rangos del valor de r</b>
Débil	$\leq 0.100$
Moderada	0.101 – 0.300
Moderadamente fuerte	0.301 – 0.500
Fuerte	0.501 – 0.700
Muy fuerte	$\leq 0.701$

*Nota.* Recuperado de Martínez et al. (2010)

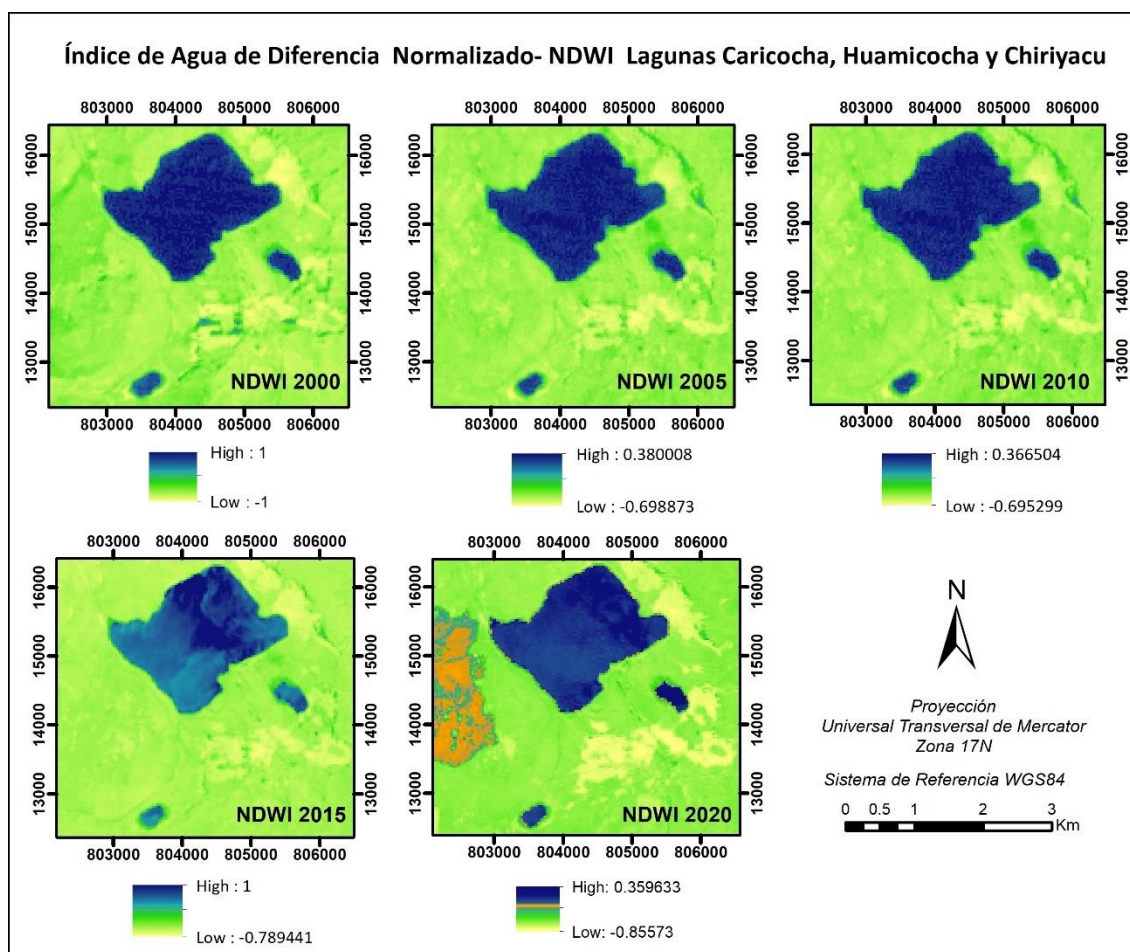
## Capítulo IV

## Resultados

## Resultados del análisis multitemporal de la reducción del espejo de agua

*Cálculo del Índice Diferencial de Agua Normalizado NDWI*

Figura 15

*Índice de Agua Normalizado NDWI de las Lagunas Caricocha, Huarmicocha y Chiriyacu*

En la Figura 15 se observa los resultados del cálculo del NDWI que sirvieron para clasificar las imágenes. Además, se muestra una escala colorimétrica que indica los rangos de NDWI, en donde los valores mayores a cero representan los cuerpos de agua y los menores a cero a otras coberturas. Por lo tanto, los cuerpos de agua están en tonos de azul y la vegetación en tonos de color verde y amarillo. En el caso del año 2020 se percibe una totalidad anaranjada debido a que ese año sufrió un incendio en la zona de Mojanda.

### ***Validación de la clasificación***

Una vez clasificadas las imágenes según el NDWI se requirió de la validación de la clasificación la cual se realizó mediante el índice kappa obtenidos de la matriz de confusión. El valor más bajo fue de 0.901 y el más alto fue de 1 considerados casi perfecto (Ver Tabla 16). Esto evidencia que la clasificación es correcta y por lo tanto se continua con la siguiente etapa de análisis de la superficie lagunar de lo contrario se debe volver a procesar hasta obtener un índice kappa aceptable.

**Tabla 16**

*Valores de validación mediante el índice Kappa en el periodo de 2000 – 2020*

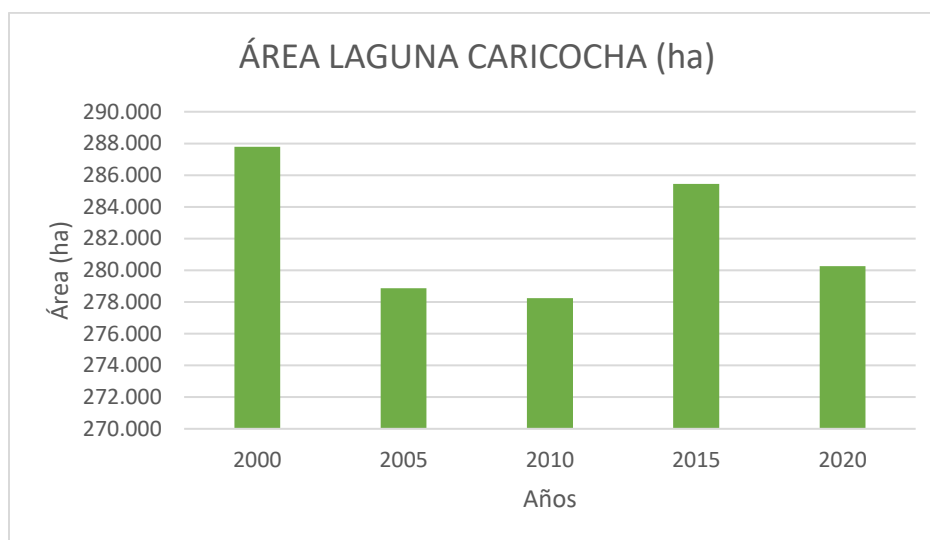
Fecha	Índice Kappa
2000	0.901
2005	1
2010	1
2015	1
2020	1

### ***Obtención de superficies de coberturas de agua y matriz de cambios***

A partir de la clasificación se obtuvo las superficies de la cada una de las lagunas en hectáreas (ha), como se muestra a continuación en las Figuras 16,17 y 18.

**Figura 16**

*Variación de la superficie de agua de la laguna Caricocha cada 5 años en el periodo del año 2000 al 2020*

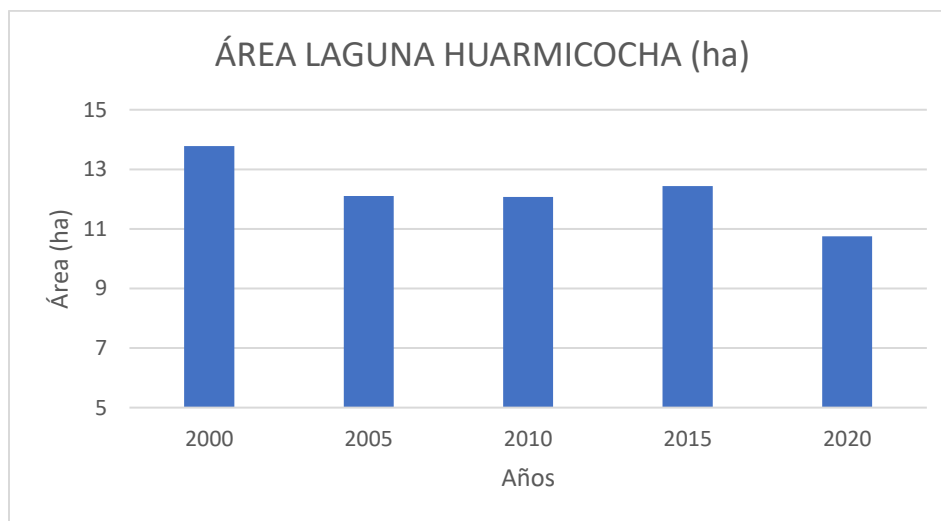


Partiendo del año 2000 como base para el cambio de la superficie de agua de la laguna de Caricocha se observa que no tiene una tendencia marcada en el periodo de estudio, sin embargo, existe una reducción del espejo de agua durante el periodo del año 2000 al 2010, siendo la superficie de la laguna en el año 2000 de 287.80 ha y en los años 2005 y 2010 de 278.87 ha y 278.24 ha respectivamente, mientras que en año 2015 existe un aumento en su espejo de agua de 285.44 ha, al contrario en el año 2020 existe una disminución en su espejo de agua siendo su superficie de 280.26 ha con respecto al año 2015.



**Figura 17**

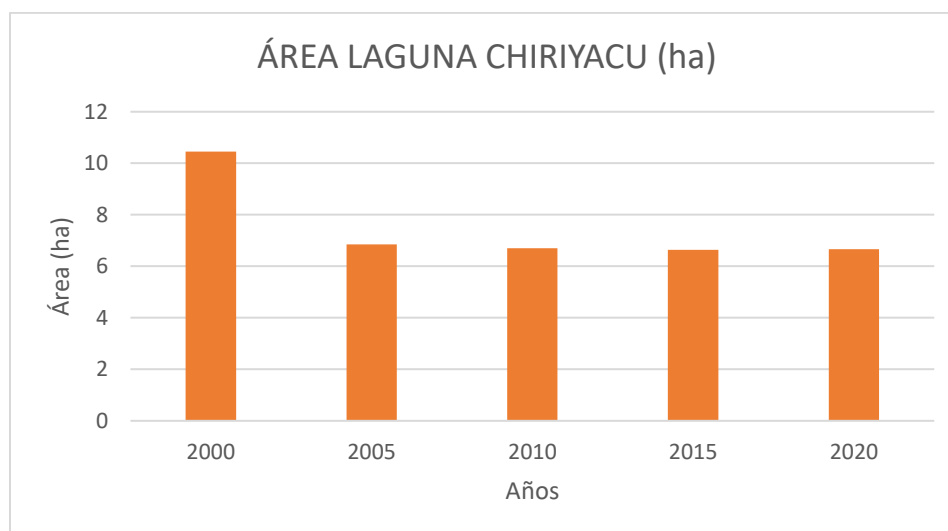
*Variación de la superficie de agua de la laguna Huarmicocha cada 5 años en el periodo del año 2000 al 2020*



De la misma manera, partiendo del año 2000 como base en la laguna de Huarmicocha, se observa que sigue la misma tendencia de la laguna de Caricocha (Ver Figura 16), por consiguiente, en los tres primeros años de estudio de esta laguna existe una reducción de su espejo de agua, siendo superficie de la laguna en el año 2000 de 13.78 ha, en el año 2005 de 12.11 ha y en el año 2010 de 12.08 ha, mientras que en el año 2015 existe un aumento de su espejo de agua, siendo su superficie de 12.44 ha, en cambio en el año 2020 existe una disminución en su espejo de agua con respecto al año 2015, siendo su superficie de 10.75 ha.

**Figura 18**

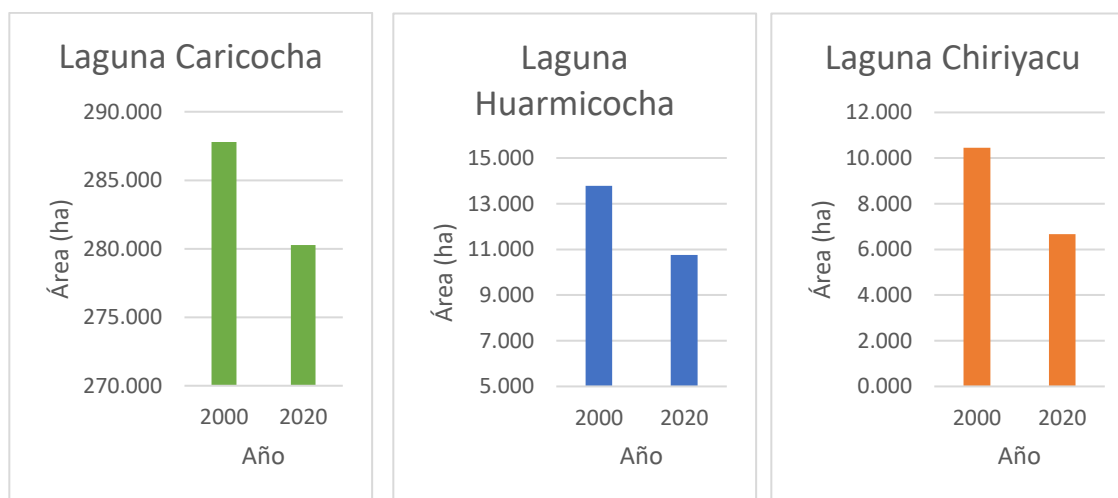
*Variación de la superficie de agua de la laguna Chiriyacu cada 5 años en el periodo del año 2000 al 2020*



Así mismo, partiendo del año 2000 como base en la laguna de Chiriyacu se observa un comportamiento distinto a las anteriores dos lagunas, pues, la disminución de su espejo de agua se tiene en los cuatro primeros años de estudio es decir en los años 2000, 2005, 2010 y 2015 con una superficie de 10.45 ha, 6.85 ha, 6.70 ha y 6.63 ha respectivamente, mientras que en el año 2020 existe un aumento de su espejo de agua con una superficie de 6.67 ha.

**Figura 19**

*Variación de la superficie de agua del sistema lacustre Mojanda (Laguna de Caricocha, Huarmicocha y Chiriyacu) en el periodo de 20 años.*



Finalmente, en la Figura 19 se puede observar que partiendo del año 2000 como base se evidencia una disminución de las tres lagunas que conforman el sistema lacustre Mojanda en el periodo de 20 años. Por lo tanto, en el año 2000 la laguna de Caricocha tiene una superficie de 287.78 ha mientras que en año 2020 tiene una superficie de 280.26 ha; la laguna de Huarmicocha en el año 2000 tiene una superficie de 13.78 ha mientras que en el año 2020 tiene una superficie de 10.75 ha y la laguna de Chiriyacu en el año 2000 tiene una superficie de 10.45 ha mientras que en el año 2020 tiene una superficie de 6.67 ha.

A continuación, para cada una de las coberturas lagunares, se presentan las tablas sobre el cambio absoluto y tasas de cambio del periodo seleccionado.

**Tabla 17***Cambio ocurrido en el espejo de agua en los años 2000-2005*

Laguna	Superficie 2000 - 2005				Cambio Absoluto		Tasa de cambio
	2000		2005		ha	%	%
	ha	%	ha	%			
<b>Caricocha</b>	287.80	92.23	278.87	93.63	-8.93	-3.10	-0.63
<b>Huarmicocha</b>	13.78	4.42	12.11	4.07	-1.67	-12.15	-2.56
<b>Chiriyacu</b>	10.45	3.35	6.85	2.30	-3.60	-34.42	-8.09
<b>Superficie Total</b>	312.03	100	297.83	100			

El cambio del espejo de agua se produjo con una mayor tasa de cambio en la laguna de Chiriyacu, con una disminución 3.60 ha que corresponde a un 8.09% en el periodo de 5 años, seguida de la laguna de Huarmicocha con una disminución de 1.67 ha que corresponde 2.56 % en el mismo periodo y, por último, pero de igual manera la laguna de Caricocha con una disminución de 8.93 ha que corresponde 0.63%.

**Tabla 18***Cambio ocurrido en el espejo de agua en los años 2005-2010*

Laguna	Superficie 2005 - 2010				Cambio Absoluto		Tasa de cambio
	2005		2010		ha	%	%
	ha	%	ha	%			
<b>Caricocha</b>	278.87	93.63	278.24	93.68	-0.63	-0.23	-0.05
<b>Huarmicocha</b>	12.11	4.07	12.08	4.07	-0.03	-0.25	-0.05
<b>Chiriyacu</b>	6.85	2.30	6.70	2.26	-0.15	-2.25	-0.45
<b>Superficie Total</b>	297.83	100	297.02	100			

El cambio del espejo de agua se produce con una mayor tasa de cambio en la laguna Chiriyacu que corresponde 0.45%, con una disminución de su superficie de 0.15 ha, mientras que las dos lagunas restantes tienen una menor tasa de cambio que corresponde 0.05%, sin embargo, la mayor disminución de superficie se presenta en la laguna de Caricocha con 0.63 ha, esto debido a que su área es la más extensa comparado con las dos lagunas restantes.

**Tabla 19**

*Cambio ocurrido en el espejo de agua en los años 2010-2015*

Laguna	Superficie 2010 - 2015				Cambio Absoluto		Tasa de cambio
	2010		2015		ha	%	%
	ha	%	ha	%			
<b>Caricocha</b>	278.24	93.68	285.44	93.74	7.20	2.59	0.51
<b>Huarmicocha</b>	12.08	4.07	12.44	4.08	0.36	2.97	0.59
<b>Chiriyacu</b>	6.70	2.26	6.63	2.18	-0.07	-0.98	-0.20
<b>Superficie Total</b>	297.02	100	304.51	100			

El cambio en el espejo de agua se da únicamente en la laguna de Chiriyacu con una disminución en su superficie de 0.07 ha que corresponde a una tasa de cambio 0.20 %, mientras que las lagunas de Caricocha y Huarmicocha tiene un incremento en su superficie de 7.20 ha y 0.36 ha respectivamente que corresponde a una tasa de cambio 0.51% y 0.59%, en el periodo de tiempo de 5 años.

**Tabla 20***Cambio ocurrido en el espejo de agua en los años 2015-2020*

Laguna	Superficie 2015 - 2020				Cambio Absoluto		Tasa de cambio
	2015		2020		ha	%	%
	ha	%	ha	%			
<b>Caricocha</b>	285.44	93.74	280.26	94.15	-5.18	-1.82	-0.37
<b>Huarmicocha</b>	12.44	4.08	10.75	3.61	-1.68	-13.52	-2.86
<b>Chiriyacu</b>	6.63	2.18	6.67	2.24	0.03	0.49	0.10
<b>Superficie Total</b>	304.51	100	297.68	100			

El cambio en el espejo de agua al contrario que en el anterior periodo existe un incremento en la laguna de Chiriyacu con 0.03 ha que corresponde a una tasa de cambio de 0.10%, mientras que las lagunas de Caricocha y Huarmicocha tienen una disminución en su superficie de 5.18 ha y 1.68 ha respectivamente que corresponde a una tasa de cambio de 0.37% y 2.86 %, en el periodo de tiempo de 5 años.

**Tabla 21***Cambio ocurrido en el espejo de agua en los años 2000-2020*

Laguna	Superficie 2000 - 2020				Cambio Absoluto		Tasa de cambio
	2000		2020		ha	%	%
	ha	%	ha	%			
<b>Caricocha</b>	287.80	92.23	280.26	94.15	-7.54	-2.62	-0.13
<b>Huarmicocha</b>	13.78	4.42	10.75	3.61	-3.03	-21.97	-1.23
<b>Chiriyacu</b>	10.45	3.35	6.67	2.24	-3.78	-36.21	-2.22
<b>Superficie Total</b>	312.03	100	297.68	100			

El cambio del espejo de agua en el periodo de 10 años es mucho más significativo que en los periodos de 5 años. En este periodo todas las lagunas que forman el sistema lacustre de Mojanda tienen una disminución de entre 3 ha a 7 ha (Ver Tabla 21). Siendo la laguna de Chiriyacu la que presenta una mayor disminución, con una tasa de cambio de 2.22% y con pérdida en su superficie de 3.78 ha.

Comparando con estudios anteriores se pretende analizar los resultados obtenidos desde dos perspectivas diferentes.

Según Granada, (2018) en su investigación sobre el ecoturismo de la microcuenca de la laguna de Mojanda menciona que la laguna de Caricocha tiene una superficie de 271 ha y la de Huarmicocha 11.4 ha, mientras que el GADP de Imbabura, (2020) en su Plan Provincial de Educación ambiental manifiesta que la laguna de Caricocha tiene una superficie de 256.7 ha, habiendo una fluctuación de 14.3 ha en el caso de la laguna de Caricocha.

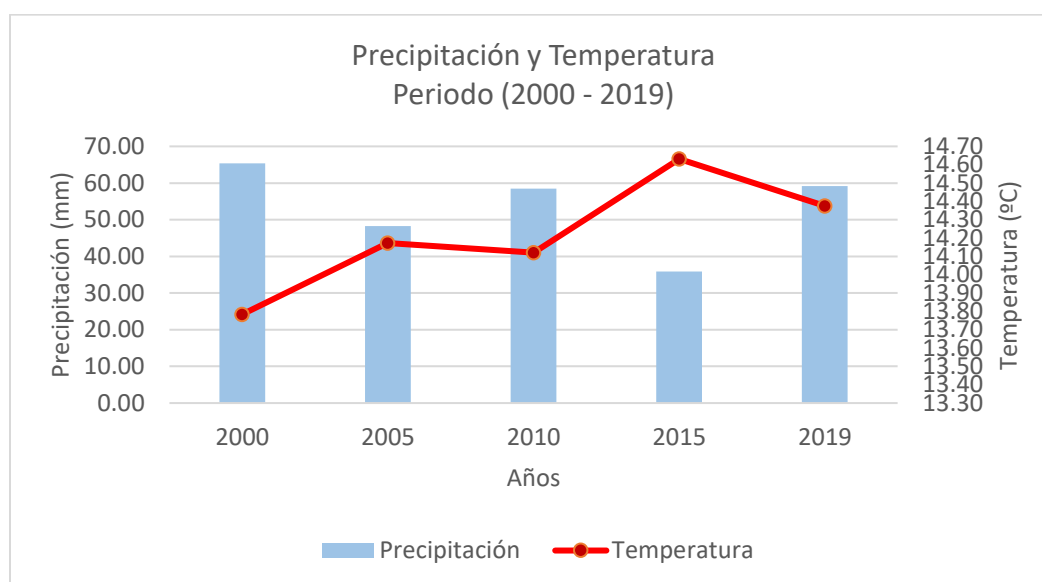
En la presente investigación se determinaron datos de la superficie de cada una de las lagunas pertenecientes al sistema lacustre Mojanda, dando como resultado para el periodo del año 2020 una superficie de 280.26 ha en el caso de la laguna Caricocha, 10.75 ha laguna Huarmicocha y 6.67 ha laguna Chiriyacu, que al ser comparadas con los estudios anteriores no indican relación, sin embargo, los estudios citados anteriormente no cuentan con un análisis técnico para la determinación de las superficies lagunares, que en el caso de esta investigación si lo hace mediante un análisis multitemporal que es corroborado con un índice kappa aceptable.

### ***Análisis multitemporal de las variables meteorológicas***

Para la obtención de los resultados, se analizan los datos mensuales obtenidos según la metodología indicada de las variables de temperatura, precipitación, evapotranspiración y humedad, mediante de la determinación de la tendencia. A continuación, se presentan los resultados.

**Figura 20**

*Variación multitemporal de las variables Precipitación y temperatura en el periodo 2000 – 2019*



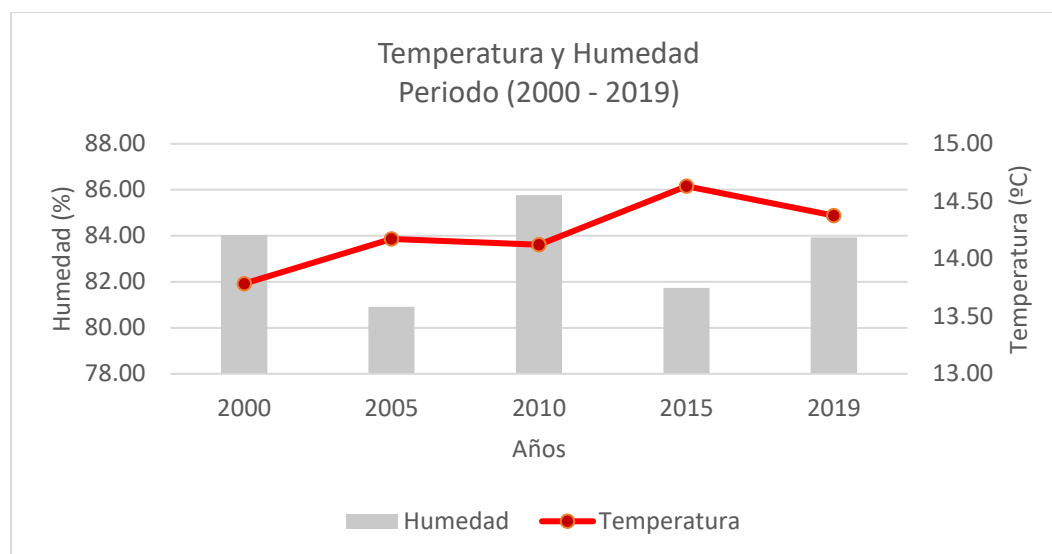
En la Figura 20 se muestran los valores de precipitación y temperatura anuales correspondientes a los años de estudio 2000, 2005, 2010, 2015 y 2019. Se calculo una media de temperatura de 14°C, el valor de 13.78°C que se encuentra por debajo de la media fue coincidente con un valor alto de precipitación de 65.36 mm registrado en el año 2000. De igual manera, el valor más alto de temperatura de 14.63°C que se encuentra por encima de la media fue coincidente con un valor bajo de precipitación de 35.86 mm registrado en el año 2015.



Sin embargo, se observan que las temperaturas más altas por encima de la media no siempre corresponden a los periodos de precipitaciones más bajas registradas en los años 2005, 2010 y 2019, por tal motivo, estas variables no se pueden incluir en el modelo de predicción.

**Figura 21**

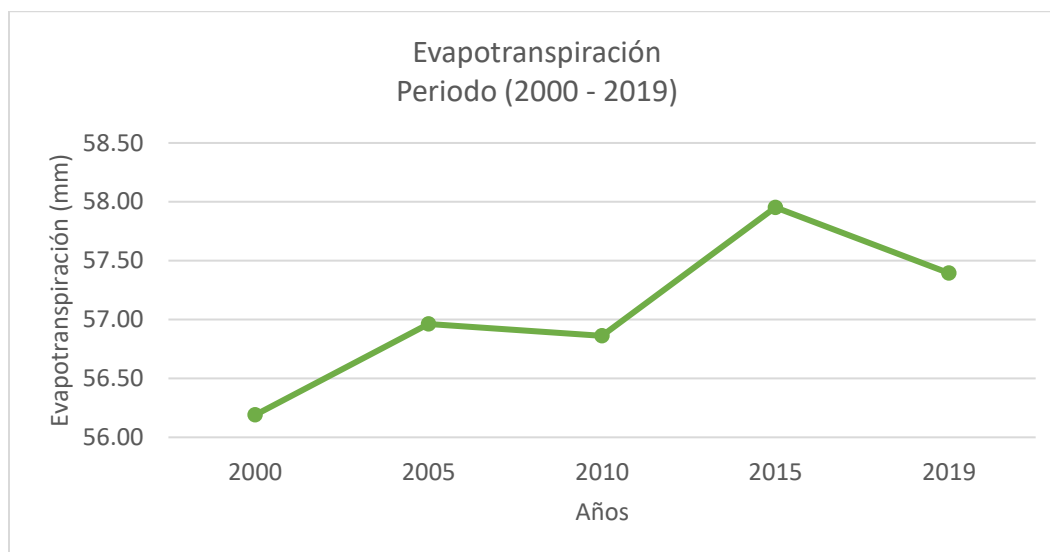
*Variación multitemporal de la variable Humedad Relativa en el periodo 2000 – 2019*



En la Figura 21 se muestran los valores de Humedad relativa y temperatura correspondientes a los periodos de estudio 2000, 2005, 2010, 2015 y 2019. Se observa que las temperaturas más bajas (13.78°C y 14.12°C) son coincidentes con la humedad relativa más alta (84.03% y 85.77%) registradas en los años 2000 y 2010. Así mismo, los valores más altos de temperatura (14.17°C, 14.63°C y 14.38°C) son coincidentes con los valores más bajos de humedad relativa (80.92%, 81.74% y 83.94%) registrados en los años 2005, 2015 y 2019.

**Figura 22**

*Variación multitemporal de la variable Evapotranspiración Potencial en el periodo 2000 – 2019*



En la Figura 22 se muestran los valores de evapotranspiración potencial correspondientes a los periodos de estudio 2000, 2005, 2010, 2015 y 2019. Se observa que sigue la misma tendencia de la temperatura de la Figura 23 ya que sus valores son inversamente proporcionales. Por consiguiente, la menor evapotranspiración se observa en el año 2000 mientras que la mayor evapotranspiración se observa en el año 2015.

Los resultados de este estudio se basan en los registros de observación mensual de los últimos 19 años de datos obtenidos por diferentes plataformas. Por consiguiente, los datos al no ser de una misma fuente de búsqueda requieren de homogenización ya que no existen datos nacionales de meteorología de los últimos 6 años.

Según (N. Pérez et al., 2020) en su estudio de cambio climático en un ecosistema alto andino en el periodo de 42 años (1976 – 2017) determina que existe un promedio de 48,23 mm de lluvia por año con una desviación estándar de 34,51 mm/año, este comportamiento, aunque puede parecer desorientador, no contradice los posibles efectos del cambio climático, en los cuales se menciona que los comportamientos graduales de la precipitación pueden

incrementarse o disminuir, pero, debe evidenciarse un aumento de eventos extremos, en cuanto a los datos de Temperatura Promedio fue de 13,46°C con una variación de 0,90°C y la humedad relativa de 59%.

En la presente investigación durante los últimos 19 años se determinó que existe una precipitación promedio de 53.41 mm con una desviación estándar de 39.28 mm/año, una temperatura promedio 14.22 °C con una variación de 0.60 °C, una humedad relativa promedio de 83.28% y una evapotranspiración potencial promedio de 57.07 mm. Según con el estudio mencionado anteriormente ha existido un incremento en los tres aspectos analizados en los últimos 2 años siendo uno de ellos la temperatura con un incremento de 0.80°C evidenciándose los posibles impactos del cambio climático, además de su incremento en la precipitación.

Un estudio desarrollado por (Leon et al., 2021) menciona que la mayoría de las investigaciones encontradas han evidenciado el análisis de datos reales y homogenizados, además de series de datos con más de 100 años de recolección, esto para países de Europa o Asia, sin embargo, en Sudamérica por consiguiente en Ecuador la recolección o toma de datos se ve afectada por diferentes circunstancias que hacen necesaria la búsqueda de metodologías que permitan un análisis real.

## **Resultados del modelo de predicción con Cadenas de Márkov**

### ***Resultados de la generación de áreas de transición***

En las tablas 22 y 23 se presentan las matrices de probabilidad de transición que identifican la probabilidad de cambio de una clase a otra en los diferentes periodos de tiempo analizados. En este caso, la clase de cuerpos de agua que representan a las lagunas Caricocha, Huarmicocha y Chiriyacu y áreas de la clase de otras coberturas

**Tabla 22***Matriz de probabilidad de transición del año 2015 al 2020*

<i>Clase</i>	<b>Cuerpos de Agua</b>	<b>Otras coberturas</b>
<b>Cuerpos de Agua</b>	0.9912	0.0088
<b>Otras coberturas</b>	0	1

Se puede observar que del año 2015 al 2020 existe una probabilidad de 0.0088 que la clase de cuerpos de agua cambie a la de otras coberturas y 0 de que la de otras coberturas cambie a cuerpos de agua. Por lo que no se evidencia posibilidad de que se regeneren las lagunas para el año 2020.

**Tabla 23***Matriz de probabilidad de transición del año 2015 al 2030*

<i>Clase</i>	<b>Cuerpos de Agua</b>	<b>Otras coberturas</b>
<b>Cuerpos de Agua</b>	0.9738	0.0262
<b>Otras coberturas</b>	0.0001	0.9999

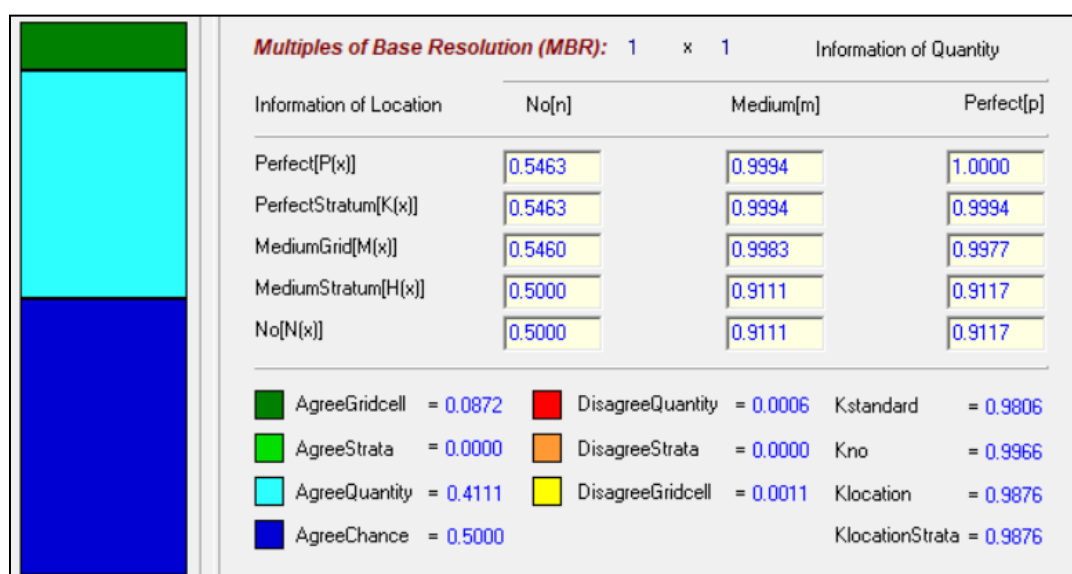
En el caso del año 2015 al 2030 la probabilidad de cambio de la clase cuerpos de agua a la de otras coberturas es de 0.0262 y de 0.0001 que cambie la de otras coberturas a cuerpos de agua. Esto muestra una mayor tendencia a la disminución del espejo de agua de las lagunas para el año 2030.

### Resultado de la validación del modelo de predicción

Los resultados de la validación del modelo de predicción de la reducción del espejo de agua de las lagunas se pueden observar en la Figura 23, la validación obtuvo un índice kappa de localización de 0.9876, de cantidad de 0.9966 y estándar o global de 0.9806. Estos estadísticos permitieron determinar que el modelo tiene una alta confiabilidad.

**Figura 23**

Validación del modelo de predicción

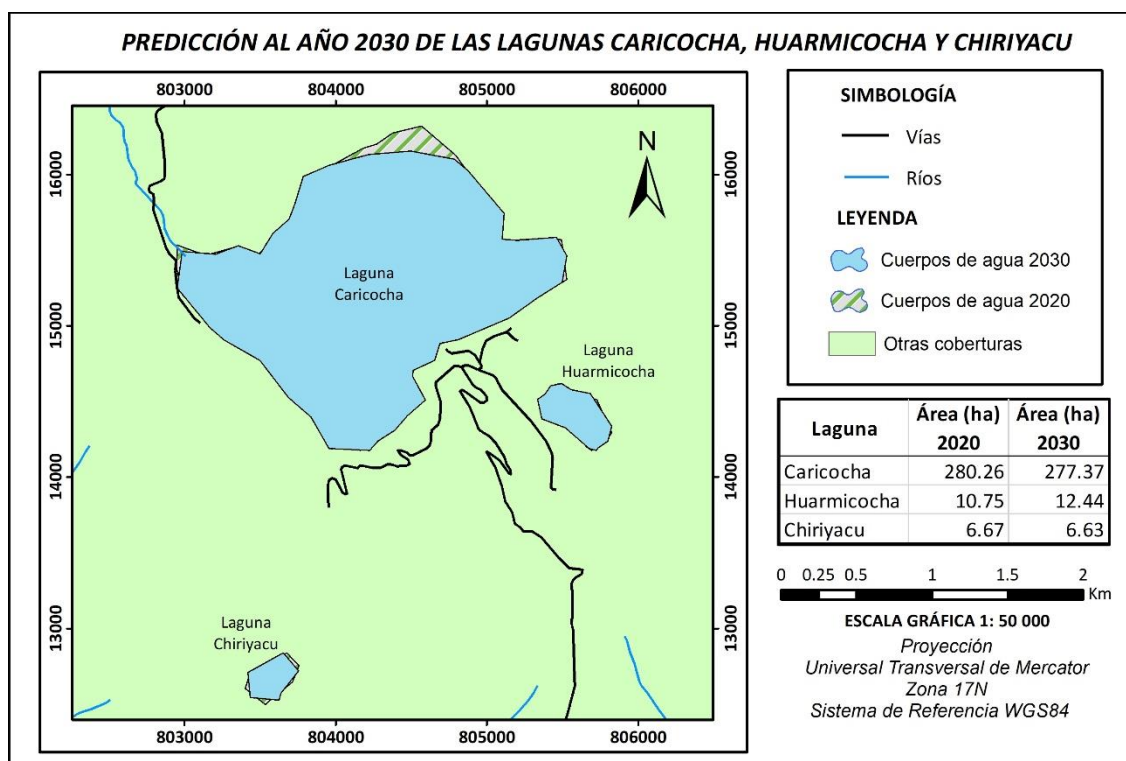


### Resultados de la proyección de la pérdida del espejo de agua al año 2030

Como resultado de la proyección de la pérdida de espejo de agua se generó la cobertura de superficies de agua que se muestra en la Figura 24 que corresponden a las áreas de las lagunas Caricocha, Chiriyacu y Huarmicocha para el año 2030.

Figura 24

Predicción al año 2030 de la reducción del espejo de agua de las lagunas Caricocha, Chiriyacu y Huarmicocha.



**Matriz de cambio de las proyecciones.** En la Tabla 24 se presenta el cambio absoluto y la tasa de cambio de las lagunas en el periodo proyectado tomando como referencia el año 2020.

Tabla 24

Cambio ocurrido en el espejo de agua en los años 2020-2030

Laguna	Superficie 2020 - 2030				Cambio Absoluto		Tasa de cambio
	2020		2030		ha	%	%
	ha	%	ha	%			
<b>Caricocha</b>	280.26	94.15	277.37	93.57	-2.89	-1.03	-0.10
<b>Huarmicocha</b>	10.75	3.61	12.44	4.20	1.69	15.72	1.47
<b>Chiriyacu</b>	6.67	2.24	6.63	2.24	-0.04	-0.60	-0.06

Laguna	Superficie 2020 - 2030				Cambio Absoluto		Tasa de cambio
	2020		2030		ha	%	%
	ha	%	ha	%			
<b>Superficie Total</b>	297.68	100	296.44	100			

La reducción del espejo de agua proyectado para el año 2030 en la laguna Caricocha es de 2.89 ha con una tasa de cambio de 0.10 % en un periodo de 10 años. Por otro lado, en la laguna Huarmicocha se produce un crecimiento de 1.69 ha que corresponde a una tasa de cambio de 1.47 % y la laguna Chiriyacu reduce 0.04 ha y una tasa de cambio de 0.06 %.

### Resultados de la caracterización de las propiedades fisicoquímicas de agua y sedimentos

#### *Parámetros físico químicos del agua*

En la Tabla 25 se presenta los resultados obtenidos de la medición in-situ de los parámetros físico químicos del agua de las Lagunas Caricocha, Huarmicocha y Chiriyacu.

**Tabla 25**

#### *Parámetros físico químicos del agua medidos in-situ*

Laguna	Código	CE us/cm	TDS ppm	T °C
Caricocha	A1	33	16	6
	A6	31	16	5
	Media	32	16	5.5
Huarmicocha	A3	30	15	7
	A4	33	16	6
	Media	31.5	15.5	6.5
Chiriyacu	A2	27	13	5
	A5	27	13	5

Laguna	Código	CE us/cm	TDS ppm	T °C
	Media	27	13	5

Según las muestras obtenidas en las lagunas Caricocha, Huarmicocha y Chiriyacu la conductiva eléctrica (CE) media se encuentra entre los valores de 32 us/cm, 31.5 us/cm y 27 us/cm, respectivamente. Estos datos se encuentran dentro del nivel permisible según la tabla 4 de Parámetros de los niveles de la calidad de agua para riego del Libro VI Anexo 1 del TULSMA.

Además, cabe mencionar que los valores obtenidos de CE son similares a los valores obtenidos en la investigación de Oña & Tonato (2017), donde los valores medios de conductividad son de 38.39 us/cm en la laguna de Caricocha, 36.73 us/cm en Huarmicocha y 27.65 us/cm en Chiriyacu, para lo cual consideran que el agua presente en las lagunas es pura al tener valores inferiores a <280 us/cm, basándose en los límites establecidos por Massol (2010).

Por otro lado, los Solidos Disueltos Totales (TDS) tuvieron concentraciones de 16 ppm, 15.5 ppm y 13 ppm en cada laguna, los cuales se encuentran dentro de los límites establecidos en la tabla 4 de Parámetros de los niveles de la calidad de agua para riego del Libro VI Anexo 1 del TULSMA.

La temperatura media de las lagunas es de 5.5°C en Caricocha, 6.5 ° C en Huarmicocha y en Chiriyacu de 5° C. La temperatura cumple con el criterio de calidad según la tabla 2 de Criterios de calidad admisibles para la preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces, marinas y de estuarios del Libro VI Anexo 1 del TULSMA.

En la Tabla 26 se muestra los resultados obtenidos del análisis de los parámetros físico químicos del agua analizados en laboratorio de las Lagunas Caricocha, Huarmicocha y Chiriyacu.



**Tabla 26***Parámetros físico químicos del agua analizados en laboratorio*

Laguna	Código	OD mg/l	Fosfatos mg/l	Fe mg/l	Mn mg/l	Nitratos mg/l	Sulfatos mg/l	pH
Caricocha	A1	7.42	<1,23	<0,10	<0,010	<1,00	<5,00	6.75
	A6	7.07	<1,23	<0,10	<0,010	<1,00	<5,00	6.79
	Media	7.25	<1,23	<0,10	<0,010	<1,00	<5,00	6.77
Huarmicocha	A3	6.93	<1,23	<0,10	<0,010	<1,00	<5,00	6.72
	A4	7.08	<1,23	<0,10	<0,010	<1,00	<5,00	7.02
	Media	7.01	<1,23	<0,10	<0,010	<1,00	<5,00	6.87
Chiriyacu	A2	6.6	<1,23	0.27	<0.010	<1,00	<5,00	6.76
	A5	5.85	1.27	0.63	0.035	<1,00	<5,00	6.84
	Media	6.23	1.27	0.45	0.035	<1,00	<5,00	6.8

En la laguna Caricocha el Oxígeno Disuelto medio es de 7.25 mg/l, en Huarmicocha de 7.01 mg/l y en Chiriyacu de 6.23 mg/l, estas concentraciones cumplen con los límites permisibles a la tabla 1,2 3 del Libro VI Anexo 1 del TULSMA.

Los datos de OD son parecidos a los obtenidos por Oña & Tonato (2017) en donde el OD en las lagunas Caricocha, Huarmicocha y Chiriyacu es de 7.23 mg/l , 7.61 mg/l y 7.01 mg/l, respectivamente. Según Goyenola (2007) con la concentración de OD entre 5 y 8 mg/l es una condición aceptable y adecuadas para la vida de la gran mayoría de especies de peces y otros organismos acuáticos.

Para concentraciones de Fosfatos en las lagunas Caricocha y Huarmicocha fue de <1,23 mg/l, estos valores no se pueden caracterizar. Mientras que en Chiriyacu se encuentran valores de <1,23 mg/l y de 1.27 mg/l y comparando con los Criterios Ecológicos de Calidad de Aguas del

acuerdo mexicano CE-CCA-001/89 (SEDUE, 1989), la laguna Chiriyacu se encuentra fuera de los límites establecidos con la concentración de 1.27 mg/l.

En las lagunas Caricocha y Huarmicocha las concentraciones de Hierro son de <0,10 mg/l, este valor es aceptable para los niveles permisibles de la tabla 1,2 y 3 del Libro VI Anexo 1 del TULSMA por ser menor 1 mg/l, 0.3 mg/l y 5 mg/l, que corresponde a los límites máximos de cada tabla, respectivamente. En Chiriyacu el valor medio es de 0.45 mg/l, este valor está dentro de los niveles permisibles según la tabla 1 y 3, pero no de la tabla 2 del del mismo libro.

El Manganeseo en las lagunas Caricocha y Huarmicocha es de <0.010 mg/l y para Chiriyacu se encuentra entre <0.010 mg/l y 0.035 mg/l. Estos valores son menores a 0.1 mg/l y 0.2 mg/l, los cuales están dentro de los criterios de calidad según la tabla 1,2 y 3 del Libro VI Anexo 1 del TULSMA.

En las tres lagunas encontramos un valor de <1,00 mg/l para la concentración de Nitratos, esta concentración está dentro de los limites permisibles de la tabla 1 de Criterios de Calidad de Fuentes de Agua para Consumo Humano y Doméstico por ser menor a 50 mg/l, y en el caso de Sulfatos de <5,00 mg/l que cumple con los límites de la tabla 1 y 3 del libro por ser menor a 500 mg/l y 250 mg/l.

Finalmente, en las lagunas Caricocha, Huarmicocha y Chiriyacu el ph medio en el agua fue de 6.77, 6.87 y 6.8, respectivamente, encontrándose en los valores permisibles según las tablas 1,2 y 3 del Libro VI Anexo 1 del TULSMA. Estos valores de pH se consideran ligeramente ácidos.

**Parámetros físico químicos de los sedimentos**

En las Tablas 27,28 y 29 se indica los resultados obtenidos de los parámetros físico químicos de sedimentos analizados en laboratorio de las Lagunas Caricocha, Huarmicocha y Chiriyacu.

**Tabla 27**

*Parámetros físico químicos de sedimentos analizados en laboratorio de la Laguna Caricocha*

Código	Referencia	MO %	COT %	Fe mg/kg	Mn mg/kg	pH	C.E uS/cm	Textura %
S1	Dentro del agua	3.70	2.15	3415.4	32.34	5.78	25.9	Franco Arenoso Arcilla 6.99 Limo 11.86 Arena 81.15
S1.1	Fuera del agua	1.76	1.02	6385.3	43.93	5.64	18.5	Franco Arenoso Arcilla 9,78 Limo 23,57 Arena 66,65
S6	Dentro del agua	12.89	7.48	24709.0	467.69	5.92	28.8	Franco Arenoso Arcilla 9.14 Limo 21.20 Arena 69.66
S6.1	Fuera del agua	9.51	5.52	37156.8	741.07	5.80	41.4	Franco Arenoso Arcilla 8,92 Limo 13,42 Arena 77,66
Media		6.97	4.04	17916.6	321.258	5.79	28.7	Franco Arenoso

**Tabla 28***Parámetros físico químicos de sedimentos analizados en laboratorio de la Laguna Huarmicocha*

Código	Referencia	MO %	COT %	Fe mg/kg	Mn mg/kg	pH	C.E uS/cm	Textura %
S3	Dentro del agua	12.48	7.24	12092.7	211.85	5.64	35.1	Franco Arenoso Arcilla 5.71 Limo 25.50 Arena 68.79
S3.1	Fuera del agua	31.57	18.31	16325.1	565.61	6.03	41.5	Sin dato
S4	Dentro del agua	14.85	8.61	12722	226.76	5.67	34.8	Franco Arenoso Arcilla 7.14 Limo 23.49 Arena 69.37
S4.1	Fuera del agua	35.48	20.58	47027.9	157.80	5.82	33.7	Sin dato
Media		23.60	13.685	22041.9	290.505	5.79	36.3	Franco Arenoso

**Tabla 29***Parámetros físico químicos de sedimentos analizados en laboratorio de la laguna Chiriyacu*

Código	Referencia	MO %	COT %	Fe mg/kg	Mn mg/kg	pH	C.E uS/cm	Textura %
S2	Dentro del agua	5.52	3.20	11663.9	224.74	5.61	11.8	Franco Arenoso Arcilla 9.06 Limo 23.72 Arena 67.22

Código	Referencia	MO %	COT %	Fe mg/kg	Mn mg/kg	pH	C.E uS/cm	Textura %
S2.1	Fuera del agua	6.05	3.51	11650.4	153.85	5.34	31.9	Franco Arenoso Arcilla 8.07 Limo 31.64 Arena 60.29
S5	Dentro del agua	9.82	5.70	9714.4	46.63	5.44	28.4	Franco Arenoso Arcilla 11.06 Limo 31.43 Arena 57.51
S5.1	Fuera del agua	5.42	3.14	6463.3	53.74	6.04	21.2	Franco Arenoso Arcilla 9.14 Limo 21.20 Arena 69.66
Media		6.70	3.89	9873.0	119.74	5.61	23.3	Franco Arenoso

En la laguna Caricocha el porcentaje medio de materia orgánica es de 6.97%, en Huarmicocha de 23.60 % y en Chiriyacu de 6.70%. La materia orgánica en los sedimentos de las lagunas es alta, al tener un porcentaje promedio mayor a 2.8%.

El pH de los sedimentos es ligeramente ácido, en las lagunas Caricocha y Huarmicocha es de 5.7 y en Chiriyacu de 5.61. El pH ácido en los sedimentos favorece a la disponibilidad de Manganeso y Hierro ya que el pH óptimo para manganeso está entre 5 y 6.5 y para hierro entre 3.5 a 6.5 (Ramírez, 1997).

La conductividad eléctrica media de los sedimentos en la laguna Caricocha es de 28.7 uS/cm y en las lagunas Huarmicocha y Chiriyacu de 23.3 uS/cm. Por lo tanto, la conductividad eléctrica en las tres lagunas es baja y según la clasificación de Andrades & Martínez, (2014) son suelos no salinos.

La textura de los sedimentos en las tres lagunas es Franco Arenosos, este tipo de textura se caracteriza por tener una muy buena aireación y rápida permeabilidad por lo que su capacidad de retención de agua es muy baja (León, 2000).

### ***Análisis estadístico entre las propiedades fisicoquímicas***

La Tabla 30 indica la reducción de las Lagunas Caricocha, Huarmicocha y Chiriyacu en los puntos de muestreo comparando las áreas del año 2000 y 2020.

**Tabla 30**

*Reducción del espejo de agua del año 2000 al 2020*

<b>Laguna</b>	<b>Código de la muestra</b>	<b>Reducción (m)</b>
Caricocha	S1	1.13
	S6	14.47
Huarmicocha	S3	6.6
	S4	19.87
Chiriyacu	S2	30.46
	S5	28.86

La reducción del espejo de agua en los puntos de muestreo que se puede considerar más significativa es en la Laguna Chiriyacu, por sus reducciones de 30.46 m y 28.86 m de reducción en cada punto.

La relación entre las variables fisicoquímicas de sedimentos obtenidas mediante el coeficiente de correlación (r) de Person se muestran en las Tablas 31,32 y 33.

**Tabla 31***Coefficientes de correlación de Person Laguna Caricocha*

	MO %	COT %	Fe mg/kg	Mn mg/kg	pH	CE uS/cm	Reducción (m)
MO %	1.0000						
COT %	1.0000	1.0000					
Fe mg/kg	0.8008	0.8008	1.0000				
Mn mg/kg	0.8111	0.8111	0.9980	1.0000			
pH	0.9090	0.9090	0.5386	0.5694	1.0000		
CE uS/cm	0.6463	0.6463	0.8853	0.9084	0.5166	1.0000	
Reducción (m)	0.9509	0.9509	0.9446	0.9463	0.7547	0.7805	1.0000

Los coeficientes de correlación en la Laguna Caricocha nos permite establecer que la reducción del espejo de agua en los puntos de muestreo tiene una correlación altamente significativa con todos los parámetros fisicoquímicos analizados, en especial con él % MO ( $r = 0.9509$ ), % COT ( $r = 0.9509$ ), Fe ( $r = 0.9446$ ) y Mn ( $r = 0.9463$ ).

**Tabla 32***Coefficientes de correlación de Person Laguna Huarmicocha*

	MO %	COT %	Fe mg/kg	Mn mg/kg	pH	CE uS/cm	Reducción (m)
MO %	1.0000						
COT %	1.0000	1.0000					
Fe mg/kg	0.7591	0.7591	1.0000				
Mn mg/kg	0.3164	0.3164	-0.3759	1.0000			
pH	0.8025	0.8025	0.2217	0.8199	1.0000		
CE uS/cm	0.3005	0.3005	-0.3869	0.9977	0.8090	1.0000	
Reducción (m)	0.1561	0.1561	0.5396	-0.6105	-0.2914	-0.6615	1.0000

En la Laguna Huarmicocha no se puede encontrar una correlación muy fuerte entre la reducción de la laguna y ninguno de los parámetros analizado. Aun así, existe una fuerte correlación entre la reducción y la conductividad eléctrica CE (-0.6615), la concentración de Fe ( $r = 0.5396$ ) y Mn ( $r = -0.6105$ ).

**Tabla 33**

*Coefficientes de correlación de Person Laguna Chiriyacu*

	<i>MO</i> %	<i>COT</i> %	<i>Fe</i> mg/kg	<i>Mn</i> mg/kg	<i>pH</i>	<i>CE</i> uS/cm	<i>Reducción</i> (m)
MO %	1.0000						
COT %	1.0000	1.0000					
Fe mg/kg	0.0390	0.0390	1.0000				
Mn mg/kg	-0.5392	-0.5392	0.7728	1.0000			
pH	-0.4656	-0.4656	-0.8444	-0.3176	1.0000		
CE uS/cm	0.4758	0.4758	0.0160	-0.5046	-0.4968	1.0000	
Reducción (m)	-0.5053	-0.5053	0.8406	0.9402	-0.4949	-0.1918	1.0000

Según los coeficientes de correlación en la Laguna Chiriyacu existe una correlación muy fuerte entre la reducción del espejo de agua y el contenido de Fe ( $r = 0.8406$ ) y Mn ( $r = 0.9402$ ), al igual que entre estos dos elementos ( $r = 0.7728$ ).

Con el análisis de los coeficientes de correlación de las tres lagunas y encontrando una semejanza entre ellas se observa que la reducción de las lagunas se puede evidenciar con la variación de las concentraciones tanto de Fe y Mn.

En la Laguna Huarmicocha se observa que existe movilización de Mn en el punto de muestra S4.1 al S4 en vista que la concentración de Mn dentro del agua es de 226.76 mg/l, siendo esta mayor a la concentración fuera del agua que es de 157.8 mg/l (ver Tabla 28). Por lo tanto, se puede determinar que existe un proceso de reducción del Mn que le permite



movilizarse. Sin embargo, el Fe no se está movilizándose por las concentraciones que este mineral presenta fuera y dentro del agua. Estas características en la laguna permiten evidenciar un proceso nuevo de reducción del espejo de agua en ese punto, ya que en un proceso de reducción el primero en movilizarse será el Mn y posteriormente el Fe.

Por el contrario, en el punto S3.1 no se identifica movilización de Fe ni de Mn al punto S3, por ello no se puede evidenciar una relación entre la reducción de la laguna y el contenido de estos metales en este punto.

En cuanto a La Laguna Chiriyacu presenta otro comportamiento, como se puede ver en la Tabla 29 en el punto S5.1 se moviliza el Fe al punto S5 por sus concentraciones de 9714.4 mg/l dentro del agua y de 6463.3 mg/l fuera del agua. Pero las concentraciones de Mn son extremadamente pequeñas (46.63 mg/l dentro del agua y 53.74 mg/l fuera del agua), estas concentraciones muestran que el Mn ya no se encuentra soluble, es así como se puede identificar que es un proceso antiguo de reducción, en donde el primero en movilizarse fue el Mn y posteriormente el Fe. En cambio, en el punto S2.1 el proceso de reducción es nuevo puesto que el primero en movilizarse es el Mn al punto S2 (con concentraciones de 224.74 mg/l dentro del agua y 153.85 fuera del agua), pero no se detecta movilización de Fe muy significativa ya que las concentraciones son 11663.9 mg/l y 11650.4 mg/l fuera y dentro del agua, respectivamente.

Finalmente, y como se puede ver en la Tabla 27 en el caso de la Laguna Caricocha no se puede encontrar procesos de movilización de Fe y Mn, pero es importante mencionar que las concentraciones de Mn en el punto S1 y S1.1 son extremadamente bajas (32.34 mg/l dentro del agua y 43.93 mg/l fuera del agua), denotando que sí pudo haber solubilidad de este mineral en el pasado y a la vez una pequeña reducción de la laguna.

## Capítulo V

### Conclusiones y Recomendaciones

#### Conclusiones

Se determinó que, a partir de la obtención de imágenes satelitales en estudios de pequeña a mediana escala, se logra obtener información que permite discriminar la dinámica de las lagunas y los umbrales del Índice Diferencial Normalizado de Agua.

Mediante la validación de la clasificación de coberturas de agua obtenidas por modelos de índice espectral NDWI, se puede afirmar que este método es ideal para identificar cuerpos de agua. Del cual se desprende un análisis estadístico en el periodo de estudio 2000 – 2020 que demuestra la variación del espejo de agua de las tres lagunas de Mojanda.

La información cuantitativa de los datos meteorológicos fue escaso y poco uniforme, es por ello por lo que a nivel local no ayudan a identificar una tendencia clara en el área de estudio. En este aspecto tampoco ayudan a mejorar el modelo de predicción para simular la pérdida del espejo de agua de las lagunas al año 2030.

Existe poca claridad sobre los posibles efectos del cambio climático debido a la falta de datos específicos, por ello, no es posible presentar escenarios precisos basados en información científica. No obstante, se presenta información meteorológica para la zona de estudio, algunos datos de plataformas mundiales donde no existían datos y otros de la estación meteorológica Tomalon que es la más cercana al área de trabajo.

La utilización de la percepción remota ha posibilitado el estudio del espejo de agua de las tres lagunas de Mojanda (Huarmicocha, Chiriyacu y Caricocha) mediante el uso de imágenes satelitales Landsat en un periodo de 20 años evidenciando la disminución de su superficie

lagunar, siendo de 2.62% para la laguna de Caricocha, 21.97% para la laguna de Huarmicocha y de 36.21% para la laguna de Chiriyacu.

Según las matrices de probabilidad de transición de la modelación con Cadenas de Márkov existe mayor probabilidad que se reduzcan las lagunas a que las áreas sin cuerpos de agua se regeneren, comprobando así que es de vital importancia prevenir su reducción futura.

La validación del modelo de predicción con Cadenas de Márkov obtuvo un índice kappa global del 98.06% lo que demuestra que el modelo es de alta confiabilidad y puede ser usado para la predicción de la reducción de los cuerpos de agua con un nivel alto de veracidad.

La reducción del espejo de agua proyectada para el año 2030 se da en las lagunas Caricocha y Chiriyacu, mientras que en la laguna Huarmicocha aumenta. Aunque existe una reducción en las dos lagunas, no es de gran magnitud ya que las tasas de cambio son de 0.10 % para Caricocha y 0.06 % para Chiriyacu en un periodo de 10 años.

Según los parámetros de pH, conductiva eléctrica (CE), oxígeno disuelto, sólidos disueltos totales (TDS), sulfatos, nitratos, manganeso y hierro en el agua, las lagunas se encuentran dentro de los niveles de la calidad de agua para riego.

Las lagunas cumplen con los niveles permisibles para fuentes de agua para consumo humano y doméstico según el pH, oxígeno disuelto (OD), concentración de nitratos, sulfatos, manganeso y hierro.

Para preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces, marinas y de estuarios las lagunas están dentro de los límites permisibles según los parámetros de temperatura, pH, oxígeno disuelto y manganeso. Pero en el caso de la concentración de hierro el límite permisible se cumple solo en las lagunas Caricocha y Huarmicocha, y no en la laguna Chiriyacu. Además, según la concentración de fosfatos la laguna Chiriyacu tampoco cumple con los Criterios Ecológicos de Calidad de Aguas del acuerdo mexicano CE-CCA-001/89.

Los sedimentos de las lagunas tienen un pH ácido y alta cantidad de materia orgánica, estos factores influyen en disponibilidad de hierro y manganeso. Además de que, la cantidad de materia orgánica favorece al proceso de oxidación-reducción de estos minerales.

De acuerdo con las concentraciones de Fe y Mn en los sedimentos de las lagunas se determinó que, la laguna Huarmicocha se encuentra en un proceso nuevo de reducción del espejo de agua en el área que comprende el punto S4 y S4.1, ya que el Mn se está movilizándose hacia la laguna, pero el Fe no.

En la laguna Caricocha no se encontró movilización de Fe y Mn y se puede concluir que no se encuentra en estado de reducción, aunque según las bajas concentraciones de Mn en el punto S1 y S1.1 muestran que pudo haber una pequeña reducción de la laguna en el pasado.

En la laguna Chiriyacu se identifica un proceso antiguo de reducción en el punto S5 y S5.1 por las bajas concentraciones de Mn y movilización de Fe, pero en el punto S2 y S2.1 este proceso es nuevo por la movilización de Mn y no de Fe. Es así como la laguna con mayor evidencia de reducción de su espejo de agua es la laguna Chiriyacu, con una reducción pasada y otra en el presente.

Con la combinación de los resultados del análisis multitemporal de imágenes satelitales y la caracterización físico-química de las muestras de agua y sedimentos se concluye que la laguna que presenta una reducción evidente es la laguna Chiriyacu, no solo por lo que se puede observar en el tiempo sino también por lo que se puede observar en los procesos geoquímicos de las lagunas.

## Recomendaciones

Para realizar un análisis multitemporal con imágenes satelitales es recomendable obtener imágenes que hayan sido tomadas en las mismas épocas del año, puesto que los cambios climatológicos durante el año pueden ocasionar diferente comportamiento en los cuerpos de agua.

Se sugiere que se incluyan variables meteorológicas de estaciones cercanas a la zona y que sean datos de entidades nacionales, en el caso del país el INAMHI, para que el nivel de error e incertidumbre del análisis sea bajo y de alta confiabilidad.

Se recomienda tomar más muestras de agua y sedimentos en cada laguna, para observar el comportamiento de las concentraciones de Hierro y Manganeseo en toda el área de las lagunas y poder analizar de una manera más completa la reducción de su espejo de agua.

Siendo la laguna Chiriyacu la laguna en la cual se pudo evidenciar su reducción y tomando en cuenta que tiene una baja capacidad de recarga, es importante dar periodos de recuperación para evitar la pérdida de su espejo de agua. Esto se puede lograr mediante la utilización moderada de este recurso hídrico, y si es posible, impedir su aprovechamiento hasta lograr su regeneración.

Para el resguardo de las lagunas de Mojanda se recomienda proteger y vigilar las actividades turísticas de la zona, además de mantener una baja accesibilidad vehicular para evitar las malas prácticas alrededor de las lagunas, que pueden ocasionar la erosión del suelo que se encuentra alrededor de las lagunas, ocasionando así la sedimentación de estas.

Realizar planes sociales de sensibilización a la población aledaña y a turistas sobre la importancia que tienen las lagunas al ser un recurso hídrico no renovable, y un ecosistema del cual dependen seres vivos, como flora y fauna del lugar.

### Referencias Bibliográficas

- Abraira, V. (2000). El índice kappa. In *Notas estadísticas* (p. 247).
- Acevedo-Sandoval, O., Ortiz-Hernández, E., Cruz-Sánchez, M., & Cruz-Chávez, E. (2004). El papel de óxidos de hierro en suelos. *Terra Latinoamericana*, 22(4), 485–497.  
<http://www.redalyc.org/pdf/573/57311096013.pdf>
- Agron, C. (2021). *Guía didáctica*.  
[http://instipp.edu.ec/instipp/assets/pdf/guias/manuel/s1\\_metereologia.pdf](http://instipp.edu.ec/instipp/assets/pdf/guias/manuel/s1_metereologia.pdf)
- Aguilar, H., Mora, R., & Vargas, C. (2014). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, Rapideye, Spot 2 y Landsat 8 con módulo Flaash del software ENVI. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53), 1–22. <https://doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>
- Aguilar, J. (2017). Análisis de tendencias de temperatura y precipitación pluvial en la cuenca del río Ilave. In *Universidad Nacional del Antiplano*.  
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/5108>
- ALS Ecuador, 2 (2021) (testimony of ALS). [www.alsglobal.com](http://www.alsglobal.com)
- Álvarez-Iglesias, P., & Rubio, B. (2012). Early diagenesis of organic-matter-rich sediments in a ría environment: Organic matter sources, pyrites morphology and limitation of pyritization at depth. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 100, 113–123.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.01.005>
- Andrades, M., & Martínez, M. (2014). *Fertilidad del suelo y parámetros que la definen* (3ra Edición). Universidad de La Rioja. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=267902>
- Antón, A. (2019). Análisis evaluativo de índices espectrales en imágenes de satélite. *Universidad Politécnica de Madrid*, 8(5), 55. <https://oa.upm.es/54220/>
- Arboleda Valencia, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Editorial McGraw Hill.
- Arevalo, D., & Duarte, J. (2021). *Análisis multitemporal de la cobertura vegetal y la degradación en la extensión de la cobertura de páramo – subcuenca San José - páramo el Rabanal* [Universidad Santo Tomás]. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/33722>
- Ariza Ortiz, A., Roa Melgarejo, O. J., Serrato, P. K., & León Rincón, H. A. (2018). Uso de índices espectrales derivados de sensores remotos para la caracterización geomorfológica en zonas insulares del Caribe colombiano. *Perspectiva Geográfica*, 23(1), 105–122.  
<https://doi.org/10.19053/01233769.5863>
- Bauder, J., & Sigler, A. (2017). Alcalinidad, pH y Sólidos Disueltos Totales. *Northern Plains and Mountains*. [http://region8water.colostate.edu/PDFs/we\\_espanol/Alkalinity\\_pH\\_TDS\\_2012-11-15-SP.pdf](http://region8water.colostate.edu/PDFs/we_espanol/Alkalinity_pH_TDS_2012-11-15-SP.pdf)
- Bolaños-Alfaro, J. D., Cordero-Castro, G., & Segura-Araya, G. (2017). Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). *Revista Tecnología En Marcha*, 30(4), 15–27. <https://doi.org/10.18845/tm.v30i4.3408>
- Borràs, J., Delegido, J., Pezzola, A., Pereira, M., Morassi, G., & Camps-Valls, G. (2017). Clasificación de usos del suelo a partir de imágenes sentinel-2. *Revista de Teledetección*, 48, 55–66. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7133>
- Bravo Morales, N. F. (2017). Teledetección Espacial LANDSAT, SENTINEL-2, ASTER L1T y MODIS. *Geomática Ambiental*, 1, 105. <https://sites.google.com/view/geomatica-ambiental-srl/>
- Büttner, G., Feranec, J., Jaffrain, G., Mari, L., Maucha, G., & Soukup, T. (2004). The CORINE land cover 2000 project. *EARSeL EProceedings*, 3(3), 331–346.

- Cahuana, A., & Yugar, W. (2009). Material De Apoyo Didactico Para La Enseñanza Y Aprendizaje De La Asignatura De Hidrologia Civ-233. *Universidad Mayor de San Simón, 1*, 414. <https://drive.google.com/file/d/1ZOj42qfAiADdeQukAsx7UjjpgWy9g8U-v/view>
- Calderón, M. J. (2018). Oferta hídrica, almacenamiento de agua y carbono en dos escenarios altoandinos del páramo de Mojanda-Ecuador. In *Universidad Nacional de la Plata*. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/69324>
- Camacho-Sanabria, J. M., Pérez, J. I. J., Jaimes, N. B. P., Vargas, E. G. C., Peña, L. C. B., & López, M. S. (2015). Coverage/land use changes in a portion of the mountainous mexican transition zone. *Madera y Bosques, 21*(1), 93–112. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.211435>
- Camacho, M. (2013). *Los páramos ecuatorianos: caracterización y consideraciones para su conservación y aprovechamiento sostenible* (Vol. 1) [Universidad Central del Ecuador]. <https://doi.org/10.29166/anales.v1i372.1241>
- Canada Centre for Remote Sensing. (2019). *Remote Sensing Tutorials*. <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/satellite-imagery-and-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/9309>
- Cargua, S., & Cueva, M. (2018). Establecimiento de patrones de respuesta espectral del agua que recibe descargas líquidas por actividades florícolas y urbanas en la microcuenca del Río Blanco. In *Universidad Central del Ecuador* (Vol. 2). <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/15057>
- Carreira, D. (2011). Cuantificación de la Materia Orgánica del suelo. Método de WALKLEY & BLACK. *Jornadas de Actualización: Gestión de La Calidad En Los Laboratorios de Análisis de Suelos Agropecuarios.*, 8. [https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-analisis\\_de\\_c\\_y\\_n.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-analisis_de_c_y_n.pdf)
- Castellvi, F., & Snyder, R. (2010). A New Procedure Based on Surface Renewal Analysis to Estimate Sensible Heat Flux : A Case Study over Grapevines. *Journal of Hydrometeorology, 11*, 496–508. <https://doi.org/10.1175/2009JHM1151.1>
- Castilla, C. (2015). Descripción de indicadores. *Colegio de Biologos de España, 3*.
- Ccaira, C. (2018). Efecto de la temperatura y precipitación sobre la agricultura en la cuenca Coata - Puno [Universidad Nacional del Altiplano]. In *Universidad Nacional del Altiplano*. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3278292>
- Cervantes, E. (2014). *Clasificación de imágenes satelitales mediante el uso de memorias asociativas* [Instituto Politécnico Nacional]. [https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/17898/Clasificacion de imagenes satelitales mediante el uso de memorias asociativas.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/17898/Clasificacion%20de%20imagenes%20satelitales%20mediante%20el%20uso%20de%20memorias%20asociativas.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Choque, C. (2021). Estimación de la evapotranspiración a partir de datos satelitales para la región de Alto Beni, norte de La Paz. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales, 8*, 45–53. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2409-16182021000100045&script=sci\\_abstract](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2409-16182021000100045&script=sci_abstract)
- Chúa A., A. (2017). Desarrollo y calibración de un sistema informático para el análisis de tormentas, máximas avenidas y generación de lluvia esorrentía. *Universidad Nacional Agraria La Molina - Facultad De Ingeniería Agrícola, 1*–245. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2947/P40-C28-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chuncho Morocho, C., & Chuncho, G. (2019). Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión. *Bosques Latitud Cero, 9*(2), 71–83.

- [https://www.researchgate.net/publication/344180955\\_Paramos\\_del\\_Ecuador\\_importancia\\_y\\_afectaciones\\_Una\\_revisión](https://www.researchgate.net/publication/344180955_Paramos_del_Ecuador_importancia_y_afectaciones_Una_revisión)
- Chuvienco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial* (2da Edición). RIALP, S.A.
- Cohen, J. (1960). A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37–46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>
- Congedo, L. (2012). *Landsat conversion to TOA reflectance and brightness temperature*. <https://semiautomaticclassificationmanual.readthedocs.io/es/latest/landsatTab.html>
- Coronado, L. (2001). *Comprobación de técnicas de procesamiento de imágenes del sensor remoto ETM+ de Landsat 7, en la identificación de Bosques Secundarios en la Región Hueta Norte de Costa Rica*. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/434>
- De la Cuadra, F. (2013). Cambio climático, movimientos sociales y políticas públicas. Una vinculación necesaria. *Polis, Revista Latinoamericana*, 12(36), 525–532. <https://doi.org/10.4067/S0718-65682013000300023>
- Eastman, R. (2012). IDRISI Selva. Guía para SIG y procesamiento de imágenes. In A. Ravelo (Ed.), *Clark University* (Vol. 17). <https://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/10/IDRISI-Selva-Spanish-Manual.pdf>
- Espina, S., & Venegas, C. (2005). *Ecofisiología y contaminación* (J. Botello, G. Rendón von Osten, Gold Bouchot, & Agraz-Hernández (eds.); 2da Edición). Universidad Autónoma de Campeche.
- Espinoza, B. (2007). Cadenas de Markov. Procesos estocásticos. *Facultar de Agronomía*, 103–127. [http://www.ugr.es/~bioestad/\\_private/cpfund10.pdf](http://www.ugr.es/~bioestad/_private/cpfund10.pdf)
- FAO. (n.d.). *Textura del suelo*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. [https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706s/!337911x6706s06.htm](https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/!337911x6706s06.htm)
- FAO. (1996). *Forest resources assessment 1990 Survey of tropical forest cover and study of change processes*. <http://www.fao.org/3/w0015e/w0015e00.htm>
- Fernández, E., & García, M. (2006). *Gestión de la recarga artificial de acuíferos (M.A.R.)* (Grafinat (ed.); 2da edición). Serie Hidrología Hoy.
- Fisher, J. B., Melton, F., Middleton, E., Hain, C., Allen, R., McCabe, M., Hook, S., Baldocchi, D., Philip, A., Waliser, D., Purdy, A. J., French, A., Schimel, D., Famiglietti, J. S., Stephens, G., & Wood, E. F. (2017). The Future of Evapotranspiration : Global requirements for ecosystem functioning , carbon and climate feedbacks , agricultural management , and water resources. *Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA*, 1–19.
- GAD-Pedro Moncayo. (2015). *Mojanda - Propuesta de declaratoria de Área Protegida Municipal Expediente técnico*. <https://docplayer.es/78962545-Mojanda-propuesta-de-declaratoria-de-area-prottegida-municipal-expediente-tecnico.html>
- GAD Municipal de Pedro Moncayo. (2018). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial PDOT 2018-2025. In *GAD Municipal de Pedro Moncayo*. [http://www.pedromoncayo.gob.ec/documentos/ord2019/s2\\_PDOT\\_Pedro\\_Moncayo\\_2018-2025.pdf](http://www.pedromoncayo.gob.ec/documentos/ord2019/s2_PDOT_Pedro_Moncayo_2018-2025.pdf)
- GADP\_Imbabura. (2020). *Plan Provincial de Educación Ambiental de Imbabura 2020 - 2025. Ecuador*.
- GADPP. (2017). *Manejo adaptativo de riesgos y vulnerabilidad en la zona lacustre de Mojanda*. [https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/5781/1/Ruiz%2C\\_S-CON-002-Manejo.pdf](https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/5781/1/Ruiz%2C_S-CON-002-Manejo.pdf)



- Galleguillos A.-Schübelin, X., & Ojeda Leal, C. (2016). El paisaje en animación suspendida y su valoración como dinamizador del desarrollo rural de la comuna de Maullín, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 231(65), 215–231. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022016000300011>
- García, C. (2013). Parámetros fisicoquímicos del agua. *Pv Albeitar*, 1–4. <http://albeitar.portalveterinaria.com/imprimir-noticia.asp?noti=12664>
- García, M. (2008). *Teoría y ejercicios prácticos de dinámica de sistemas*. Fundación Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- García, M., Carvajal, Y., & Jiménez, H. (2007). La gestión integrada de los recursos hídricos como estrategia de adaptación al cambio climático. *Ingeniería y Competitividad*, 9, 19–29. <https://web-b-ebsohost-com.bibliotecavirtual.unad.edu.co/ehost/detail/detail?vid=2&sid=589b9805-99a1-43bc-bbc7-24b23aa2d168%40pdc-v-sessmgr04&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1laG9zdC1saXZl#AN=26651151&db=zbh>
- Giménez, M., Laguna, I., & Lenardon, S. (2012). *Enfermedades del maíz producidas por virus y mollicutes en Argentina*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. INTA. <https://inta.gob.ar/noticias/enfermedades-del-maiz-producidas-por-virus-y-mollicutes-en-argentina>
- Gómez, M., & Sotés, V. (2014). *El Manganeso y la Viticultura: una revisión*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. [http://www.mapama.gob.es/es/alimentacion/publicaciones/MANGANESO\\_Y\\_VITICULTURA\\_tcm7-344123.pdf](http://www.mapama.gob.es/es/alimentacion/publicaciones/MANGANESO_Y_VITICULTURA_tcm7-344123.pdf)
- Gómez, Marcos, & Bustos, O. (2014). *Registro de Imágenes de Teledetección Espacial* [Universidad Nacional de Córdoba]. <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/15875>
- González, A. (2018). *Desarrollo de una aplicación para la reparación de huecos (GapFilling) de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM+*. 1–48. [https://rei.iteso.mx/bitstream/handle/11117/5723/Desarrollo de una aplicación para la reparación de huecos gapfilling de imágenes satelitales Landsat 7 ETM.pdf?sequence=4&isAllowed=y#:~:text=En el año 2002 el,menos 22%25 %5B14%5D](https://rei.iteso.mx/bitstream/handle/11117/5723/Desarrollo%20de%20una%20aplicaci%C3%B3n%20para%20la%20reparaci%C3%B3n%20de%20huecos%20gapfilling%20de%20im%C3%A1genes%20satelitales%20Landsat%207%20ETM.pdf?sequence=4&isAllowed=y#:~:text=En%20el%20a%C3%B1o%202002%20el%20menos%2022%25%20%5B14%5D).
- González, N., & González, A. (2015). *Análisis multitemporal del espejo de agua en la laguna de Fúquene para el periodo de 1985 a 2015* [Universidad de Manizales]. [https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/2507/Gonzalez\\_Adrisiana\\_2015.pdf?sequence=1](https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/2507/Gonzalez_Adrisiana_2015.pdf?sequence=1)
- Goyenola, G. (2007). Guía para la utilización de las Valijas Viajeras. *Red de Monitoreo de Ambiental Participativo RED MAPSA*, 1. <http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso>
- Granada, G. (2018). *LINEAMIENTOS Y POLÍTICAS PARA EL MANEJO DEL ECOTURISMO EN LA MICROCUENCA DE LA LAGUNA DE MOJANDA, DESDE EL GOBIERNO LOCAL DEL CANTÓN PEDRO MONCAYO, PROVINCIA DE PICHINCHA*.
- Guevara, P. (2020). *Variabilidad espacio - temporal de la concentración de metales traza en suelos y sedimentos en la Ria de Ortigueira en relacion con las fuentes y dinamica residual de las corrientes marinas*. Universidad de Santiago de Compostela.
- Hach Company. (2017). *¿Qué es la conductividad?* 1–2.
- Hansen, M. C., & Loveland, T. R. (2012). A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 122, 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.024>

- Hedhli, I., Moser, G., Zerubia, J., & Serpico, S. B. (2014). Fusion of multitemporal and multiresolution remote sensing data and application to natural disasters. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 207–210. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946393>
- Henríquez, C., & Azócar, G. (2007). Propuesta de Modelos Predictivos en la Planificación Territorial y Evaluación de Impacto Ambiental. *Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 11.
- Herrera, V. N. (2017). Implementación de Biomodelos estimativos de la calidad ecosistémica en el nevado del Cocuy al año 2030 producto del retroceso glaciar. *Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas*, 465, 106–111. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/25624>
- Huaccoto, P. (2017). Determinación del método más eficiente para calcular la evapotranspiración potencial para un modelo de lluvia - escorrentía en la cuenca Huancane - Puno. In *Universidad Nacional del Altiplano*.
- Hurtado, J. (2019). *Generación de un índice espectro-temporal para la identificación de zonas afectadas por deforestación usando imágenes Landsat*. [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76106>
- INEN. (2013). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2169: 2013 Agua, Calidad de agua, Muestreo Manejo y Conservación de Muestras. *Instituto Ecuatoriano De Normalización*.
- Instituto Geográfico Nacional. (2018). Teledetección. *Instituto Geográfico Nacional*, 2. <https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Teledeteccion.pdf>
- Isch, E. (2012). El cambio climático y gestión de páramos. *Consortio Camaren*, 7. <https://camaren.org/documents/cambioclimatico.pdf>
- Issn, M. (2018). Estimación de la temperatura superficial en San Carlos- Estado Cojedes, Venezuela empleando sensores remotos. *Multiciencias*, 16(4), 363–368. <https://doi.org/https://www.redalyc.org/jatsRepo/904/90455395002/90455395002.pdf>
- JAPAC. (2016). *Descubre cómo afecta el pH al agua*. Gobierno de Culiacán. <https://japac.gob.mx/2016/06/20/descubre-como-afecta-el-ph-al-agua/>
- Jiménez, A. (2000). Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad de las aguas. *Gestión Ambiental*, 2(23), 12–19.
- Jiménez, E. (2019). Cadenas de Markov Espaciales para simular el crecimiento del Área Metropolitana de Toluca, 2017-2031. *Economía Sociedad y Territorio*, 19, 109–140. <https://doi.org/10.22136/est20191324>
- Labrador, M., & Arbelo, M. (2012). Satélites de teledetección para la gestión del territorio. In *ResearchGate*. Consejería de agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias. [https://www.researchgate.net/publication/259230060\\_Satelites\\_de\\_teledeteccion\\_para\\_la\\_gestion\\_del\\_territorio](https://www.researchgate.net/publication/259230060_Satelites_de_teledeteccion_para_la_gestion_del_territorio)
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). Landis and Koch 1977 agreement of categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159–174.
- Lavie, E., Morábito, J. A., Salatino, S. E., Bermejillo, A., & Filippini, M. F. (2010). Contaminación por fosfatos en el oasis bajo riego del río Mendoza. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 42(1), 169–184. [https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos\\_digitales/3553/t42-1-12-lavie.pdf](https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/3553/t42-1-12-lavie.pdf)
- Leal, M., Miranda, S., Otazo, E., Prieto, F., & Gordillo, A. (2009). Contaminación por metales en la laguna El Limón, Chiapas, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(3), 415–

421.

- León. (2000). *Propiedades de los suelos*. Corpoica.  
[http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/6744/1/200671995247\\_Propiedades de los suelos.pdf](http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/6744/1/200671995247_Propiedades%20de%20los%20suelos.pdf)
- León, C. (2015). *Generación de un Modelo Predictivo de Crecimiento Urbano Mediante la Técnica de Autómatas Celulares. Aplicación a la Zona Conformada por las Parroquias: Conocoto, Guangopolo, Alangasí, La Merced y San Rafael* [Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]. <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/10905/1/T-ESPE-049257.pdf>
- Leon, E., Vasquez, V., & Valderrama, M. (2021). Cambios en patrones de precipitación y temperatura en el Ecuador: regiones sierra y oriente. *Revista Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores.*, 1–22.
- López, P. (2020). *Indagan la composición de la materia orgánica del suelo*. Gaceta UNAM.  
<https://www.gaceta.unam.mx/indagan-la-composicion-de-la-materia-organica-del-suelo/>
- MAATE. (2021). *Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica declara a Mojanda como Área de Protección Hídrica*. Ministerio Del Ambiente, Agua y Transición Ecológica.  
<https://www.ambiente.gob.ec/ministerio-del-ambiente-agua-y-transicion-ecologico-declara-a-mojanda-como-area-de-proteccion-hidrica/>
- Machaca Apaza, L. C. (2016). Estimación de la evapotranspiración de referencia utilizando modelos de redes neuronales artificiales en función de elementos climáticos en la cuenca del río Huanacán. In *Universidad Nacional del Altiplano*.  
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4612>
- MAE. (2013). Sistema de clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental. *Ministerio Del Ambiente Del Ecuador*, 186.
- Marini, F., Santamaria, M., Oricchio, P., Di Bella, C., & Basualdo, A. (2017). Estimación de evapotranspiración real ( ETR ) y de evapotranspiración potencial ( ETP ) en el sudoeste bonaerense ( Argentina ) a partir de imágenes MODIS. *Revista de Teledetección*, 29–41.
- Martínez, M., Ortiz, R., Ríos, H., & Acosta, R. (2010). Análisis de las correlaciones en poblaciones cubanas de Maíz. *Cultivos Tropicales*, 31(2), 82–91.  
<https://www.redalyc.org/pdf/1932/193215930012.pdf>
- Massol, A. (2010). *Parámetros Físico-químicos*. Curso Ecología Microbiana.
- McFeeters, S. K. (1996). Landslides Extraction From Diverse Remote Sensing Data Sources. *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 687–711.
- Medina, M. (2015). *Análisis multitemporal del cambio de la cobertura vegetal y uso de la tierra en el cantón Gualaquiza 1987-2015* [Universidad Central del Ecuador].  
<http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/7166>
- Mejía, A. (2012). Hidrología aplicada. In *Universidad Nacional Agraria La Molina* (Primera Ed).
- Mejía, X., & Moncayo, P. (2012). *Evaluación de métodos de clasificación de imágenes satelitales de moderada y alta resolución para la obtención de mapas de uso y cobertura del suelo basados en píxeles y orientados a objetos: Estudio de caso en sub escena de la parroquia Shushufindi, Prov* [Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE].  
<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/5528>
- Méndivil Quijada, H. (2012). Uso de imágenes satelitales aplicadas a la exploración por yacimientos minerales. *Academia Accelerating the World's Research*, 13.  
[https://www.researchgate.net/publication/305221032\\_Uso\\_de\\_imagenes\\_satelitales\\_aplicadas\\_a\\_la\\_exploracion\\_por\\_yacimientos\\_minerales](https://www.researchgate.net/publication/305221032_Uso_de_imagenes_satelitales_aplicadas_a_la_exploracion_por_yacimientos_minerales)

- Ministerio del Ambiente de la República del Ecuador. (2015). *Anexo 1 Libro VI del Acuerdo Ministerial 097-A, Anexos de Normativa, Reforma del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA)*.  
<http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu155128.pdf>
- Morales, M. (2020a). *Laguna de Mojanda*. GAD Parroquia Rural de Malchinguí.  
<https://gadmalingui.gob.ec/lagunas-de-mojanda/>
- Morales, M. (2020b). *Laguna de Mojanda*. GAD Parroquia Rural de Malchinguí.
- Moreira-Turcq, P., Aniceto, K., Quintana Cobo, I., Cordeiro, R., Chavarri, E., Fraizy, P., Guyot, J., Moreira, L., Santini, W., & Turcq, B. (2014). Impacto del cambio climático en la sedimentación y en la acumulación de carbono en los lagos de la Amazonía peruana. In A. Grégorio (Ed.), *El Perú frente al cambio climático* (IRD, pp. 72–84). IRD-MINAM.
- Murillo Castañeda, R. A. (2021). Implementación del método máquinas de soporte vectorial en bases de datos espaciales para análisis de clasificación supervisada en imágenes de sensores remotos. *Revista Cartográfica*, 102, 27–42.  
<https://doi.org/10.35424/rcarto.i102.830>
- Navia, J., & Rivera, L. (2016). *Análisis multitemporal de coberturas en la subzona hidrográfica alto Río Cauca utilizando imágenes satelitales Landsat* (Issue 45) [Universidad de Manizales].  
[https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/2806/TRABAJO\\_VERSION\\_FINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/2806/TRABAJO_VERSION_FINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Oña, J., & Tonato, C. (2017). *Determinación Del Estado Tráfico De Las Lagunas De Mojanda a Través De La Cuantificación De Clorofila "a"* [Universidad Central del Ecuador].  
<http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/13140/1/T-UCE-0012-38.pdf>
- ONU. (2019). *Informe de políticas de ONU - AGUA sobre el Cambio Climático y el Agua*.
- Ordóñez, K. (2019). *Plan de conservación de zonas frágiles del sistema lacustre de Mojanda Cajas provincia de Imbabura y Pichincha*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Osborn, T. J., & Jones, P. D. (2014). The CRUTEM4 land-surface air temperature data set: Construction, previous versions and dissemination via Google earth. *Earth System Science Data*, 6(1), 61–68. <https://doi.org/10.5194/essd-6-61-2014>
- Otero, L. (2011). *Temporalidad de parámetros de calidad en el Lago de Yojoa, Honduras* [Universidad de Oviedo]. <https://xeologosdelmundo.org/wp-content/uploads/2015/01/Laura-Trabajo-fin-de-Master-sin-anexos-20111.pdf>
- Padilla, O., Pérez, P., Cruz, M., Huilcamagua, S., & Astudillo, S. (2015). Utilización de autómatas celulares como técnica de modelamiento espacial para determinación el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal. *Ciencias Espaciales*, 8(1), 310–326.  
<https://doi.org/10.5377/ce.v8i1.2055>
- Paegelow, M., Camacho Olmedo, M., & Menor Toribio, J. (2003). Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *Geofocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, 0(3), 22–44.
- Palomares, A. E. (2013). Contaminación del agua por nitratos y técnicas para su tratamiento. *Esfera Del Agua*, [www.esferadelagua.es](http://www.esferadelagua.es). <https://www.esferadelagua.es/agua-y-tecnologia/contaminacion-del-agua-por-nitratos-y-tecnicas-para-su-tratamiento>
- Parry, M., Canziani, O., Palutikof, J., Van der Linden, P., & Hanson, C. (2007). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. *The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, 15, 541–580.

- Paula, P., Zambrano, L., & Paulina, P. (2018). Análisis Multitemporal de los cambios de la vegetación, en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo como consecuencia del cambio climático (Multitemporal Analysis of vegetation change at Chimborazo Reserve as a result of climate change). *Enfoque Ute*, 9(2), 125–137.  
<http://ingenieria.ute.edu.ec/enfoqueute/>
- Pereira, L. E., Amorim, G., Grigio, A. M., & Paranhos, A. (2018). Análise comparativa entre Métodos de Índice de Agua por Diferença Normalizada (NDWI) em área úmida continental. *Anuario Do Instituto de Geociencias*, 41(2), 654–662.  
[https://doi.org/10.11137/2018\\_2\\_654\\_662](https://doi.org/10.11137/2018_2_654_662)
- Pérez-Briceño, P. M., Amador, J., & Alfaro, E. (2017). Dos propuestas de clasificación climática para la vertiente Caribe costarricense según el sistema de Thornthwaite. *Revista de Climatología*, 17, 1–16.
- Pérez, D. (2007). *Introducción a los Sensores Remotos - Aplicaciones en Geología*.  
[http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso\\_SR/Guia\\_Curso\\_sr\\_2007.pdf](http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso_SR/Guia_Curso_sr_2007.pdf)
- Pérez, N., Mullo, H., & Marcatoma, J. (2020). ANÁLISIS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN UN ECOSISTEMA ALTO ANDINO, RIOBAMBA-ECUADOR. *Perfiles*, 1, 1–11.
- Project WET Foundation. (2011). *Indicadores de la calidad del agua: parámetros biológicos, químicos y físicos*. [https://assets.website-files.com/576a95db81c75aa24d8e16f0/5fa1e983badbdb433a791d32\\_Spanish\\_Water\\_Quality\\_Indicators.pdf](https://assets.website-files.com/576a95db81c75aa24d8e16f0/5fa1e983badbdb433a791d32_Spanish_Water_Quality_Indicators.pdf)
- PRTR España. (2007). *Carbono orgánico total (COT)(Como C total o DQO/3) | PRTR España*.  
<http://www.prtr-es.es/Carbono-organico-total-COTComo-C,15663,11,2007.html>
- QGIS. (2002). *Análisis raster*.  
[https://docs.qgis.org/3.10/es/docs/user\\_manual/processing\\_algs/gdal/rasteranalysis.html#gdalfillnodata](https://docs.qgis.org/3.10/es/docs/user_manual/processing_algs/gdal/rasteranalysis.html#gdalfillnodata)
- Ramírez, R. (1997). Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelos. In *Convenio FENALCE-SENA-SAC*. <https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4776/edafologia.pdf>
- Restrepo, J. D., Kettner, A. J., & Syvitski, J. P. M. (2015). Recent deforestation causes rapid increase in river sediment load in the Colombian Andes. *Anthropocene*, 10, 13–28.  
<https://doi.org/10.1016/j.ancene.2015.09.001>
- Reyes, D. (2011). Descripción y Aplicaciones de los Automatas Celulares. *U.N.A.M.*, 1–26.  
[http://delta.cs.cinvestav.mx/~mcintosh/cellularautomata/Summer\\_Research\\_files/Arti\\_Ver\\_Inv\\_2011\\_DARG.pdf](http://delta.cs.cinvestav.mx/~mcintosh/cellularautomata/Summer_Research_files/Arti_Ver_Inv_2011_DARG.pdf)
- Rodríguez, J. (2009). Parámetros fisicoquímicos de dureza total en calcio y magnesio, pH, conductividad y temperatura del agua potable analizados en conjunto con las Asociaciones Administradoras del Acueducto, (ASADAS), de cada distrito de Grecia, cantón de Alajuela, noviembre. *Revista Pensamiento Actual*, 9(12), 125–134.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5897932>
- Roldán Pérez, G. (2012). Los Macroinvertebrados como Bioindicadores de La Calidad del Agua. In *Revista Biocenosis* (Vol. 20, Issues 1–2). Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.  
<https://ianas.org/wp-content/uploads/2020/07/wbp12.pdf>
- Roman-Gonzalez, A., & Vargas-Cuentas, N. I. (2013). Análisis de Imágenes Hiperespectrales. *Researchgate*, 6.
- Ronan, P. (2013). *Espectro electromagnético*.  
<http://www.gaiaciencia.com/2016/11/gleamoscope-la-via-lactea-como-nunca-la-has-visto-antes/>

- Rozo, M. G., Nogueira, A. C. R., & Soto, C. (2014). Remote sensing-based analysis of the planform changes in the Upper Amazon River over the period 1986 e 2006. *Journal of South American Earth Sciences*, 51, 28–44. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2013.12.004>
- Salas Flores, E. E. (2014). *Universidad Nacional Del Altiplano*.
- Samboni, N., Carvajal, Y., & Escobar, J. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Ingeniería e Investigación*, 27(3), 172–181.
- Sánchez, Ó., Herzing, M., Peters, E., Martínez, R., & Zambrano, L. (2007). *Perspectiva sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México* (1ra edició). Instituto Nacional de Ecología.
- Schewe, J., Gosling, S. N., Reyer, C., Zhao, F., Ciais, P., Elliott, J., Francois, L., Huber, V., Lotze, H. K., Seneviratne, S. I., Van Vliet, M. T. H., Vautard, R., Wada, Y., Breuer, L., Büchner, M., Carozza, D. A., Chang, J., Coll, M., Deryng, D., ... Warszawski, L. (2019). State-of-the-art global models underestimate impacts from climate extremes. *Nature Communications*, 10(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08745-6>
- SEDUE. (1989). *Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89*. Diario Oficial de la Federación. [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5284148&fecha=04/01/2013](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5284148&fecha=04/01/2013)
- SEMARNAT. (2012). La degradación de los suelos en México. In *SNIARN*. [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe\\_12/03\\_suelos/cap3\\_2.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/03_suelos/cap3_2.html)
- Siebert, A. (2009). Relevamiento de bosques con información satelital: Resolución espacial y escala. *Quebracho - Revista de Ciencias Forestales*, 17(1–2), 101–105.
- Syvitski, J. P. M. (2003). Supply and flux of sediment along hydrological pathways: Research for the 21st century. *Global and Planetary Change*, 39(1–2), 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00008-0](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00008-0)
- Taha, H. (2012). *Investigación de Operaciones* (9na ed.). Pearson Educación. <https://jrvargas.files.wordpress.com/2009/01/investigacion-de-operaciones-9na-edicion-hamdy-a-taha-fl.pdf>
- Tocagón, R., & Rivadeneira, J. (2012). La inclusión del enfoque ambiental en los reglamentos comunitarios indígenas para los páramos de Mojanda: una experiencia de incidencia política del Proyecto Páramo Andino. In P. Crespo & R. Tatiana (Eds.), *Buenas prácticas para la gestión de los páramos Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú* (pp. 128–135). CONDESAN. <http://marefateadyan.nashriyat.ir/node/150>
- Universidad de Granada. (2021). *Lección 1. El suelo: concepto y formación. Procesos específicos*. <http://edafologia.ugr.es/introeda/tema01/procesp2.htm#:~:text=Se reconoce por hidromorfía a,la existencia de condiciones reductoras.>
- URKU-KAMAS. (2016). *Adaptación al cambio climático de poblaciones andinas, mediante el manejo, conservación y restauración en el cantón Pedro Moncayo*. <https://www.care.org.ec/nuestras-acciones/programas-de-exito/proyecto-adaptacion-al-cambio-climatico-de-poblaciones-andinas-mediante-el-manejo-conservacion-y-restauracion-de-paramos-en-el-canton-pedro-moncayo/>
- Van Bemmelen, J. (1890). Über die Bestimmung des Wassers, des Humus, des Schwefels, der in den colloidalen Silikaten gebundenen Kieselsäure, des Mangans u. s. w. im Ackerboden. *Die Landwirtschaftlichen Versuchs-Stationen*, 37, 279–290.
- Vázquez, E., & Rojas, T. (2016). *pH: Teoría y 232 problemas* (1er edició). Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa. <http://www.cua.uam.mx/pdfs/conoce/libroselec/17pHTeoriayproblemas.pdf>

- Vega, E. (2019). Solubilidad y reactividad química del azufre presente en las cenizas volantes, en pastas de cemento [Universidad del Desarrollo]. In *Universidad del Desarrollo*.  
<http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/32303>  
<http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/32303>
- Velásquez, L. F. M. (2019). *Guía para la solución de problemas de cadenas de Markov, colas, inventarios y análisis de decisiones* (Primera Ed, Vol. 0, Issue 0). Universidad Nacional de Colombia.  
[https://www.uneditorial.com/media/hipertexto/pdf/1\\_Guia\\_para\\_Slcn\\_Cadenas\\_de\\_Markov\\_COMPLETO.pdf](https://www.uneditorial.com/media/hipertexto/pdf/1_Guia_para_Slcn_Cadenas_de_Markov_COMPLETO.pdf)
- Villasanti, C., Román, P., & Pantoja, A. (2013). El manejo del suelo en la producción de hortalizas con buenas prácticas agrícolas. In *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. <https://www.fao.org/3/i3361s/i3361s.pdf>
- Zapata, C., & Campos, E. (2005). Valoración de confiabilidad de sistemas de generación con recursos limitados de energía utilizando simulación de montecarlo. *Scientia Et Technica*.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.22517/23447214.6609>