



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

## **FACULTAD DE INGENIERÍAS EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES**

### **CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

#### **EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO ECOLÓGICO DEL LAGO ALTOANDINO SAN MARCOS, PROVINCIA DE PICHINCHA**

Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniero (a) en Recursos Naturales Renovables

#### **Autores:**

BOSQUE QUISHPE GISEL ABIGAIL

SANDOVAL YANEZ ERVIN ANDERSON

#### **Directora:**

Ing. DELIA ELIZABETH VELARDE CRUZ MSc.

**Ibarra – 2024**

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**



## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### 1. Identificación de la Obra

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hacemos la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual ponemos a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO		
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD</b>	1727729624	
<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	Bosque Quishpe Gisel Abigail	
<b>DIRECCIÓN:</b>	Cayambe- Ecuador	
<b>EMAIL:</b>	<a href="mailto:bosquegisel@gmail.com">bosquegisel@gmail.com</a>	
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0959130990
DATOS DE CONTACTO		
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD</b>	1005069438	
<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	Sandoval Yanez Ervin Anderson	
<b>DIRECCIÓN:</b>	Zuleta -Ibarra- Imbabura	
<b>EMAIL:</b>	<a href="mailto:ervinsandoval111@gmail.com">ervinsandoval111@gmail.com</a>	
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0962399180
DATOS DE LA OBRA		
<b>TÍTULO:</b>	EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO ECOLÓGICO DEL LAGO ALTOANDINO SAN MARCOS, PROVINCIA DE PICHINCHA	
<b>AUTOR (ES):</b>	BOSQUE QUISHPE GISEL ABIGAIL SANDOVAL YANEZ ERVIN ANDERSON	
<b>FECHA: DD/MM/AAAA</b>	11/09/2024	
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO		
<b>PROGRAMA:</b>	<b>GRADO X POSGRADO</b>	
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniería en Recursos Naturales Renovables	
<b>ASESOR /DIRECTOR:</b>	Ing. Delia Elizabeth Velarde Cruz MSc.	

## 2. Constancia

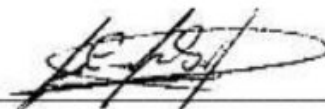
El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y son titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumimos la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldremos en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, al 1 día del mes de octubre de 2024

### LOS AUTORES:



Bosque Quishpe Gisel Abigail  
C.I: 172772962-4



Sandoval Yanez Ervin Anderson  
C.I: 100506943-8

**CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN  
CURRICULAR**

Ibarra, 11 de septiembre de 2024

MSc. DELIA ELIZABETH VELARDE CRUZ

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

**CERTIFICA:**

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f)  .....

MSc. DELIA ELIZABETH VELARDE CRUZ

C.C.: 1002587622

## APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR



El Comité Calificador del trabajo de Integración Curricular “EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO ECOLÓGICO DEL LAGO ALTOANDINO SAN MARCOS, PROVINCIA DE PICHINCHA” elaborado por BOSQUE QUISHPE GISEL ABIGAIL Y ERVIN ANDERSON SANDOVAL YANEZ, previo a la obtención del título de INGENIERIA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte.

(f)  .....

MSc. DELIA ELIZABETH VELARDE CRUZ

C.C.: 1002587622

(f)  .....

MSc. TANIA ELIZABETH OÑA ROCHA

C.C.: 1002324154

## AGRADECIMIENTO

*Agradecemos a Dios profundamente por la fortaleza y el amparo que ha brindado en cada paso de nuestro camino universitario. Su guía y protección han sido esenciales para superar los desafíos, mantenernos enfocados y alcanzar nuestras metas.*

*A nuestras familias, por su inquebrantable apoyo que ha sido fundamental para impulsarnos a seguir con nuestro proceso de aprendizaje. Gracias a su amor y guía, hemos encontrado la fortaleza y el compromiso requeridos para superar los desafíos y lograr nuestras metas.*

*A la Universidad Técnica del Norte, por brindarnos la oportunidad de aprender, crecer y desarrollar nuestras habilidades. La educación que hemos recibido aquí ha sido fundamental para nuestro desarrollo académico y personal. Asimismo, expresamos gratitud a todos los docentes que, con dedicación y vocación, impartieron sus conocimientos.*

*A nuestra directora de tesis, MSc. Elizabeth Velarde, por darnos la oportunidad de formar parte de uno de sus proyectos de investigación. Esta experiencia ha sido profundamente enriquecedora para nosotros. Valoramos su confianza en nuestro trabajo, así como su constante orientación y dedicación a lo largo de todo el proceso investigativo. Además, deseamos mostrar gratitud a nuestra asesora, MSc. Tania Oña, por su valiosa asesoría, sus comentarios constructivos y su constante motivación han sido esenciales para la realización de este trabajo*

*Agradecemos al equipo técnico LABINAM, especialmente a la Ing. Karen Portilla, por su orientación y por compartir valiosos conocimientos y experiencias. Asimismo, reconocemos la colaboración de nuestros compañeros María José y Steven durante el proyecto.*

*Expresamos nuestro agradecimiento al MSc. Oscar Rosales y a la Ing. Fernanda Herrera por su asesoramiento técnico y conocimiento, que fueron cruciales para optimizar una fase del proyecto y obtener resultados destacados en nuestra investigación.*

*Agradecemos al Ing. Marcelo Ponce quien desempeñó un papel crucial durante una de las fases más desafiantes de esta investigación. Su apoyo técnico y su orientación estratégica contribuyeron significativamente al éxito de este proyecto.*

*A nuestros amigos y compañeros por su apoyo, su compañía, ánimo y ayuda. Cada momento vivido juntos, ha hecho que esta experiencia sea inolvidable y valiosa.*

*Hemos terminado un importante capítulo. ¡Gracias por ser parte de este logro!*

**Gisel & Ervin**

## **DEDICATORIA**

*Dedico este trabajo a Dios, por ser el pilar esencial en mi vida, quien iluminó mi camino con su gracia y guía constante, por brindarme sabiduría en mis estudios y por darme la fortaleza necesaria para no desistir.*

*Con gran gratitud y profundo amor, dedico este trabajo a mis padres María y Luis que con su ejemplo y sacrificio me impulsaron a nunca rendirme. Sus consejos me han impulsado y seguirán impulsándome hacia grandes logros. ¡Los amo con todo mi corazón!*

*A mi hermano Mateo, por su cariño y su constante fe en mí. A mi prima Dayana que, durante toda nuestra vida universitaria, ha sido mi amiga leal, mi confidente y mi apoyo. Juntas hemos enfrentado desafíos, celebrado logros y compartidos momentos inolvidables. Gracias por estar a mi lado en cada paso del camino*

*A Jonathan, quien me acompañó en toda la recta final de este camino. Tu amor, paciencia y aliento constante han sido fundamentales para mi éxito.*

*A mi familia por haber estado siempre apoyándome e impulsándome a no darme por vencida, en especial a mis tíos Patricio, Esperanza, Tránsito y a mis primos Belén, Rafael, Lizeth, Anahí y Patrick. Este logro académico es un reflejo de la influencia positiva que han tenido en mi vida.*

*A Ervin mi compañero y amigo, gracias por compartir esta travesía llena de retos y aprendizajes, por todo el trabajo en conjunto, por ser una fuente constante de motivación, por las risas que disfrutamos juntos y por creer en mí siempre.*

*Por último, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis amigos Emily, Vanessa, Samanta, Erik, Edwin y Jean Carlos. Cada uno de ustedes ha jugado un papel esencial en este viaje, compartiendo conmigo momentos inolvidables y creando recuerdos que atesoraré para siempre. Su amistad ha sido un importante en mi vida universitaria, y las experiencias que vivimos juntos permanecerán en mi corazón. Gracias por ser parte de esta maravillosa etapa de mi vida.*

**Gisel Bosque**

## DEDICATORIA

*A Dios, por ser mi guía en cada paso y mi refugio en cada dificultad, por brindarme la salud, la vida y la fortaleza necesarias para llegar hasta este momento, y por darme la certeza de que con su amor y sabiduría todo es posible.*

*A mi madre, María Yanez, por su tenacidad, valentía y sabiduría al guiar nuestro hogar y educarnos. Gracias por ese impresionante coraje para enfrentar cualquier situación juntos, por ser mi mejor amiga, mi consejera y, sobre todo, la mejor mamá.*

*A mi padre, Juan Sandoval, ejemplo de esfuerzo, humildad y honestidad, por enseñarme que con determinación se puede alcanzar cualquier meta. Gracias por ser el pilar de nuestra familia y por mostrarme, con tu amor y dedicación, cómo ser una mejor persona.*

*A mis queridos hermanos, Guillermo y Eva. Su apoyo incondicional, comprensión y amor han sido fundamentales en cada paso de este viaje. Gracias por estar siempre a mi lado y por motivarme a alcanzar mis metas. Este logro es también suyo. ¡Los aprecio y valoro profundamente!*

*Al amor de mi vida, cuyo apoyo constante y compromiso han sido cruciales para alcanzar este logro. Tu presencia y dedicación han sido fundamentales en cada etapa de este proyecto. Gracias por tu amor y apoyo incondicional.*

*A Gisel Bosque, mi compañera y mejor amiga, quien ha compartido conmigo cada paso de este recorrido académico. A lo largo de este viaje, hemos acumulado innumerables enseñanzas y vividos momentos inolvidables. Su apoyo y compromiso han sido cruciales, y juntos hemos logrado transformar desafíos en valiosas experiencias.*

*Quiero agradecer a todos los amigos que conocí en esta etapa académica. Cada uno de ustedes ha dejado una marca invaluable en mi vida, contribuyendo de manera única a mi crecimiento personal. Su apoyo y las lecciones aprendidas han sido esenciales para mi éxito. ¡Mil gracias por todo!*

*Las palabras no son suficientes para transmitir la inmensa gratitud que siento por quienes han estado a mi lado durante este viaje académico. Este logro no solo refleja mi esfuerzo, sino también el invaluable apoyo y contribuciones de cada uno de ustedes. Este éxito es tan suyo como mío, y su influencia ha sido fundamental en cada etapa del camino.*

**Ervin Sandoval**



## ÍNDICE DE CONTENIDO

Contenido	Pág.
<b>CAPÍTULO I</b> .....	15
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	15
<b>1.1. Revisión de Antecedentes</b> .....	15
<b>1.2. Problema de Investigación y Justificación</b> .....	16
<b>1.3. Objetivos</b> .....	17
<i>1.3.1. Objetivo General</i> .....	17
<i>1.3.2. Objetivos Específicos</i> .....	17
<i>1.3.3. Preguntas Directrices</i> .....	17
<b>CAPÍTULO II</b> .....	18
<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	18
<b>2.1. Marco teórico Referencial</b> .....	18
<i>2.1.1. Aplicación de la Teledetección en la Investigación de Cuerpos de Agua</i> .....	18
<i>2.1.1.1. Análisis Multitemporal</i> .....	19
<i>2.1.3. Parámetros Químicos</i> .....	21
<i>2.1.4. Servicios Ecosistémicos</i> .....	22
<i>2.1.5. Clasificación de los Servicios Ecosistémicos</i> .....	22
<b>2.2. Marco Legal</b> .....	23
<i>2.2.1. Título VII régimen del buen vivir</i> .....	23
<i>2.2.2. Código Orgánico Ambiental (COA)</i> .....	24
<i>2.2.3. Ley Orgánica de Recursos Hídricos</i> .....	25
<b>CAPÍTULO III</b> .....	26
<b>METODOLOGÍA</b> .....	26
<b>3.1. Materiales y Equipos</b> .....	27
<b>3.2. Metodología</b> .....	27

3.2.1. <i>Determinación de las Condiciones Climáticas, los cambios de superficie de la cuenca hidrográfica y la cubeta lacustre</i> .....	27
3.2.2. <i>Relacionar la Información de los Parámetros Físicos y Químicos con el Estado Trófico del Lago San Marcos</i> .....	29
3.2.2.1. <i>Determinación de Clorofila – a extraída (Chl-a)</i> .....	30
3.2.3. <i>Funcionalidad Ecológica en base a los cambios morfológicos del lago y su estado trófico</i>	32
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>33</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES</b> .....	<b>33</b>
<b>4.1. Análisis Multitemporal de los cambios de Superficie de la Cuenca Hidrográfica y de la Cubeta Lacustre</b> .....	<b>33</b>
4.1.1. <i>Condiciones Climáticas</i> .....	33
4.1.2. <i>Análisis Multitemporal</i> .....	38
<b>4.2. Relacionar la información de los parámetros físicos y químicos con el estado trófico del lago San Marcos</b> .....	<b>43</b>
4.2.1. <i>Análisis multitemporal batimétrico años: 2016 – 2024</i> .....	43
4.2.2. <i>Análisis de Parámetros Físico – químicos</i> .....	31
<b>4.3. Establecer la funcionalidad ecológica en base a los cambios morfológicos del lago y su estado trófico</b> .....	<b>40</b>
4.3.1. <i>Servicios Ecosistémicos del Lago San Marcos en el año 2016</i> .....	42
4.3.2. <i>Servicios Ecosistémicos del Lago San Marcos para el año 2024 – 2025</i> .....	45
4.3.3. <i>Impactos de Servicios Ecosistémicos</i> .....	46
<b>CAPÍTULO V</b> .....	<b>48</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>48</b>
<b>5.1. Conclusiones</b> .....	<b>48</b>
<b>5.2. Recomendaciones</b> .....	<b>49</b>
<b>Referencias</b> .....	<b>50</b>
<b>Anexos</b> .....	<b>58</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b> Clasificación de los Servicios Ecosistémicos.....	23
<b>Tabla 2</b> Materiales y Equipos.....	27
<b>Tabla 3</b> Codificación de la Cobertura y Uso del Suelo.....	29
<b>Tabla 4</b> Datos promedios mensuales de precipitación y temperatura de la estación meteorológica M5025 (2019-2021).....	33
<b>Tabla 5</b> Parámetros morfométricos.....	36
<b>Tabla 6</b> Matriz de confusión para el año 2015.....	39
<b>Tabla 7</b> Matriz de confusión para el año 2019.....	40
<b>Tabla 8</b> Matriz de confusión para el año 2023.....	40
<b>Tabla 9</b> Valoración del coeficiente Kappa.....	41
<b>Tabla 10</b> Área de diferentes tipos de cobertura y usos del suelo, período 2015, 2019 y 2023.....	42
<b>Tabla 11</b> Puntos establecidos en el lago San Marcos.....	31
<b>Tabla 12</b> Medición de Chl-a y control con el fluorímetro aplicado la fórmula.....	38
<b>Tabla 13</b> Promedios obtenidos con la fórmula general de la Chl-a.....	39
<b>Tabla 14</b> Clasificación del índice de estado trófico (TSI) de acuerdo con Carlson (1997) ....	40
<b>Tabla 15</b> Servicios ecosistémicos de un embalse.....	46

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> Mapa de ubicación del lago San Marcos.....	26
<b>Figura 2</b> Diagrama ombrotérmico de la Estación Meteorológica La Virgen Papallacta-M5025 2019 al 2021.....	34
<b>Figura 3</b> Mapa de la Cuenca hidrográfica del lago San Marcos.....	35
<b>Figura 4</b> Curva hipsométrica de la Cuenca del lago San Marcos.....	37
<b>Figura 5</b> Mapa de cambios del perfil del lago San Marcos.....	38
<b>Figura 6</b> Mapa de uso y cobertura de suelo de los años, 2015, 2019 y 2023.....	42
<b>Figura 7</b> Mapa Batimétrico del lago San Marcos.....	30
<b>Figura 8</b> Mapa Batimétrico del lago San Marcos del 2016.....	30
<b>Figura 9</b> Diagrama de comparación entre los valores y el promedio del D. Secchi (m).....	32
<b>Figura 10</b> Diagrama de comparación entre los valores y el promedio del O. Disuelto (mg/L).....	33
<b>Figura 11</b> Diagrama de O. Disuelto (%).....	34
<b>Figura 12</b> Diagrama de comparación entre los valores y el promedio de la Temperatura (°C).....	35
<b>Figura 13</b> Diagrama de comparación entre los valores y el promedio de la Presión Barométrica (mmHg).....	36
<b>Figura 14</b> Diagrama de comparación entre los valores y el promedio de la Conductividad (µs/cm).....	37
<b>Figura 15</b> Diagrama de comparación entre los valores y el promedio del pH.....	38
<b>Figura 16</b> Mapa del lago San Marcos 2016.....	41
<b>Figura 17</b> Servicios ecosistémicos del lago San Marcos 2016.....	42
<b>Figura 18</b> Mapa del lago San Marcos 2024.....	44
<b>Figura 19</b> Servicios ecosistémicos del lago San Marcos 2024 -2025.....	45
<b>Figura 20</b> Línea de impacto de servicios ecosistémicos.....	47

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y**  
**AMBIENTALES**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES**  
  
**EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO ECOLÓGICO DEL LAGO**  
**ALTOANDINO SAN MARCOS, PROVINCIA DE PICHINCHA**

Bosque Quishpe Gisel Abigail y Ervin Anderson Sandoval Yanez

**RESUMEN**

El desarrollo antrópico ha deteriorado los ecosistemas acuáticos, haciendo esencial la ampliación del conocimiento sobre los cuerpos de agua para mejorar su gestión. El objetivo de este estudio fue evaluar el funcionamiento ecológico del lago altoandino San Marcos, ubicado en Pichincha, Ecuador, mediante la utilización de parámetros físico-químicos y técnicas de teledetección. Se recopilaron datos climáticos y morfológicos, se analizaron imágenes satelitales y se empleó ArcGIS 10.8 para clasificar la cobertura vegetal. Los resultados incluyeron un diagrama ombrotérmico que reveló la presencia de una época seca y dos lluviosas a lo largo del año. El análisis morfométrico de la cuenca determinó un área de 13,62 km<sup>2</sup>, un perímetro de 18,11 km y un ancho de 2,47 km. El estudio multitemporal mostró un incremento en la superficie del lago: 58,30 ha en 2015, 90,37 ha en 2019 y 92,18 ha en 2023. Los mapas batimétricos indicaron cambios en la topografía del lago, con el punto más profundo a 46 m en 2016 y a 51 m en 2024. Los parámetros físico-químicos mostraron, disco Secchi con un promedio de 1,80 m, indicando alta turbidez; oxígeno disuelto de 7,72 mg/L, reflejando buena oxigenación; temperatura promedio de 13,57 °C; presión barométrica de 683,53 mmHg; conductividad de 40,3 µS/cm; pH de 6,51; y una Chl-a con un valor de 3,09 µg/L, situando al lago en un estado mesotrófico. En 2016, los servicios ecosistémicos del lago incluían regulación, aspectos culturales y sostenimiento. Sin embargo, tras el trasvase de los ríos Arturo, Boquerón y San Pedro, en 2024 se destacaron principalmente los servicios de aprovisionamiento, como el riego, la ganadería y la agricultura. Finalmente, los parámetros físico-químicos confirmaron que el lago se encuentra en un estado mesotrófico. Aunque el lago está en un estado saludable, es crucial implementar medidas de gestión para evitar un aumento de nutrientes que podría llevarlo a un estado eutrófico.

**Palabras clave:** parámetros físico-químicos, Multitemporal, batimetría, estado trófico, servicios ecosistémicos

## ABSTRACT

Anthropic development has degraded aquatic ecosystems, making it essential to expand our knowledge of water bodies to improve their management. This study aimed to assess the ecological functioning of the high-Andean San Marcos Lake, located in Pichincha, Ecuador, using physical-chemical parameters and remote sensing techniques. Climate and morphological data were collected, satellite images were analyzed, and ArcGIS 10.8 was used to classify vegetation cover. The results included a pluviothermal diagram that revealed a dry season and two rainy seasons throughout the year. The morphometric analysis of the basin determined an area of 13.62 km<sup>2</sup>, a perimeter of 18.11 km, and a width of 2.47 km. Multitemporal analysis showed an increase in the lake's surface: 58.30 ha in 2015, 90.37 ha in 2019, and 92.18 ha in 2023. Bathymetric maps indicated changes in the lake's topography, with the deepest point at 46 m in 2016 and 51 m in 2024. The physical-chemical parameters showed a Secchi disk reading with an average of 1.80 m, indicating high turbidity; dissolved oxygen at 7.72 mg/L, reflecting good oxygenation; average temperature of 13.57 °C; barometric pressure of 683.53 mmHg; conductivity of 40.3 μS/cm; pH of 6.51; and Chl-a with a value of 3.09 μg/L, placing the lake in a mesotrophic state. In 2016, the lake's ecosystem services included regulation, cultural aspects, and sustenance. However, following the transfer of the Arturo, Boquerón, and San Pedro rivers, by 2024 the services highlighted were primarily provisioning, such as irrigation, livestock, and agriculture. Finally, the physical-chemical parameters confirmed that the lake is in a mesotrophic state. While the lake is in a healthy condition, it is crucial to implement management measures to prevent an increase in nutrients that could lead it to an eutrophic state.

**Key words:** physical-chemical parameters, multitemporal, bathymetry, trophic state, ecosystem services

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1. Revisión de Antecedentes

El 0,3 % del agua disponible en el planeta se encuentra en forma de agua dulce. De esta cantidad, el 90 % se almacena en sistemas acuáticos lénticos, clasificados en lagos, humedales y charcas de temporal (Oña y Tonato, 2017). Estos ecosistemas carecen de estratificación térmica, lo que significa que poseen circulación continua todo el año. Esta característica los convierte en elementos de gran capacidad biogénica, debido a que constituyen un hábitat singular para la flora y fauna, siendo clave para la preservación de ecosistemas y biodiversidad del planeta (Cervantes, 2007).

Estos entornos naturales son reconocidos en todo el mundo como productivos y favorables para el bienestar humano. Ofrecen servicios ecosistémicos al suministrar agua a comunidades, controlan y regulan la temperatura ambiente. A su vez, tienen relevancia cultural y espiritual para las poblaciones indígenas de larga tradición. Pese a sus aportes, los ecosistemas naturales están amenazados por la contaminación, la expansión de la frontera agrícola, los incendios forestales y muchas otras actividades humanas. La disminución y desaparición de los sistemas acuáticos altoandinos se expresaron en estos ecosistemas y necesitan una gestión adecuada en la que se involucren los gobiernos sectoriales (World Wildlife Fund, 2005).

Los lagos altoandinos son susceptibles a la contaminación (Dodds y Whiles, 2010), se consideran ecosistemas acuáticos con características únicas, algunos de ellos de origen volcánico, se encuentran ubicados en las calderas y cráteres de volcanes inactivos o activos los cuales han sido objeto de pocos estudios (Rull et al., 2008). Estos lagos se encuentran principalmente en Colombia, Ecuador y el norte de Perú, en altitudes que oscilan entre los 2000 y 4000 m s. n. m. Debido a la altitud y a las condiciones climáticas predominantes, la dinámica de estos cuerpos de agua es muy diferente a la de los lagos que se encuentran en las zonas bajas tropicales (Casallas y Gunkel, 2001).

En Ecuador, se distingue una amplia variedad de lagos de alta montaña, sin embargo, existe una gran deficiencia de estudios limnológicos que revelen la situación actual de estos ecosistemas en términos de sus características físicoquímicas y biológicas. Además, Ecuador es un país megadiverso que alberga 70 cuerpos lacustres, la mayoría custodiados por el Sistema Nacional de Áreas Protegidas. Entre esos cuerpos de agua se encuentra la laguna Amarilla,

laguna de Mojanda, lago Cuicocha, lagunas de Ozogoche, lago San Pablo, lagunas de Atillo y lago San Marcos. Los estudios realizados en estos cuerpos lagunares se centraron en la caracterización de parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos para establecer el índice de calidad del agua (López, 2019).

El Parque Nacional Cayambe-Coca (PNCC) es un área protegida localizada al noreste de Ecuador. Su principal objetivo es proteger el ecosistema de páramo en los alrededores del volcán Cayambe; y los sistemas lacustres de Puruhanta, San Marcos, Oyacachi y Papallacta. Estos sistemas hídricos abastecen a proyectos de inversión y se encuentran amenazados por la construcción de tramos y vías de acceso para proyectos de agua potable, e hidroeléctricas. (MAAE, 2020). El lago San Marcos es una fuente importante de agua para las comunidades que la utilizan y las personas que lo visitan. Además, es un destino turístico en el que se realizan varias actividades recreativas en sus alrededores (Geovanna, 2009).

## **1.2. Problema de Investigación y Justificación**

La biosfera, cuenta con recursos hídricos distribuidos en diversos hábitats, destacando ríos, lagos, glaciares, humedales y otros cuerpos de agua (Murillo et al., 2010). Estos recursos proporcionan ventajas para la humanidad, su disponibilidad y calidad están influenciados por factores naturales, como el medio físico y la dinámica atmosférica, al igual que las actividades humanas, que tienen un impacto directo en la cantidad y calidad del recurso hídrico (Dasso et al., 2014). En Ecuador, la degradación de los ecosistemas acuáticos representa un desafío ambiental que afecta no solo a los microorganismos, plantas y animales que habitan en estos entornos, sino también a las comunidades que dependen de ellos. La gestión inadecuada de estos ambientes ha ocasionado contaminación, lo que ha llevado a cambios significativos en sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Cadena, 2005).

La limitación de estudios limnológicos en Ecuador de manera multitemporal crea brechas para establecer bases de datos fundamental para la gestión adecuada de los recursos hídricos. Por lo tanto, es transcendental desarrollar un conocimiento continuo de las variables fisicoquímicas y biológicas de cuerpos de agua existentes para favorecer a la generación de un manejo adecuado del recurso hídrico que permite determinar la calidad de agua (Ruiz et al., 2007). Debido a esto es importante estudiar el funcionamiento ecológico del lago altoandino San Marcos para la conservación de la biodiversidad que se encuentra en la zona ya que es un ecosistema frágil y único, que alberga diversidad de especies de flora y fauna. Además, permitirá conocer las



interacciones entre las especies que allí habitan y su entorno y cómo estos servicios se relacionan con el ecosistema (Blanco, 2017).

Esta información permitirá generar, proponer estrategias de monitoreo y control en el lago para poder incluir la aplicación y cumplimiento del objetivo once del Plan Nacional Creando oportunidades que es: “Conservar, restaurar, proteger y hacer un uso sostenible de los recursos naturales”(Secretaría Nacional de Planificación[SNP] y los objetivos que tiene el proyecto de investigación de la Universidad Técnica del Norte: “Manejo sostenible de lagos en el norte de Ecuador, bajo la creciente actividad económica y el cambio climático” que se enfoca en evaluar el estado ecológico de los lagos para desarrollar soluciones y estrategias a fin de conservar los recursos naturales en la zona.

### **1.3. Objetivos**

#### *1.3.1. Objetivo General*

Evaluación del funcionamiento ecológico del lago altoandino San Marcos, provincia de Pichincha

#### *1.3.2. Objetivos Específicos*

- Analizar de manera multitemporal los cambios de superficie de la cuenca hidrográfica y de la cubeta lacustre
- Relacionar la información de los parámetros físico y químicos con el estado trófico del lago San Marcos
- Establecer la funcionalidad ecológica en base a los cambios morfológicos del lago y su estado trófico

#### *1.3.3. Preguntas Directrices*

Para el siguiente proyecto de investigación se planteó las siguientes preguntas directrices:

- ¿Cuáles son los parámetros físicos y químicos que determinan el estado trófico del lago San Marcos?
- ¿Cómo los cambios morfológicos determinan el funcionamiento ecológico del lago San Marcos?

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 1.1. Marco teórico Referencial

La evaluación de la calidad del agua se lleva a cabo mediante el análisis de diversas variables físicas, químicas y biológicas, tanto de manera individual y en conjunto. Estos parámetros proporcionan información profunda sobre la composición química y las características físicas del agua. El beneficio de utilizar variables fisicoquímicas radica en la rapidez de su medición y en la posibilidad de analizarlas con mayor frecuencia. Además, se pueden emplear para diferentes propósitos según las necesidades específicas de la información que se desea obtener. (Samboni et al., 2007). A diferencia de los parámetros biológicos, que proporcionan información sobre la biodiversidad del ecosistema, también ayudan a comprender el estado de conservación de los organismos acuáticos y sus respuestas a las condiciones ambientales (Polanía, 2010).

##### *1.1.1. Aplicación de la Teledetección en la Investigación de Cuerpos de Agua*

Los orígenes de la teledetección se remontan al siglo XIX, cuando Gaspar Félix fue pionero al obtener las primeras imágenes aéreas desde un globo, lo que marcó un importante avance en la observación fotográfica aérea (Arredondo y Rodríguez, 2005). En la década de 1970, se produjo un significativo avance tecnológico con el lanzamiento de los primeros satélites comerciales de Estados Unidos equipados con cámaras de reconocimiento, junto con la introducción de nuevos sensores como el radar y sistemas de comunicación avanzados. Desde entonces, estos avances se han aplicado en la exploración y gestión de los recursos naturales, permitiendo un seguimiento continuo y un monitoreo de la superficie terrestre mediante misiones satelitales consecutivas, como Landsat (Peña, 2007).

La teledetección es el proceso de capturar imágenes de la Tierra mediante la interacción de energía entre los sensores ubicados en el aire o el espacio y el objeto de estudio. Esta interacción puede ocurrir a través de la reflexión de la luz solar, fuentes de energía artificial o la emisión de luz propia del objeto observado. Las características espectrales del agua hacen que ciertas propiedades de esta sean fácilmente identificables mediante teledetección (Chuvieco, 2008). Los satélites Landsat se usan en la evaluación del entorno natural y del terreno y en la detección y monitoreo de cuerpos de agua. Estos satélites proporcionan imágenes uniformes que facilitan la identificación clara de diferentes objetos y la visualización de áreas de cambio. La dinámica

de los cuerpos de agua varía constantemente en distintos lugares y momentos, ejerciendo impacto sobre otros ecosistemas naturales y las comunidades humanas. Estos cambios pueden resultar tanto de factores naturales como consecuencia de la actividad humana (Sacristán, 2006; Xie *et al.*, 2016).

Según Aleja (2006), se ha observado un avance significativo en la tecnología utilizada para medir el nivel del agua en los embalses. Contar con sistemas de mediciones exactas facilita la gestión de reservas de agua en un embalse, lo que permite optimizar su explotación y prevenir situaciones de emergencia. La capacidad para identificar y extraer cuerpos de agua superficiales a partir de imágenes satelitales depende de lo que se conoce como "firma espectral". Esta firma se deriva de la reflectancia en diferentes longitudes de onda para cada una de las bandas del sensor, considerando también las variaciones temporales, condiciones meteorológicas y de iluminación (Miranda *et al.*, 2020).

#### *1.1.1.1. Análisis Multitemporal*

Este enfoque requiere la identificación de variables mediante clasificaciones analizadas desde dos perspectivas. Primero, se comparan 23 conjuntos de imágenes individuales; luego, las imágenes de ambos momentos temporales se clasifican juntas. En el primer método, cada imagen es clasificada de forma independiente por el mismo sujeto en dos momentos temporales, para su posterior comparación. Posteriormente, se construye una tabla de cambios de múltiples períodos que muestra el cambio entre las dos fechas (Jensen, 2000).

#### *1.1.2. Parámetros Físicos*

Una forma práctica y eficaz de detectar cambios en la estructura de un sistema lacustre, su distribución en el espacio y su evolución temporal es evaluar parámetros físicos debidos a influencias antropogénicas o procesos naturales, como la temperatura (T), la conductividad del agua (K) y el oxígeno disuelto (DO). La selección de estos parámetros dependerá del alcance de la investigación, ya que pueden reflejar la presencia de contaminantes orgánicos o inorgánicos en el agua (Mogollón *et al.*, 1993).

La temperatura es un componente físico fundamental que debe medirse en el propio ecosistema acuático, dado su gran impacto en dicho entorno. Este factor influye directamente en la distribución, el comportamiento y el metabolismo de los organismos acuáticos. Además, afecta la solubilidad del oxígeno, lo que puede perjudicar la aireación del sistema. Las variaciones en

la temperatura también inciden en la solubilidad de sales y gases en el agua, así como en todas sus propiedades, tanto químicas como en su comportamiento microbiológico (Marín, 2003).

La medición de la conductividad en un cuerpo de agua es un parámetro fundamental en el campo de la limnología, ya que proporciona información valiosa sobre el metabolismo del ecosistema acuático. Se ha observado que altos niveles de diversidad de especies suelen asociarse con bajas conductividades, mientras que lo contrario también es cierto: bajas diversidades de especies suelen corresponder a altas conductividades. La conductividad se define como la habilidad del agua para transportar una corriente eléctrica, la cual es resultado de la presencia de iones disueltos (Ramírez y Roldán, 2008).

Las sales y otras sustancias disueltas pueden tener un impacto significativo en la calidad del agua, tanto para consumo humano como para riego. Además, la conductividad influye en la vida acuática, ya que cada organismo tiene su propia tolerancia a diferentes niveles de conductividad. La conductividad del agua en entornos naturales está influenciada por diversos factores, como las características del terreno que atraviesa el agua y la capacidad de disolución de rocas y materiales. También se ve afectada por el tipo de sales presentes, el tiempo de disolución, la temperatura, los gases disueltos, el pH y otros factores que pueden influir en la solubilidad de las sustancias disueltas en el agua (Marín, 2003).

El color del agua surge de varios elementos, como ácidos húmicos, turba, plancton y determinados metales, incluyendo hierro, manganeso, cobre y cromo, que pueden encontrarse en estado disuelto o en suspensión. Este aspecto reviste importancia tanto desde una perspectiva estética como funcional. Los efectos del color en el ecosistema acuático se centran, principalmente, en la reducción de la transparencia del agua, lo cual incide en la visibilidad de la fauna piscícola. Asimismo, el color actúa como una barrera que disminuye la penetración de la luz solar, limitando de este modo los procesos fotosintéticos del fitoplancton y restringiendo la extensión de las áreas de crecimiento de la vegetación acuática (Del Pilar *et al.*, 2009). La transparencia del agua en los cuerpos lacustres, medida por la profundidad del disco Secchi, y la cantidad de materia orgánica disuelta influyen en la absorción de luz. Este parámetro es un indicador común del estado trófico, ya que está correlacionado con la biomasa de algas (Zou *et al.*, 2020).

La batimetría es un tipo de mapeo topográfico utilizado para representar las formas y características del relieve en áreas cubiertas por agua, como el lecho marino, ríos, ciénagas, humedales, lagos, embalses, entre otros cuerpos acuáticos. En esencia, se trata de cartografiar

los fondos de estos cuerpos de agua. Al igual que en los levantamientos topográficos tradicionales, se determinan las coordenadas X, Y y Z, siendo esta última la profundidad de los cuerpos de agua mapeados (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2014).

Además, ofrece una herramienta precisa para la caracterización de los fondos y la topografía de cuerpos de agua, permitiendo la detección de cualquier irregularidad existente en ellos. Estos estudios batimétricos tienen diversas aplicaciones, como la estimación volumétrica de cuerpos de agua y el análisis de la dinámica fluvial, para identificar áreas de erosión y sedimentación que potencialmente conducen a la formación de islas en los cauces fluviales. Además, son cruciales para la cartografía náutica y la navegación en cursos de agua de gran envergadura. Estos relevamientos son fundamentales para la implementación de modelos hidráulicos, que posibilitan la evaluación del comportamiento de los caudales y la predicción de eventos hidrológicos para predictivos y preventivos (IDEAM, 2014).

### *1.1.3. Parámetros Químicos*

Las características químicas de los cuerpos lacustres son indicadores que clasifican el agua según su nivel de calidad. Estos indicadores incluyen pH, gases disueltos, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, fósforo y nitrógeno totales (Rodríguez y Liriano, 2017). Estos parámetros químicos son fundamentales para evaluar la salud y la calidad del agua en diferentes cuerpos acuáticos. Además, se ha reconocido la influencia de las concentraciones de nutrientes como fósforo y nitrógeno en el desarrollo de las plantas acuáticas. (Quispe y Ayala, 2019).

La concentración de oxígeno disuelto (OD) en el agua es un parámetro fundamental para evaluar la calidad del ecosistema lacustre, niveles altos de (OD) indican una mejor calidad de agua y un ambiente propicio para la vida acuática (Yaguachi, 2013). El (OD) en un cuerpo de agua se da en función de la temperatura y presión atmosférica; la productividad y morfometría son factores importantes en el balance de oxígeno del lago. Las altas concentraciones de (OD) son el resultado de la fotosíntesis y aireación (Lampert, 2007), mientras que bajas concentraciones son el resultado de procesos como la oxidación y descomposición (Zhen *et al.*, 2008).

La clorofila (Chl) es otro de los parámetros para la evaluación de un ecosistema léntico, altas concentraciones muestran alta productividad, mientras que bajas concentraciones están asociadas a baja productividad de un lago, es así como la clorofila a puede ser usada como un

factor importante en la evaluación de la calidad de un ecosistema o estado trófico (Wetzel, 2001). Definido por el pigmento verde responsable de la capacidad de la planta para convertir la luz solar en la energía química necesaria para fijar CO<sub>2</sub> en hidratos de carbono (Gómez *et al.*, 2014).

El pH es un importante parámetro para evaluar los procesos que ocurren en los cuerpos de agua, debido que puede afectar la solubilidad y disponibilidad de nutrientes y minerales para los organismos acuáticos (Hossain *et al.*, 2019). El pH cambia durante el día, al usar dióxido de carbono las plantas pueden aumentar la alcalinidad del agua por lo que el pH aumenta, mientras que por la noche las plantas liberan dióxido de carbono haciendo que el pH disminuya o se vuelva más ácido. La acidificación del agua conduce a la pérdida de biodiversidad, mientras que la alcalinización provoca la proliferación de algas nocivas, lo que afecta la productividad del ecosistema (Dewangan *et al.*, 2007).

#### *1.1.4. Servicios Ecosistémicos*

Los servicios ecosistémicos comprenden todos los beneficios obtenidos de los ecosistemas, como el suministro de agua potable, producción de alimentos, regulación climática, prevención de la erosión, control de plagas, reciclaje de nutrientes, formación de suelo y producción de oxígeno. Además, incluyen belleza paisajística, valores culturales y espirituales de muchos lugares (Conabio y Sedema, 2016). El conjunto de servicios ecosistémicos que proporcionan los lagos abarca servicios valorados por los humanos que surgen debido a las actividades y presiones derivadas de las necesidades y deseos de interactuar con los lagos de maneras específicas (Schallenberg *et al.*, 2013).

#### *1.1.5. Clasificación de los Servicios Ecosistémicos*

La clasificación vigente de los servicios ecosistémicos proviene de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MA 2005), siendo la más reconocida y aceptada. Esta clasificación, diseñada con fines operativos, se basa en cuatro categorías funcionales: servicios de soporte, regulación, aprovisionamiento y culturales, con el objetivo de facilitar la toma de decisiones (Tabla 1).

**Tabla 1**

Clasificación de los Servicios Ecosistémicos

<b>Servicios de aprovisionamiento (Productos obtenidos de los ecosistemas)</b>	<b>Servicios de regulación (Beneficios obtenidos de la regulación de procesos de los ecosistemas)</b>	<b>Servicios culturales (Beneficios no obtenidos de los ecosistemas)</b>	<b>Servicios de soporte (Servicios necesarios para la producción de otros servicios de los ecosistemas)</b>
Alimentos	Regulación del clima	Espiritual y religioso	Formación de suelos
Agua dulce	Regulación de enfermedades	Recreativo y turístico	Reciclaje de nutrientes
Leña	Regulación y saneamiento del agua	Estético	Producción primaria
Fibras	Polinización	Inspirativo	
Bioquímicas		Educativo	
Recursos Genéticos		Identidad del sitio	
		Herencia cultural	

*Nota:* La tabla muestra las clasificaciones de los servicios ecosistémicos reconocidas y aceptadas

## **1.2. Marco Legal**

La presente investigación tiene como principal fundamento legal, la Constitución de la República del Ecuador establecida en el año 2008, mencionando lo siguiente: Título II Derechos: Capítulo segundo; Derechos del buen vivir Sección primera Agua y alimentación, menciona en el Art. 14 “Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, Sumak kawsay”

### *1.2.1. Título VII régimen del buen vivir*

Art. 406.- El Estado regulará la conservación, manejo y uso sustentable, recuperación, y limitaciones de dominio de los ecosistemas frágiles y amenazados; entre otros, los páramos, humedales, bosques nublados, bosques tropicales secos y húmedos y manglares, ecosistemas marinos y marinos-costeros.

Sección sexta: Agua

Art. 411.- El Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico. Se regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua, y el equilibrio de

los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua. La sustentabilidad de los ecosistemas y el consumo humano serán prioritarios en el uso y aprovechamiento del agua.

Art. 412.- La autoridad a cargo de la gestión del agua será responsable de su planificación, regulación y control. Esta autoridad cooperará y se coordinará con la que tenga a su cargo la gestión ambiental para garantizar el manejo del agua con un enfoque ecosistémico.

En el ámbito de los tratados internacionales, es importante destacar la Convención de Ramsar, un acuerdo intergubernamental a nivel global que establece medidas para la conservación de los humedales.

El convenio se puede tomar como punto de partida para la conservación a nivel nacional e internacional. La ideología Ramsar trata del “uso racional” que se define como "el mantenimiento de sus características ecológicas, logrado mediante la implementación de enfoques por ecosistemas, dentro del contexto del desarrollo sostenible". Por consiguiente, la conservación de los humedales, así como su uso sostenible y el de sus recursos, se hallan en el centro del "uso racional" en beneficio de la humanidad (Ramsar, 2014).

### *1.2.2. Código Orgánico Ambiental (COA)*

Basados en el Código Orgánico Ambiental (COA), el estudio se sustenta en el Art. 26, donde se manifiesta las facultades de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Provinciales en materia ambiental. El literal 6, señala la responsabilidad de los GAD's en generar normas y procedimientos para prevenir, evitar, reparar, controlar y sancionar la contaminación y daños ambientales, una vez que el Gobierno Autónomo Descentralizado se haya acreditado ante el Sistema Único de Manejo Ambiental. En el Art. 30 en el que se mencionan los objetivos del estado relativos a la biodiversidad, en el literal 3 se considera el establecer y ejecutar las normas de bioseguridad y las demás necesarias para la conservación, el uso sostenible y la restauración de la biodiversidad y de sus componentes, así como para la prevención de la contaminación, la pérdida y la degradación de los ecosistemas terrestres, insulares, oceánicos, marinos, marino-costeros y acuáticos Se consideró el Plan Nacional de Desarrollo, “Toda una vida” cuyo objetivo tercero es “Garantizar los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones” determina en su política 3.1 “Conservar, recuperar y regular el aprovechamiento del patrimonio nacional y social, rural y urbano, continental insular y marino-costero, que asegure y precautele los derechos de las presentes y futuras generaciones.” (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2017).



Art. 191.- Del monitoreo de la calidad del aire, agua y suelo. La Autoridad Ambiental Nacional o el Gobierno Autónomo Descentralizado competente, en coordinación con las demás autoridades competentes, según corresponda, realizarán el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire, agua y suelo, de conformidad con las normas reglamentarias y técnicas que se expidan para el efecto. Las normas técnicas serán impartidas y revisadas de manera regular, siguiendo las pautas establecidas en este Código. Las instituciones responsables en este campo impulsarán y estimularán la recopilación de información y la investigación sobre la contaminación atmosférica, los cuerpos de agua y el suelo, con el objetivo de identificar sus causas, efectos y posibles soluciones para reducirlos.

### *1.2.3. Ley Orgánica de Recursos Hídricos*

La presente ley de aguas garantiza y considera de gran importancia la conservación y el control para la contaminación, con el fin de proteger este recurso y sea aceptable, asequible para uso recreacional y doméstico.

En el Art. 64 se menciona que la naturaleza o Pacha Mama tiene derecho a la conservación de las aguas con sus propiedades como soporte esencial para todas las formas de vida. La protección de sus fuentes, zonas de captación, regulación, recarga, afloramiento y cauces naturales de agua, en particular, nevados, glaciares, páramos, humedales y manglares. El Art. 65 menciona que los recursos hídricos serán gestionados de forma integrada e integral, con enfoque ecosistémico que garantice la biodiversidad, la sustentabilidad y su preservación conforme con lo que establezca el Reglamento de esta Ley.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA

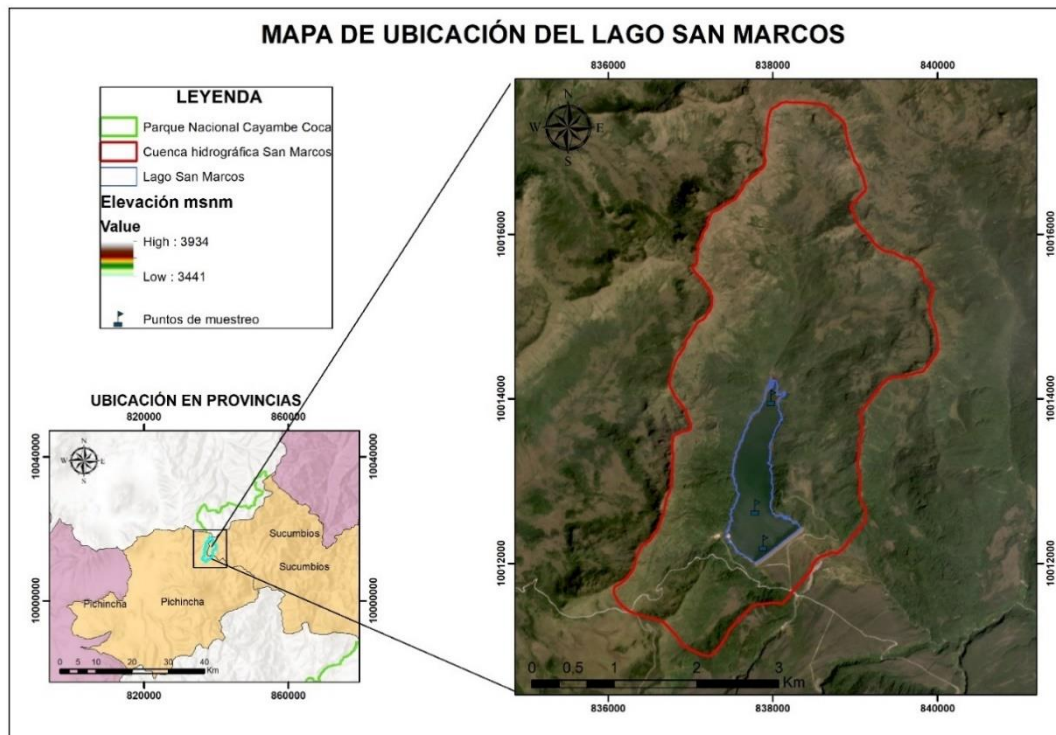
#### 2. Descripción del Área de Estudio

En la provincia de Pichincha, en el cantón Cayambe, en la parroquia de Olmedo, se encuentra ubicado el lago San Marcos, originario de eventos volcánicos y glaciares. El río Azuela nace en este lugar y desemboca en el Quijos. Está rodeado de elevaciones como el Cerro Jatuncunga al norte, el Cerro El Mirador y las Lomas Coloradas hacia el sur, las lomas de Murlo Filo al este y el Filo de Talcas al oeste, en el flanco nororiental del volcán Cayambe. Se encuentra dentro del Parque Nacional Cayambe-Coca, a una altura aproximada de 3500 m.s.n.m., como se observa en la figura 1 (Bermeo y Basantes, 2017).

La temperatura del agua en el lago San Marcos varía entre 0 y 12° C. La vegetación incluye páramo de pajonal y pantanoso, varios tipos de bosques siempreverdes y matorral húmedo montano alto. La flora representativa abarca taruga, achicoria, chuquiragua, romerillo, licopodio, achupalla y quinua. La fauna incluye 106 especies de mamíferos, 395 de aves, 70 de reptiles y 116 de anfibios (Parque Nacional Cayambe Coca, 2021).

**Figura 1**

Mapa de ubicación del lago San Marcos



**Nota:** La figura presenta la ubicación del lago San Marcos. Elaborado por Bosque y Sandoval (2024).

## 2.1. Materiales y Equipos

En el siguiente apartado se presentan los materiales y equipos que certifica la robustez y credibilidad de los resultados alcanzados. Los materiales se dividen en material general, insumos y material de escritorio. La tabla 2 a continuación detalla estos materiales y equipos.

**Tabla 2**

Materiales y Equipos

<b>Materiales Generales</b>	<b>Materiales de Campo</b>	<b>Materiales de Escritorio</b>	<b>Materiales e Insumos Varios</b>	<b>Equipos</b>
Vehículo Alquilado	Pipetas Pasteur	Computador	Tubos Falcon de 50 ml	GPS Garmin
Gel Antiséptico	Jeringuillas de 10 ml	Impresora		Fluorímetro Aquafluor® Turner Designs
Guantes	Mascarilla	Cartuchos de tinta		
Botas de Hule	Guantes de Caucho	Internet		
Ropa Impermeable	Guantes de Latex	Disco Secchi		
Hielera	Esferos-lapiz	Botellas Ban Dorm		
Fundas herméticas	Marcadores	Bote inflable		
	Tubos de ensayo			

**Nota:** En la tabla se presentan los materiales y equipos empleados durante la investigación

## 2.2. Metodología

A continuación, se describe la metodología detallada a utilizarse, correspondiendo a cada objetivo específico del presente trabajo:

### 2.2.1. *Determinación de las Condiciones Climáticas, los cambios de superficie de la cuenca hidrográfica y la cubeta lacustre*

Para determinar las condiciones climáticas del área de estudio, se analizó la información proporcionada por la Red Integrada de Monitoreo Hidrometeorológico del INHAMI. Se seleccionó la estación meteorológica con el código M5025, correspondiente a "La Virgen de Papallacta". La información se obtuvo para los años 2019, 2020 y 2021. Esta estación se encontraba a una altitud de 3.150 msnm y estaba ubicada en las coordenadas geográficas 00° 21' 47" S y 77° 08' 49" O. Se recopiló información diaria sobre los parámetros de temperatura (°C) y precipitación (mm). Posteriormente, se elaboraron el diagrama ombrotérmico y gráficos para cada uno de los parámetros ambientales (Rodríguez y Miño, 2018).

El inicio de las investigaciones limnológicas consistió en la caracterización morfológica de los cuerpos de agua, lo que permitió determinar la ubicación de los puntos de muestreo. Además, se generó una visión general sobre el funcionamiento del sistema, considerando las interfases entre agua-aire y agua-sedimento (Monyoua, 2008).

El trabajo actual se centró en recopilar antecedentes relacionados con las aplicaciones de técnicas del Sistema de Información Geográfica (SIG). Se llevó a cabo una descripción detallada del área de estudio, seleccionada a partir de la carta topográfica y las imágenes satelitales utilizadas. Además, se investigaron instituciones que trabajan con información cartográfica física y digital, como el Instituto Geográfico Militar (IGM), el Sistema Nacional de Información (SNI) y Apollo Mapping. Se consultaron estas páginas oficiales para obtener información relevante.

Para verificar el cambio de superficie, se adquirieron imágenes satelitales de Apollo Mapping en fechas con menos nubosidad, ya que la presencia frecuente de nubes en la zona de estudio puede dificultar la obtención de datos claros. La georreferenciación de los datos espaciales implicó seleccionar imágenes y ajustarlas a un sistema de coordenadas específico para su integración en el entorno SIG. Las imágenes fueron ajustadas al sistema de coordenadas con la proyección cartográfica Universal Transversal de Mercator (UTM), utilizando el Datum WGS 84 y la Zona 17 Sur. Este proceso permitió la correcta ubicación y visualización de los datos dentro del entorno SIG, facilitando su análisis y gestión.

Se realizaron los siguientes procesos para obtener el mapa de uso y cobertura vegetal:

**Clasificación supervisada:** Para desarrollar la clasificación supervisada, se utilizó el criterio de verosimilitud, el cual indica la probabilidad de reproducir una muestra utilizando un conjunto predefinido de categorías previamente caracterizadas (Castillejo et al., 2009). En las imágenes procesadas, se generaron polígonos de entrenamiento que representan de manera distintiva las categorías que se desean implementar en la elaboración de la cobertura vegetal para cada año.

Las firmas espectrales fueron generadas dentro del software ArcGIS 10.8, utilizando la herramienta *Create Signatures* y los polígonos asignados con las categorías correspondientes. Estas firmas espectrales fueron posteriormente clasificadas mediante el algoritmo de Clasificación de Máxima Verosimilitud. Para mejorar la precisión de la cobertura vegetal, se

aplicó un filtro para eliminar las celdas clasificadas incorrectamente, utilizando la herramienta *Eliminate* del mismo software ArcGIS 10.8. La clasificación supervisada consideró cuatro categorías, descritas en la Tabla 3.

**Tabla 3**

Codificación de la Cobertura y Uso del Suelo

<b>Categoría</b>	<b>Código</b>
Bosque nativo	1
Paramo	2
Infraestructura	3
Cuerpo de agua	4

*Nota:* En la tabla se muestra los códigos empleados para la clasificación supervisada

**Validación del modelo:** El coeficiente Kappa de Cohen permite conocer con exactitud la clasificación de las categorías, identificando si se aleja o se acerca al valor esperado de la concordancia que se obtiene de una asignación aleatoria. El coeficiente kappa puede tomar valores entre -1 y +1. Mientras más cercano a +1, mayor es el grado de concordancia, por el contrario, mientras más cercano a -1, mayor es el grado de discordancia (Cerdeja y Villarreal, 2008).

### 2.2.2. *Relacionar la Información de los Parámetros Físicos y Químicos con el Estado Trófico del Lago San Marcos*

Los puntos de muestreo y monitoreo fueron seleccionados teniendo en cuenta la morfología del lago, las condiciones físicas y químicas del agua, contenido de nutrientes presentes y las entradas de agua, naturales y artificiales (Samanez et al., 2014). Además, se consideró la variabilidad de las condiciones climáticas locales durante las épocas seca y lluviosa. El monitoreo se llevó a cabo mediante una salida de campo, en la que se realizaron tomas de datos físicos y químicos. Se establecieron tres puntos de monitoreo, seleccionados en función de la profundidad y las entradas de agua al lago, para abarcar toda la extensión de éste.

Con el fin de identificar alteraciones físicas en la etapa inicial, se llevó a cabo un levantamiento batimétrico utilizando un GPS Garmin 526s conectado a la ECO SONDA de la misma serie, complementado con una computadora de campo. Los equipos se instalaron en una estructura de madera adaptada al bote para garantizar la estabilidad y precisión del escaneo. Debido a la extensión del lago, se dividió en cinco zonas: orillas, noroeste, suroeste, noreste y sureste, y la actividad se extendió a lo largo de un día. Los datos de los puntos batimétricos del lago San

Marcos se registraron inicialmente en formato del programa Dr. Deep (drd) y luego se convirtieron a formato Excel (XLS). En este proceso, se modificó la profundidad positiva a profundidad negativa para poder utilizarlos en el programa ArcGIS y graficar el mapa batimétrico (Rodríguez y Miño, 2018).

Con el objetivo de correlacionar las variables físicas y químicas, se realizaron las siguientes actividades para obtener muestras precisas para su análisis en el laboratorio, como lo describe Delgado (2021).

Para la observación en campo, se visitó el lago San Marcos para realizar observaciones directas y registrar datos visuales mediante una cámara fotográfica. Se utilizó un cuaderno de registro para anotar las observaciones. La medición del potencial de hidrógeno (pH) se realizó en campo con un pH-metro, verificando primero que tuviera batería y calibrándolo según las condiciones del lago altoandino, registrando los datos en un formato específico.

La conductividad, el oxígeno disuelto y la temperatura fueron medidos utilizando un multiparámetro, el cual fue calibrado antes de la salida al campo. Los pasos que se siguieron consistieron en sumergir el sensor a una profundidad aproximada de dos metros y esperar alrededor de 30 segundos para que los datos se reflejaran en la pantalla del multiparámetro y fueran registrados en el cuaderno de campo.

Por último, se midió la transparencia del agua empleando un disco Secchi, que consiste en un círculo de 20 cm de diámetro con cuadrantes pintados en negro y blanco, unido a una cuerda graduada en metros. Para realizar esta medición, se sumergió el disco gradualmente hasta que desapareció de la vista, y se anotó la profundidad alcanzada. Para llevar a cabo esta tarea, se utilizó un bote para desplazarse sobre el lago.

#### *2.2.2.1. Determinación de Clorofila – a extraída (Chl-a)*

El agua fue extraída a una profundidad promedio de dos metros utilizando un muestreador para plancton Schindler-Patalas. Luego, se envasó en una botella de un litro, se etiquetó y se llevó al laboratorio. Para la determinación de clorofila-a (Chl-a), se utilizó el método de fluorometría propuesto por Rice et al. (2017), en el que se empleó metanol como solvente para extraer la clorofila de las células. Se tomó una muestra de 300 ml de cada botella, que fue previamente filtrada con una red de 64  $\mu\text{m}$ , y luego se pasó por filtros de fibra de vidrio Whatman GF/F (0,7  $\mu\text{m}$  de poro). El volumen filtrado varía dependiendo de la saturación del filtro; en nuestro caso, se utilizaron 200 ml (Wetzel y Likens, 2000).

Los filtros fueron cortados en pequeños fragmentos y almacenados en un tubo protegido de la luz con 10 ml de metanol (Figura 10). Posteriormente, se refrigeraron durante 24 horas a 4°C y se centrifugaron a 3000 rpm durante 20 minutos. La medición fluorométrica se realizó con el equipo Turner Designs 8000 010. Los resultados obtenidos se transformaron utilizando la siguiente fórmula.

$$Chla \left( \mu g/l \right) = \frac{1.1526 * (\text{valor fluorímetro}) * \left( \frac{Vol1_{metanol}}{Vol2_{filtrado}} \right)}{2.45} \quad (1)$$

Se utilizó el Índice de Estado Trófico de Carlson (ISC) para evaluar el estado trófico del lago San Marcos. Este índice considera factores como la concentración de nutrientes, la clorofila y la transparencia del agua (Ledesma, 2019).

Formulas:

$$IETC (Transparencia) = 10 * \left( 6 * \frac{Ln Transparencia}{Ln 2} \right) \quad (2)$$

Donde: IETC (transparencia) es el índice de estado trófico de Carlson para la transparencia y Ln transparencia el logaritmo natural del valor de transparencia (m).

$$IETC (Clorofila a) = 10 * \left\{ \left[ \frac{2.04 - 0.68 * (Ln clorofila)}{Ln 2} \right] \right\} \quad (3)$$

Donde: IETC (clorofila a) es el índice de estado trófico de Carlson para la clorofila a y Ln clorofila a el logaritmo natural de la concentración de clorofila a (mg/m3).

$$IETC (Transparencia) = 10 * \left[ 6 - \left( \frac{Ln \frac{48}{PT}}{Ln 2} \right) \right] \quad (4)$$

Donde: IETC (PT) es el índice de estado trófico de Carlson para el fósforo total y Ln PT el logaritmo natural de la concentración de fósforo total (mg/m3).

### *2.2.3. Funcionalidad Ecológica en base a los cambios morfológicos del lago y su estado trófico*

Se recopiló datos sobre los cambios en la morfología del lago, las variaciones en la profundidad y las características fisicoquímicas, esto permitió identificar el estado trófico del lago San Marcos. Además, se evaluó los servicios ecosistémicos proporcionados por el lago en el año 2016 y se comparó con los servicios actuales.

Posterior se elaboró dos mapas que ofrecieron una vista detallada de las entradas. El mapa del año 2016 mostró las entradas naturales y su relación con el terreno limítrofe, así como los flujos de agua natural, elementos clave para entender cómo el lago interactuaba con su entorno antes de su conversión en embalse. En el mapa del año 2024, se reflejaron tanto las entradas naturales como las artificiales, mostrando los cambios inducidos por el proyecto de riego Cayambe-Pedro Moncayo.

Para evaluar los servicios ecosistémicos del lago, se presentaron dos gráficos correspondientes a los años 2016 y 2024. Esta comparación gráfica mostró la transformación física y química del lago San Marcos, así como las variaciones en los servicios ecosistémicos que proporcionaba, evidenciando una evolución destinada a adaptarse a las nuevas necesidades y usos en la región. Según Delgado et al. (2018), los servicios ecosistémicos abarcan las interacciones socioecológicas entre el ser humano y la naturaleza, contribuyendo al bienestar de las personas y a las economías locales y nacionales.



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

Dentro de este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante el tiempo de experimentación, con base en cada uno de los objetivos específicos propuestos.

#### 4.1. Análisis Multitemporal de los cambios de Superficie de la Cuenca Hidrográfica y de la Cubeta Lacustre

##### 4.1.1. Condiciones Climáticas

###### a) Diagrama Ombrotérmico

Para la determinación de la estacionalidad climática (época seca y época lluviosa) del área de estudio, se emplearon datos de temperatura y precipitación de la estación meteorológica M5025-La Virgen de Papallacta (Tabla 4). El diagrama ombrotérmico fue elaborado a partir del promedio de tres años de anuarios meteorológicos creados por EPMAPS-Agua de Quito y FONAG, que conforman la Red Integrada de Monitoreo Hidrometeorológico.

**Tabla 4**

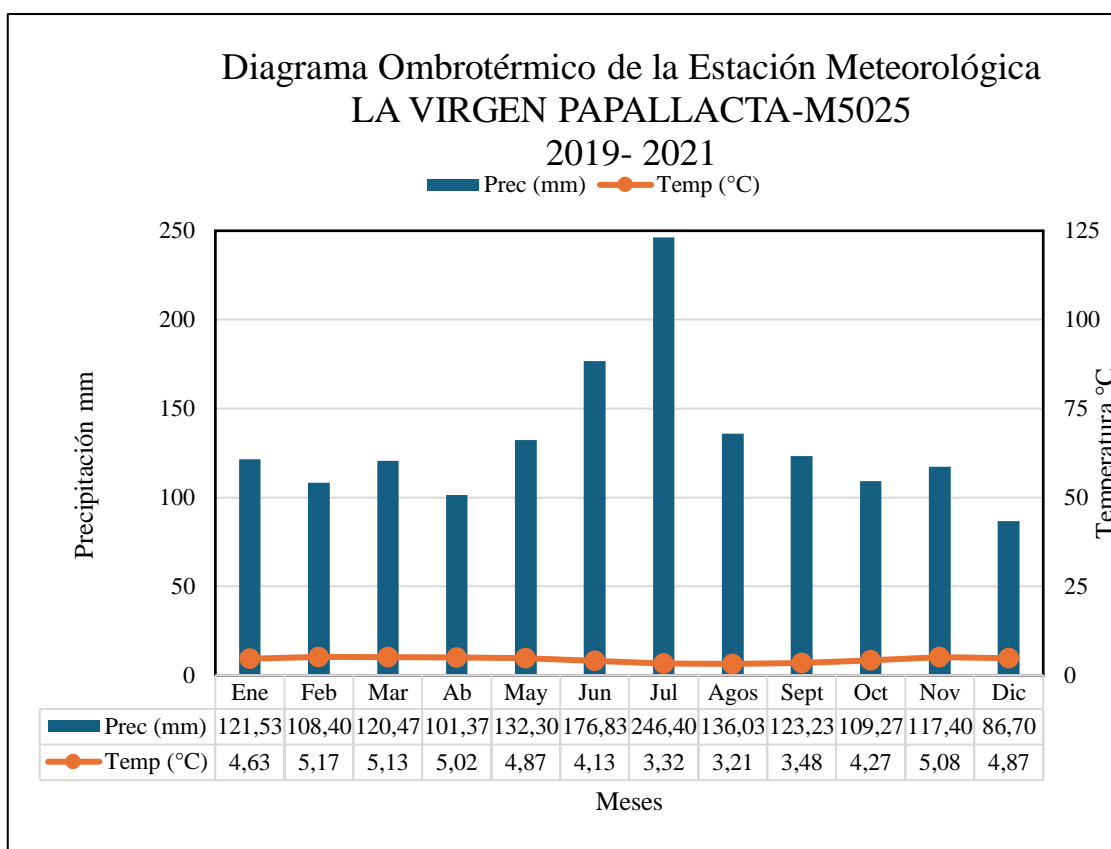
Datos promedios mensuales de precipitación y temperatura de la estación meteorológica M5025 (2019-2021)

Mes	Ene	Feb	Mar	Ab	May	Jun	Jul	Agos	Sept	Oct	Nov	Dic
<b>Prec (mm)</b>	121,53	108,40	120,47	101,37	132,30	176,83	246,40	136,03	123,23	109,27	117,40	86,70
<b>Temp (°C)</b>	4,63	5,17	5,13	5,02	4,87	4,13	3,32	3,21	3,48	4,27	5,08	4,87

El diagrama ombrotérmico (Figura 2) de La Virgen de Papallacta muestra una temperatura media de 4,43 °C y una precipitación media de 131,66 mm. El análisis de la temperatura y la precipitación indica que en esta área el mes de diciembre pertenece a la época seca, con una temperatura promedio de 4,87 °C y una precipitación media de 86,70 mm. Por otro lado, los meses con mayor precipitación son junio y julio, con 176,83 mm y 246,40 mm, respectivamente. El diagrama ombrotérmico indica un régimen anual de lluvias uniforme, ya que las precipitaciones están bien distribuidas a lo largo del año.

**Figura 2**

Diagrama ombrotérmico de la Estación Meteorológica La Virgen Papallacta-M5025 2019 al 2021

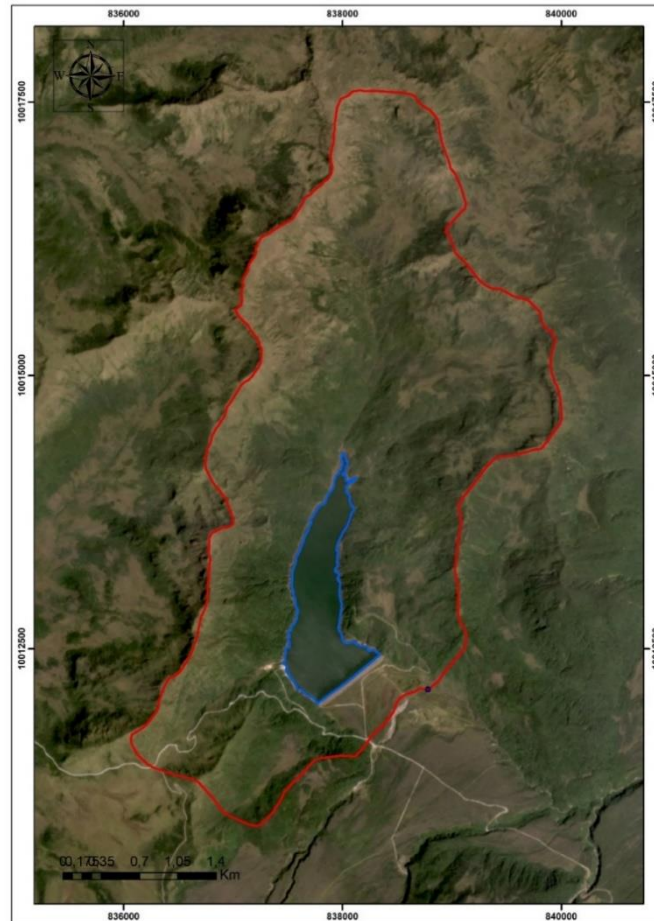


**Nota:** La figura presenta el análisis climático de La Virgen de Papallacta: Estacionalidad y Distribución de Precipitaciones. Elaborado por Bosque y Sandoval (2024).

En la Figura 3 se observa la cuenca hidrográfica, abarca un área total de 13,62 km<sup>2</sup>. El perímetro que delimita esta cuenca se extiende a lo largo de 18,11 km, reflejando su forma y extensión. Se puede apreciar que el ancho máximo de la cuenca es de 2,47 km. Estos datos permiten entender las características físicas de la cuenca, mismas que influyen en la captación y drenaje de agua.

**Figura 3**

Mapa de la Cuenca hidrográfica del lago San Marcos



*Nota:* La figura presenta la delimitación de la cuenca hidrográfica y el lago San Marcos. Elaborado por Bosque y Sandoval (2024).

### **b) Parámetros Morfométricos**

A partir de los parámetros morfométricos (Tabla 5), se define que la cuenca presenta una forma alargada, dado que el Factor Forma es menor que 1, lo que indica una baja susceptibilidad a las avenidas. Este hecho sirve como punto de referencia para predecir el comportamiento de la escorrentía superficial en una cuenca, ya que las cuencas alargadas tienden a experimentar un flujo de agua más rápido en comparación con las cuencas de forma redondeada. Además, esta cuenca presenta una forma oval redonda a oval oblonga, dado que el Coeficiente de Compacidad ( $K_c$ ) se encuentra en un rango de 1,25 a 1,5.

El valor del Índice de Alargamiento indica que la cuenca es moderadamente alargada, ya que se encuentra en un rango de 1,5 a 2,8. Esta característica influye en la velocidad del flujo de agua y en la dinámica de la escorrentía superficial en la zona. El caudal de agua tiende a ser

moderado, lo que sugiere que la cuenca puede experimentar variaciones estacionales en el volumen de agua que fluye, pero el sistema tiene la capacidad de absorber altas precipitaciones sin provocar inundaciones significativas.

**Tabla 5**

Parámetros morfométricos

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
Área	Km <sup>2</sup>	13,62
Perímetro de la cuenca	Km	18,11
Longitud Axial (LA)	km	5,5
Ancho de la cuenca (B)	Km	2,47
Parámetros de Forma		
Coeficiente Gravelious (kc)		1,37
Factor de Forma de Horton (kf)		0,45
Índice de alargamiento (Ia)		2,227
Parámetros de Relieve		
Cota mayor (CM)	msnm	3934
Cota menor (Cm)	msnm	3441
Elevación media del relieve	msnm	3643
Diferencia de nivel (Dn)	m	493
Pendiente media (J)	%	33,17
Parámetros de drenaje		
Longitud del curso principal	m	3819,96
Cota mayor del cauce (CMc)	msnm	3752
Cota menor del cauce (Cmc)	msnm	3474
Pendiente media del cauce (Jc)		0,072775631
Tiempo de concentración	horas/minutos	0,510/30600

**Nota:** En la tabla se muestra los parámetros morfológicos correspondientes a la cuenca del Lago San Marcos

La pendiente promedio en la cuenca es del 33,17 %, lo que denota un relieve montañoso con un rápido escurrimiento debido a sus pendientes pronunciadas. Esta inclinación genera mayor energía cinética, provocando un aumento en la erosión y el transporte de sedimentos. La pendiente pronunciada puede aumentar el riesgo de deslizamientos de tierra y la velocidad de escorrentía superficial, lo que a su vez puede afectar la estabilidad de las riberas y la calidad del agua.

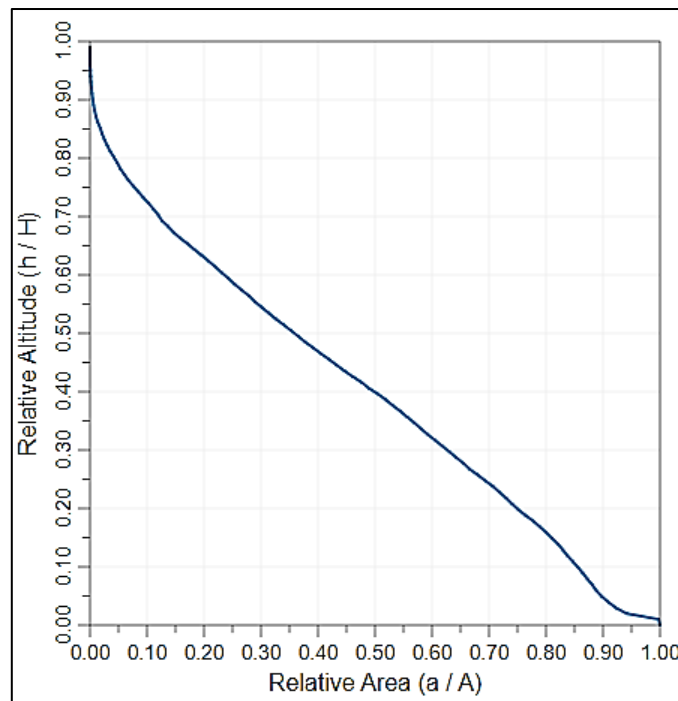
El Tiempo de Concentración (Tc) de 0,5 horas (30 minutos) indica que el agua que llueve en el punto más lejano de la cuenca tarda 30 minutos en llegar al nivel de base o fin de la cuenca. Este corto tiempo de concentración sugiere que la cuenca responde de forma rápida a eventos de precipitación, lo que puede resultar en flujos de agua súbitos propensos a inundaciones

rápidas. Además, un tiempo de concentración tan breve es característico de cuencas con pendientes pronunciadas y redes de drenaje eficientes, donde el agua se moviliza rápidamente a través del sistema. Esta combinación de alta pendiente y corto tiempo de concentración implica que la cuenca es altamente reactiva a las precipitaciones, con una rápida generación de caudales en respuesta a las lluvias.

Se generó el gráfico correspondiente a la curva hipsométrica, que representa la variación de la elevación de la cuenca respecto al nivel medio del mar. En la curva se observa que es una cuenca en equilibrio, es decir, en fase de madurez (Figura 4). La pendiente de la curva indica que la mayor parte del área de la cuenca se encuentra en una altitud intermedia, lo cual es característico de cuencas maduras donde la erosión y sedimentación están balanceadas. Este equilibrio sugiere una distribución homogénea de la altitud a lo largo de la cuenca, contribuyendo a una escorrentía y un drenaje eficientes.

**Figura 4**

Curva hipsométrica de la Cuenca del lago San Marcos



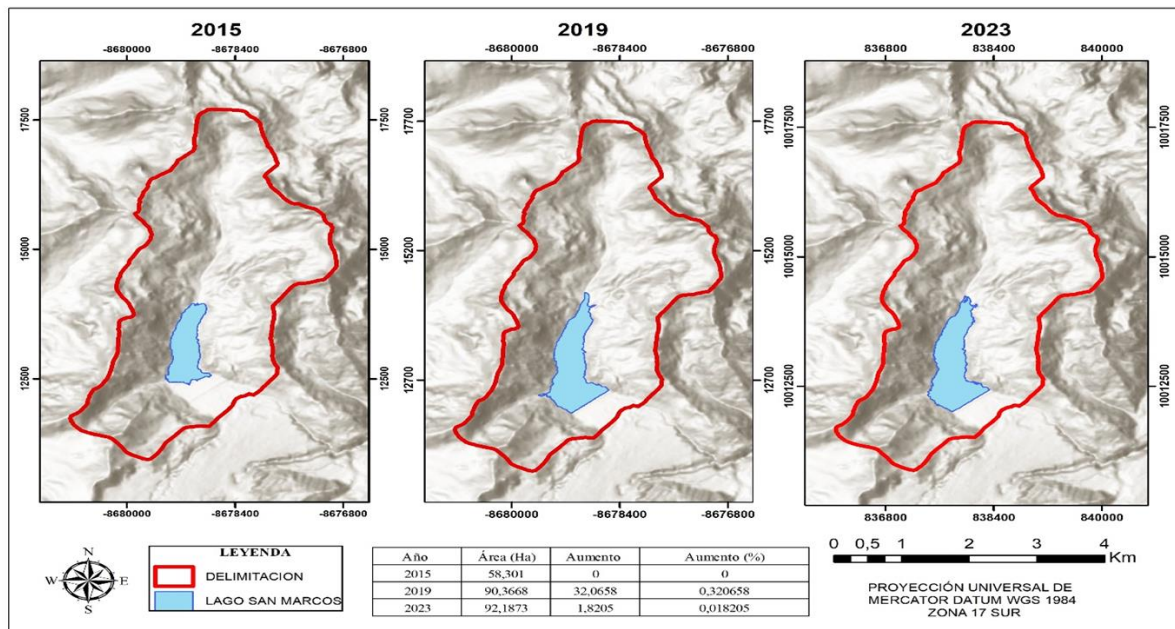
**Nota:** La gráfica muestra la relación entre la altitud y el área relativas de la cuenca, indicando un estado de equilibrio o fase de madurez. Elaborado por Bosque y Sandoval (2024).

#### 4.1.2. Análisis Multitemporal

La Figura 5 muestra los cambios en el perfil lacustre durante los años 2015, 2019 y 2023, así como el aumento porcentual del área en esos periodos. En 2015, el lago tenía un área de 58,301 hectáreas. Para 2019, esta área aumentó a 90,36 hectáreas, lo que representa un incremento del 54,94%. En 2023, se observa un aumento adicional del 2,02%, alcanzando un total de 92,1873 hectáreas.

**Figura 5**

Mapa de cambios del perfil del lago San Marcos



**Nota:** La gráfica muestra los cambios multitemporales que ha atravesado el perfil lacustre del lago San Marcos. Elaborado por Bosque y Sandoval (2024).

Esta sección se presentan los resultados obtenidos al aplicar la clasificación supervisada utilizando tres modelos diferentes, correspondientes a los años 2015, 2018 y 2023. Los resultados de la matriz de confusión para los tres periodos indican que la precisión entre las coberturas clasificadas y observadas es alta.

La Tabla 6 muestra la matriz de confusión para el año 2015. Los resultados demuestran que la mayoría de las coberturas se clasificaron correctamente, aunque la precisión fue variable entre las diferentes categorías. Esto se lo puede apreciar en la cobertura de Bosque Nativo (BN) tiene una precisión del 40%, con 10 aciertos y 15 errores. La cobertura de Páramo (P) muestra una precisión del 100%, con 7 aciertos y ningún error. La cobertura de Infraestructura (I) también presenta una precisión del 100%, con 6 aciertos y ningún error. Finalmente, la cobertura de

Cuerpo de Agua (CA) muestra una precisión del 100%, con 18 aciertos y ningún error. En total, se clasificaron 56 observaciones. La precisión del productor fue del 100% para Bosque Nativo, Infraestructura y Cuerpo de Agua, mientras que para Páramo fue del 31,82%. La precisión general del modelo fue del 73,214%, con un valor Kappa de 0.646.

**Tabla 6**

Matriz de confusión para el año 2015

<b>COBERTURA</b>	<b>BN</b>	<b>P</b>	<b>I</b>	<b>CA</b>	<b>Clasificación general</b>	<b>Precisión del usuario</b>
<b>BN</b>	10	15	0	0	25	40%
<b>P</b>	0	7	0	0	7	100%
<b>I</b>	0	0	6	0	6	100%
<b>CA</b>	0	0	0	18	18	100%
<b>Total</b>	10	22	6	18	56	
<b>Precisión del productor</b>	100%	31,82%	100%	100%	<b>Precisión:</b>	73,214%
					<b>Kappa:</b>	0.646

*Nota:* BN: Bosque Nativo; P: Páramo; I: Infraestructura; CA: Cuerpo de Agua

La Tabla 7 muestra la matriz de confusión para el año 2019. Los resultados demuestran que en general, la clasificación es bastante precisa, con algunas variaciones en la precisión entre las diferentes categorías. Esto se lo puede apreciar en categoría correspondiente a la cobertura de Bosque Nativo (BN) tiene una precisión del usuario del 78,947%, con 30 aciertos y 8 errores. La cobertura de Páramo (P) muestra una precisión del usuario del 91,667%, con 11 aciertos y 1 error. La cobertura de Infraestructura (I) presenta una precisión del usuario del 100%, con 11 aciertos y ningún error. Finalmente, la cobertura de Cuerpo de Agua (CA) también muestra una precisión del usuario del 100%, con 14 aciertos y ningún error. En total, se clasificaron 75 observaciones. La precisión del productor fue del 96,774% para Bosque Nativo, del 57,895% para Páramo, y del 100% para Infraestructura y Cuerpo de Agua. La precisión general del modelo fue del 88%, con un valor Kappa de 0.827.

**Tabla 7**

Matriz de confusión para el año 2019

COBERTURA	BN	P	I	CA	Clasificación general	Precisión del usuario
<b>BN</b>	30	8	0	0	38	78,947%
<b>P</b>	1	11	0	0	12	91,667%
<b>I</b>	0	0	11	0	11	100%
<b>CA</b>	0	0	0	14	14	100%
<b>Total</b>	31	19	11	14	75	
<b>Precisión del productor</b>	96,774%	57,895%	100%	100%	<b>Precisión:</b>	88%
					<b>Kappa:</b>	0.827

*Nota:* BN: Bosque Nativo; P: Páramo; I: Infraestructura; CA: Cuerpo de Agua

La Tabla 8 muestra la matriz de confusión para el año 2023. Los resultados de esta tabla indican que la clasificación fue completamente precisa, sin errores en ninguna de las categorías. Esto se evidencia en que todas las coberturas (Bosque Nativo - BN, Páramo - P, Infraestructura - I, y Cuerpo de Agua - CA) tienen una precisión del usuario del 100%. Específicamente, la cobertura de Bosque Nativo tuvo 40 aciertos y ningún error, la cobertura de Páramo tuvo 44 aciertos y ningún error, la cobertura de Infraestructura tuvo 10 aciertos y ningún error, y la cobertura de Cuerpo de Agua tuvo 49 aciertos y ningún error. En total, se clasificaron 143 observaciones. La precisión del productor para todas las coberturas fue del 100%. La precisión general del modelo fue del 100%, con un valor Kappa de 1.

**Tabla 8**

Matriz de confusión para el año 2023

COBERTURA	BN	P	I	CA	Clasificación general	Precisión del usuario
<b>BN</b>	40	0	0	0	40	100%
<b>P</b>	0	44	0	0	44	100%
<b>I</b>	0	0	10	0	10	100%
<b>CA</b>	0	0	0	49	49	100%
<b>Total</b>	40	44	10	49	143	
<b>Precisión del productor</b>	100%	100%	100%	100%	<b>Precisión:</b>	100%
					<b>Kappa:</b>	1

*Nota:* BN: Bosque Nativo; P: Páramo; I: Infraestructura; CA: Cuerpo de Agua



Por medio de la validación (Tablas 5, 6 y 7), se obtuvo una precisión del 73.214% y un índice Kappa de 0.646 para el año 2015. Para el 2019, se alcanzó una precisión del 88% y un índice Kappa de 0.827. En cambio, para el 2023, se logró una precisión del 100% y un índice Kappa de 1. Por consiguiente, el modelo de validación para los tres periodos fue considerable y casi perfecto, según la clasificación de rangos del coeficiente Kappa expuesta en la Tabla 9.

**Tabla 9**

Valoración del coeficiente Kappa

<b>Coeficiente Kappa</b>	<b>Fuerza de la concordancia</b>
0.00	Pobre
0.01-0.20	Leve
0.21-0.40	Aceptable
0.41-0.60	Moderado
0.61-0.80	Considerable
0.80-1.00	Casi perfecto

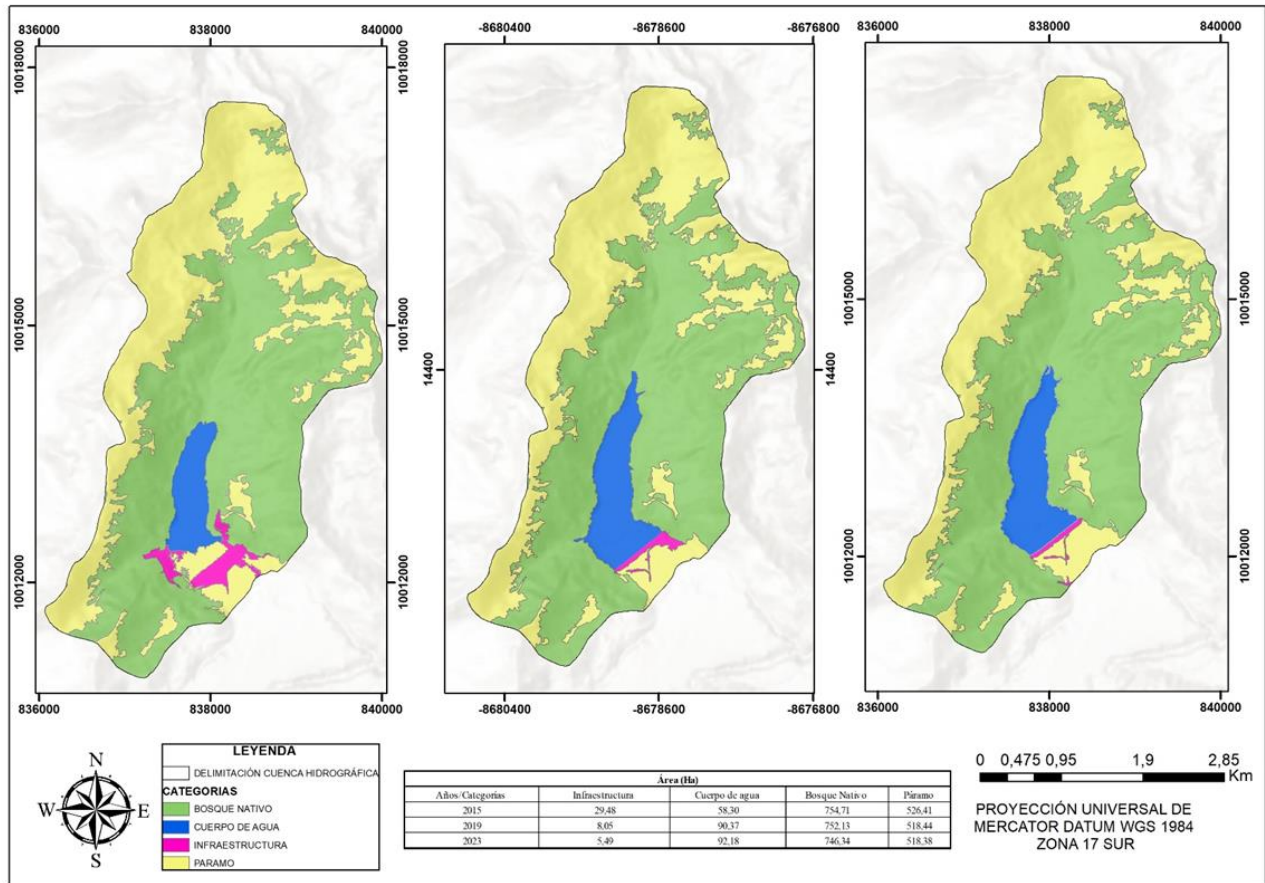
*Nota:* En la tabla se muestra los valores del coeficiente Kappa para validar los modelos. Adaptado de Rosero (2017)

Mediante la obtención de tres mapas multitemporales, se estimó la variación de la cobertura y uso de suelo para los años 2015, 2019 y 2023. La figura 6 presenta los mapas de uso y cobertura de suelo para los años 2015, 2019 y 2023, destacan las categorías de Bosque Nativo, Páramo, Infraestructura y Cuerpo de Agua, delimitadas en la cuenca hidrográfica del lago San Marcos.

En 2015, el área de Infraestructura era de 29.48 hectáreas, la de Cuerpo de Agua era de 58.30 hectáreas, la de Bosque Nativo alcanzaba 754.71 hectáreas y la de Páramo era de 526.41 hectáreas. En 2019, se observó una reducción en el área de Infraestructura a 8.05 hectáreas, mientras que el Cuerpo de Agua aumentó su área a 90.37 hectáreas. El Bosque Nativo tuvo una ligera disminución a 752.13 hectáreas y el Páramo redujo su área a 518.44 hectáreas. Para 2023, la Infraestructura continuó disminuyendo, alcanzando 5.49 hectáreas, y el Cuerpo de Agua mostró un incremento adicional, alcanzando 92.18 hectáreas. El Bosque Nativo disminuyó a 746.34 hectáreas y el Páramo se mantuvo relativamente estable en 518.38 hectáreas.

**Figura 6**

Mapa de uso y cobertura de suelo de los años, 2015, 2019 y 2023



**Nota:** La gráfica muestra los cambios en el Uso y Cobertura de Suelo para los años 2015, 2019 y 2023 en el lago San Marcos. Elaborado por Bosque y Sandoval (2024).

Los cambios observados en el área del Cuerpo de Agua muestran un crecimiento constante de 58.30 hectáreas en 2015 a 92.18 hectáreas en 2023. La Infraestructura, por otro lado, ha disminuido desde 29.48 hectáreas en 2015 a 5.49 hectáreas en 2023. Tanto el Bosque Nativo como el Páramo han mostrado una disminución en su área total, aunque de manera menos pronunciada en comparación con la Infraestructura.

**Tabla 10**

Área de diferentes tipos de cobertura y usos del suelo, período 2015, 2019 y 2023

Años/Categorías	Área (Ha)			
	Infraestructura	Cuerpo de agua	Bosque Nativo	Páramo
<b>2015</b>	29,48	58,30	754,71	526,41
<b>2019</b>	8,05	90,37	752,13	518,44
<b>2023</b>	5,49	92,18	746,34	518,38

Según la Tabla 10, para el año 2015, el cambio representativo fue la implementación de infraestructura, alcanzando un área de 29,48 ha. A lo largo de los años, la infraestructura disminuyó, pasando de 8,05 ha en 2019 a 5,49 ha en 2023. En el año 2019, la variación importante se observó en el cuerpo de agua, que aumentó de 58,30 ha en 2015 a 90,37 ha en 2019. Además, el páramo sufrió una reducción de 526,41 ha a 518,44 ha entre los años 2015 y 2019. En el año 2023, la alteración relevante ocurrió en el bosque nativo, que disminuyó de 752,13 ha a 746,34 ha entre los años 2019 y 2023. Sin embargo, la cobertura del páramo no experimentó un cambio tan drástico.

## **4.2. Relacionar la información de los parámetros físicos y químicos con el estado trófico del lago San Marcos**

### *4.2.1. Análisis multitemporal batimétrico años: 2016 – 2024*

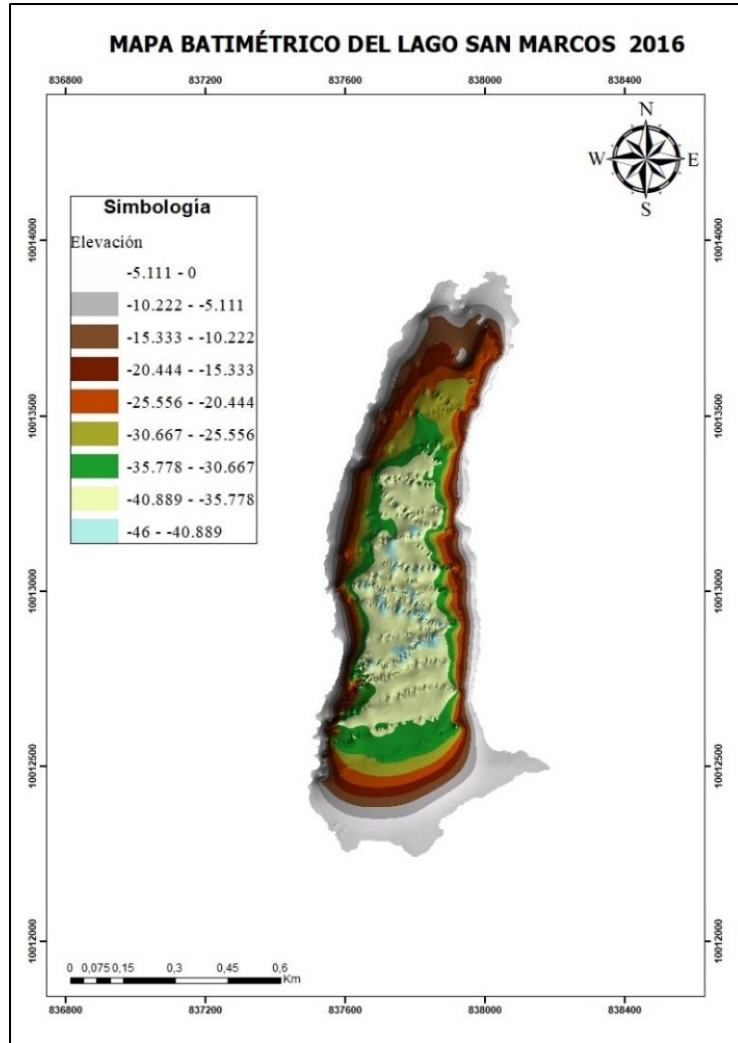
A continuación, se detallan los mapas batimétricos realizados en el año 2016 y 2024 del lago San Marcos (Figuras 7 y 8).

En el mapa batimétrico del lago San Marcos de 2016, se observa que el punto más profundo es de 46 metros. Este mapa proporciona una representación detallada de la topografía del fondo del lago, utilizando líneas de contorno llamadas isobatas para conectar puntos de igual profundidad. La escala de colores aplicada facilita la visualización de las variaciones en la profundidad del lago. Las áreas más someras se muestran en tonos grisáceos, mientras que las zonas más profundas, incluido el punto de 46 metros, se representan en colores celeste claro. Esta gradación de colores permite a los usuarios identificar rápidamente las zonas de mayor y menor profundidad.

El mapa batimétrico del lago San Marcos de 2024 muestra un punto de profundidad máxima de 51 metros y refleja los cambios dinámicos en el ecosistema del lago debido a la conexión de los ríos Arturo, Boquerón y San Pedro. Esta información actualizada permite una mejor comprensión de la actual topografía del fondo del lago, facilitando la planificación efectiva para la conservación y el uso sostenible del recurso hídrico, teniendo en cuenta los impactos ecológicos de la confluencia de estos ríos.

**Figura 8**

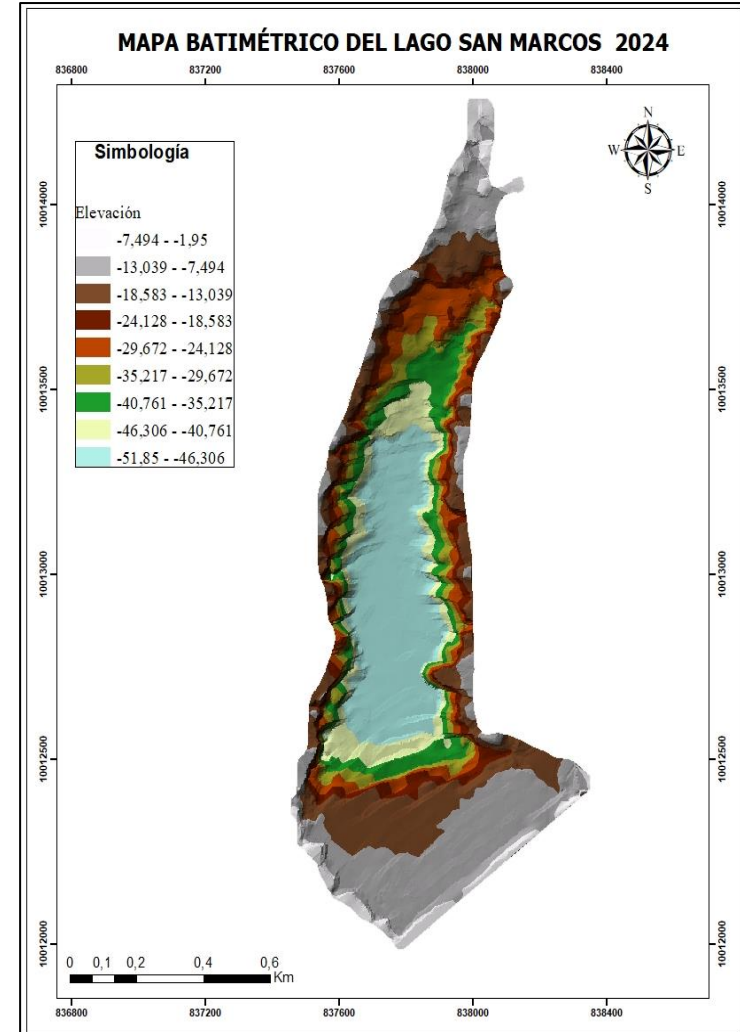
Mapa Batimétrico del lago San Marcos del 2016



*Nota:* La gráfica muestra el mapa batimétrico correspondiente al año 2016 del lago San Marcos. Elaborado por Bosque y Sandoval (2024).

**Figura 7**

Mapa Batimétrico del lago San Marcos



*Nota:* La gráfica muestra el mapa batimétrico correspondiente al año 2024 del lago San Marcos. Elaborado por Bosque y Sandoval (2024).

#### 4.2.2. Análisis de Parámetros Físico – químicos

A continuación, se detallan los parámetros físicos medidos en el lago San Marcos

La Tabla 11 muestra los datos recopilados en el lago San Marcos, con medidas tomadas en tres puntos distintos identificados como P1, P2 y P3. Estos puntos incluyen las variables: profundidad del disco de Secchi (D. Secchi), concentración de oxígeno disuelto (O.D), porcentaje de oxígeno disuelto (% O.D), temperatura (T), presión barométrica, conductividad y pH.

**Tabla 11**

*Puntos establecidos en el lago San Marcos*

<b>Punto</b>	<b>D. Secchi (m)</b>	<b>O.D (mg/L)</b>	<b>O.D (%)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Presión Barométrica (mmHg)</b>	<b>Conductividad (µs/cm)</b>	<b>pH</b>
P1	1,5	7,29	69	13,4	683,4	39,8	6,39
P2	1,9	9,04	88	14,4	683,6	39,2	6,53
P3	2	6,83	56,6	12,9	683,6	41,9	6,62
Promedio	1,80	7,72	71,2	13,57	683,53	40,30	6,51

**Nota:** PP: Punto Profundo; PE: Punto Entrada; PI: Punto Intermedio

En el punto P1, la profundidad del disco de Secchi es de 1,5 metros, con una concentración de oxígeno disuelto de 7,29 mg/L, que representa el 69% de saturación. La temperatura en este punto es de 13,4 °C, la presión barométrica es de 683,4 mmHg, la conductividad es de 39,8 µS/cm y el pH es de 6,39.

En el punto P2, la profundidad del disco de Secchi es de 1,9 metros, con una concentración de oxígeno disuelto de 9,04 mg/L, correspondiente al 88% de saturación. La temperatura es de 14,4 °C, la presión barométrica se encuentra en 683,6 mmHg, la conductividad es de 39,2 µS/cm y el pH es de 6,53.

El punto P3 muestra una profundidad del disco de Secchi de 2 metros, una concentración de oxígeno disuelto de 6,83 mg/L, que equivale al 56,6% de saturación. La temperatura en este punto es de 12,9 °C, la presión barométrica es de 683,6 mmHg, la conductividad es de 41,9 µS/cm y el pH es de 6,62.

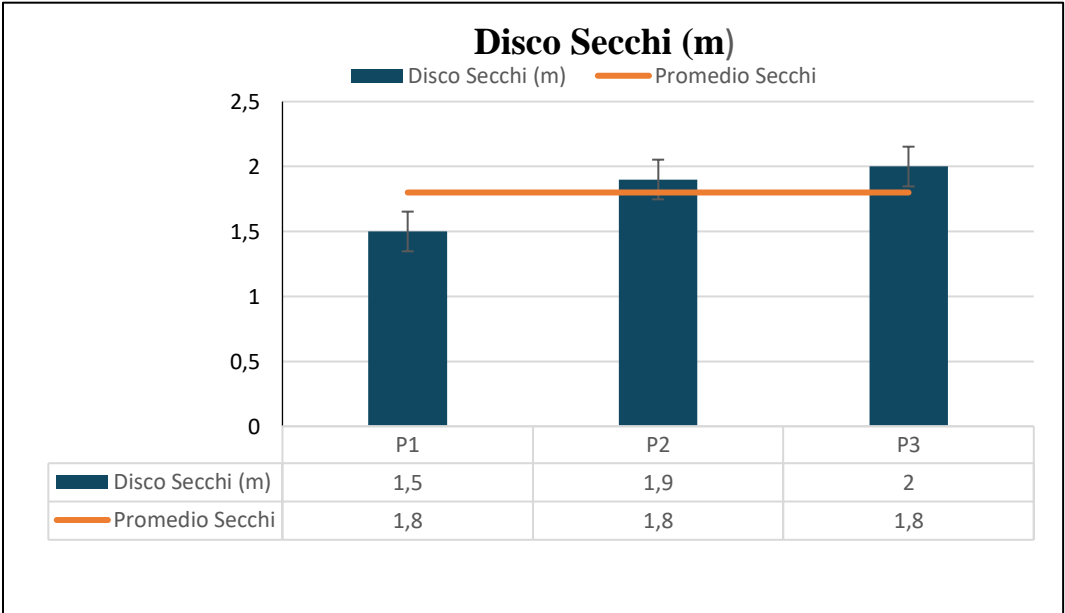
Los promedios de los datos para los tres puntos son los siguientes: profundidad del disco de Secchi de 1,80 metros, concentración de oxígeno disuelto de 7,72 mg/L (71,2% de saturación), temperatura de 13,57 °C, presión barométrica de 683,53 mmHg, conductividad de 40,30  $\mu$ S/cm y pH de 6,51. La tabla revela que la profundidad del disco de Secchi y el oxígeno disuelto varían entre los puntos, mientras que la temperatura, presión barométrica y conductividad son bastante uniformes, con ligeras diferencias en el pH.

a) Disco Secchi (m)

En la Figura 9 se observa que no existe una variación notoria en los diferentes puntos de muestreo. El promedio general del Disco Secchi en el lago San Marcos es de 1,80 metros de profundidad, lo que indica una mala calidad del agua y alta turbidez en todo el cuerpo del lago. Esto tiene implicaciones ecológicas significativas, ya que la luz solar penetra menos en el agua, limitando la fotosíntesis de plantas acuáticas y algas beneficiosas. Esta condición puede resultar en una disminución del oxígeno disuelto, afectando negativamente a la fauna acuática (Rodríguez y Miño, 2018).

Figura 9

Diagrama de comparación entre los valores y el promedio del D. Secchi (m)



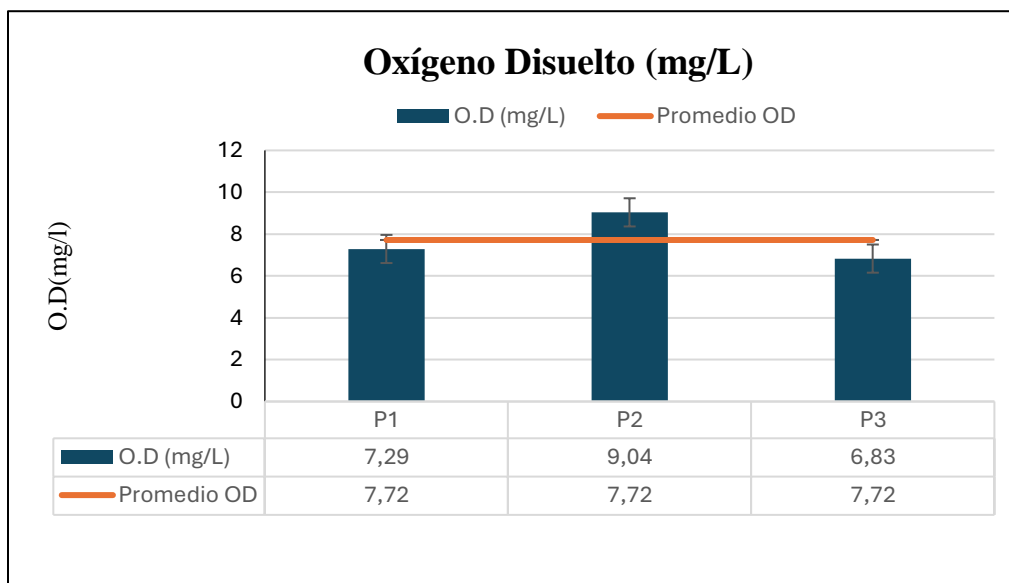
**Nota:** La gráfica muestra un diagrama de comparaciones entre los valores y el promedio del D. Secchi. Elaborado por Bosque y Sandoval (2024).

b) *Oxígeno Disuelto (mg/L)*

En la Figura 10, se observa que los puntos de concentración de oxígeno disuelto superan los 6 mg/L, alcanzando hasta 9 mg/L, lo que indica un nivel óptimo para el funcionamiento adecuado de varios procesos ecológicos del lago. El promedio general de oxígeno disuelto en el lago San Marcos es de 7,72 mg/L, lo cual es un indicador de buena oxigenación del agua, permitiendo la vida de diversas especies acuáticas. Por otro lado, según Delgado (2021), la concentración de oxígeno disuelto puede variar desde 0 hasta 15 mg/L. Las corrientes frías de montaña probablemente tendrán concentraciones de oxígeno disuelto de 7 a 15 mg/L, dependiendo de la temperatura del agua y de la presión atmosférica.

**Figura 10**

Diagrama de comparación entre los valores y el promedio del O. Disuelto (mg/L)



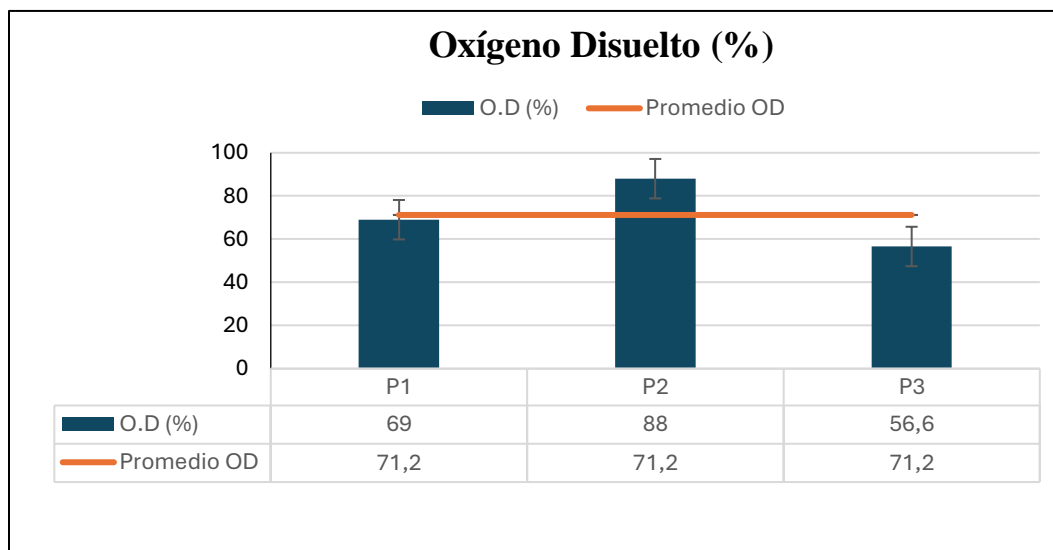
**Nota:** La gráfica muestra un diagrama de comparaciones entre los valores y el promedio de Oxígeno Disuelto. Elaborado por Bosque y Sandoval (2024).

c) *Oxígeno Disuelto (%)*

En la Figura 11 se observa que el promedio general de oxígeno disuelto es del 71.2%, lo que representa un nivel óptimo para el funcionamiento adecuado de los procesos ecológicos en el lago, indicando que el agua está bien oxigenada. Esta condición es crucial para mantener un buen equilibrio ecológico en el lago, ya que garantiza que no se desarrollen organismos anaeróbicos que podrían causar problemas al ecosistema del lago (Delgado, 2021).

**Figura 11**

Diagrama de O. Disuelto (%)



**Nota:** La gráfica muestra un diagrama de comparaciones entre los valores y el promedio del Porcentaje de Oxígeno Disuelto. Elaborado por Bosque y Sandoval (2024).

*d) Temperatura*

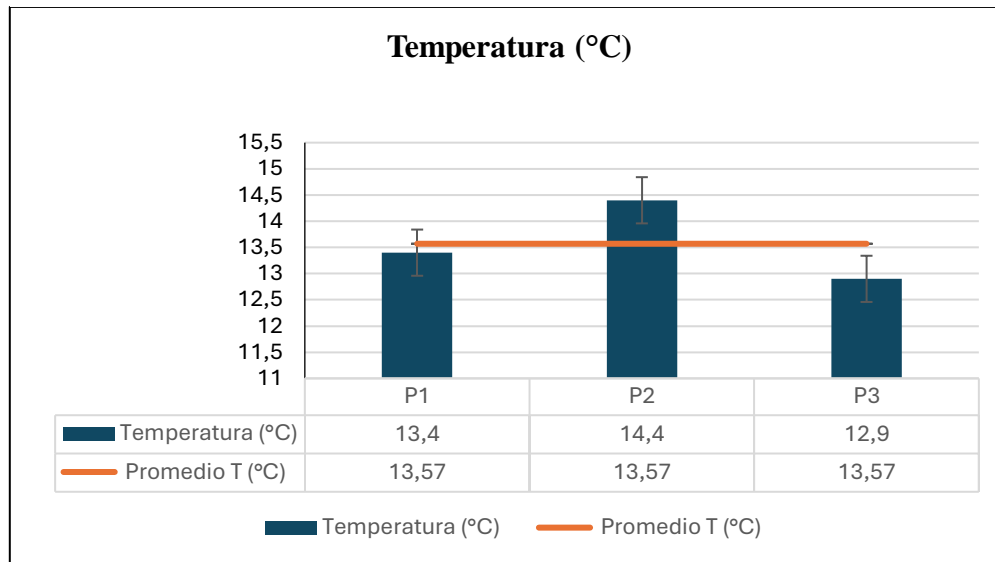
Como se evidencia en la Figura 12, el estudio mostró que el lago San Marcos tiene una temperatura promedio de 13,57 °C, debido a su ubicación bajo las faldas del Volcán Cayambe. Esta baja temperatura es característica de los cuerpos de agua situados en altitudes elevadas, como los lagos y lagunas de zonas montañosas, que están influenciados por la altitud y el clima frío de la región.

La temperatura del agua es un factor crucial que afecta la solubilidad del oxígeno, el metabolismo de los organismos acuáticos y la composición de las especies. Según un estudio realizado por Rodríguez y Miño (2018) sobre el lago San Pablo, la temperatura también varía en función de la radiación solar; este lago tiene una temperatura de 17 °C y presenta una radiación solar más estable debido a su ubicación geográfica. En contraste, el lago San Marcos, al estar cubierto de neblina y cerca de un nevado, recibe menos radiación solar, lo que resulta en una temperatura más baja. Sin embargo, esta temperatura es adecuada para las especies presentes en el lago.



**Figura 12**

Diagrama de comparación entre los valores y el promedio de la Temperatura (°C)



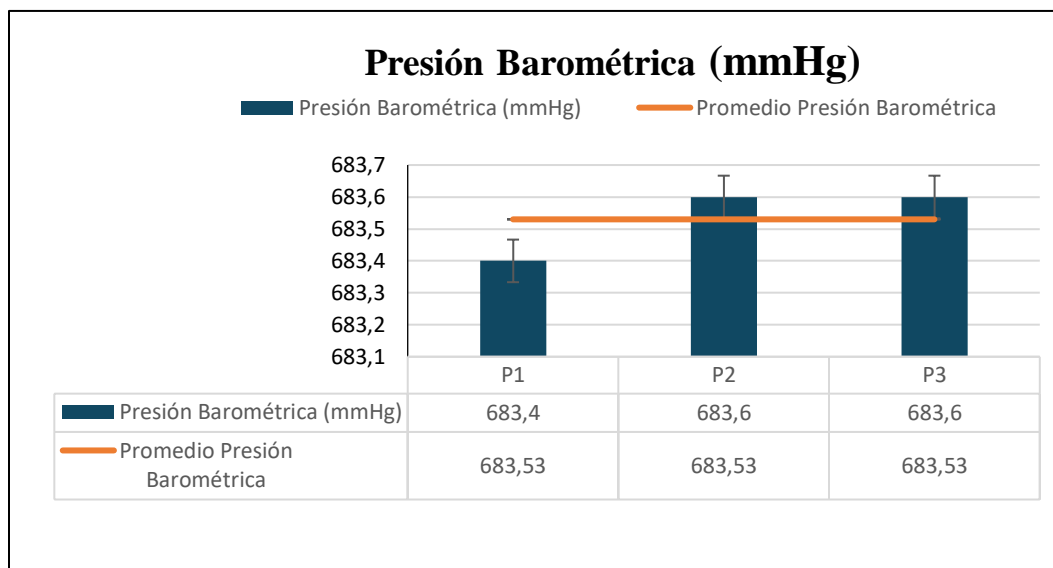
**Nota:** La gráfica muestra un diagrama de comparaciones entre los valores y el promedio de la Temperatura. Elaborado por Bosque y Sandoval (2024).

e) *Presión Barométrica (mmHg)*

La presión barométrica en la Figura 13 se mantuvo constante en los distintos puntos medidos en el lago San Marcos, con un promedio de 683,53 mmHg. Este valor es característico de zonas elevadas, donde la presión atmosférica es menor. Según Orozco, Flores, Durán y Corral (2011), la estabilidad de la presión barométrica en el lago es un indicador importante de la consistencia de las condiciones atmosféricas en la región, lo cual es esencial para la estabilidad del ecosistema del lago. La presión barométrica influye en la solubilidad del oxígeno en el agua; en áreas elevadas, menor presión atmosférica puede influir en la cantidad de oxígeno disuelto. Por lo tanto, la presión barométrica en el lago es adecuada para el ecosistema acuático.

**Figura 13**

Diagrama de comparación entre los valores y el promedio de la Presión Barométrica (mmHg)



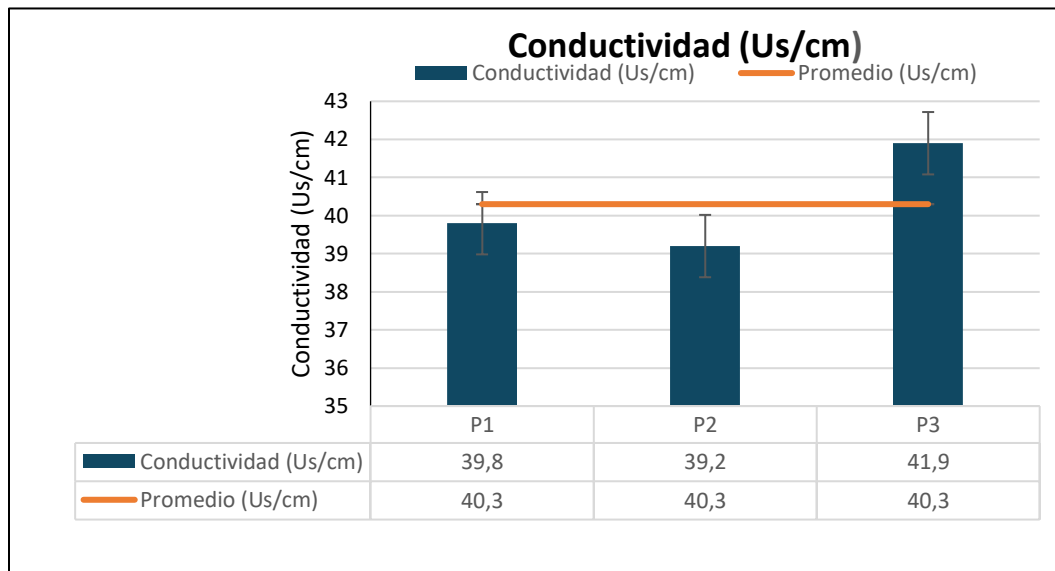
**Nota:** La gráfica muestra un diagrama de comparaciones entre los valores y el promedio de la Presión Barométrica. Elaborado por Bosque y Sandoval (2024).

*f) Conductividad ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )*

La conductividad media, como se muestra en la Figura 14, es de  $40.3 \mu\text{S}/\text{cm}$  para el lago San Marcos. Este valor indica una baja presencia de iones disueltos y sugiere que la calidad del agua es excelente, ya que es inferior a  $250 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Según FEM (2015), un aumento en la conductividad del agua puede señalar cambios en el escurrimiento hacia un lago, lo que puede deberse a variaciones en las tasas de flujo o al incremento de materiales erosionables en el agua, los cuales frecuentemente introducen contaminantes o alteran el hábitat biológico. Por lo tanto, se puede deducir que la buena conductividad del lago San Marcos se debe a sus varias entradas de agua.

**Figura 14**

Diagrama de comparación entre los valores y el promedio de la Conductividad ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )



**Nota:** La gráfica muestra un diagrama de comparaciones entre los valores y el promedio de Conductividad Eléctrica. Elaborado por Bosque y Sandoval (2024).

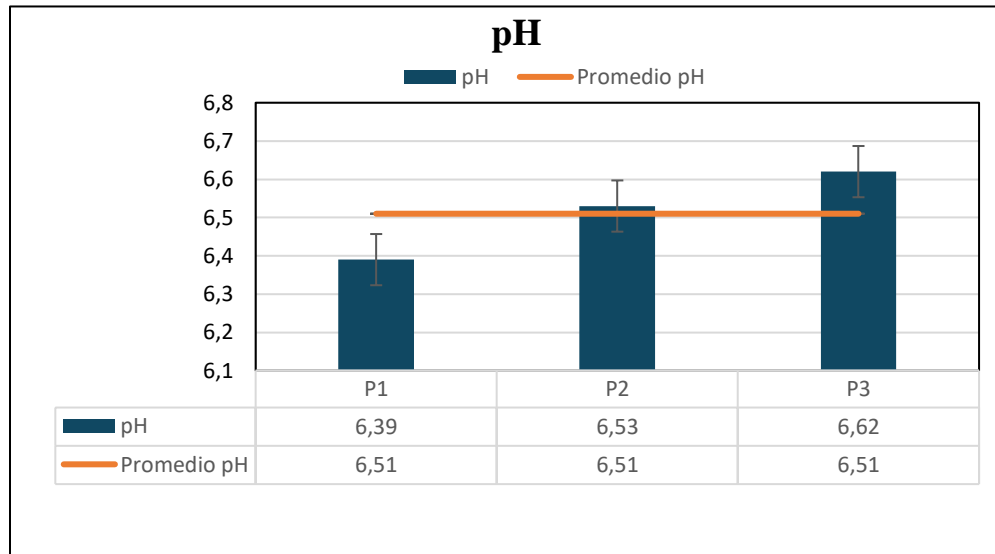
*g) pH*

Se observa en la Figura 15 que el lago San Marcos presenta un pH promedio de 6,51, lo que indica condiciones ligeramente ácidas. Esta acidez puede deberse a la descomposición de materia orgánica en el lago.

El nivel de acidez del agua juega un papel clave en la salud general del ecosistema del lago. La variación en el pH puede afectar la diversidad de especies, ya que algunas tienen mayor tolerancia a ambientes ácidos, mientras que otras pueden sufrir consecuencias negativas o incluso desaparecer. La acidificación del agua también puede ser un indicador de problemas ambientales más amplios, como la acidificación del suelo en la cuenca hidrográfica o la contaminación atmosférica. Además, López (2019), en su estudio de la Laguna Colta, afirma que las aguas con un pH anormal pueden causar desequilibrios nutricionales o contener iones tóxicos que alteran el crecimiento normal de las plantas. Por lo tanto, el pH ligeramente ácido del lago San Marcos es adecuado para el desarrollo de muchas plantas.

**Figura 15**

Diagrama de comparación entre los valores y el promedio del pH



**Nota:** La gráfica muestra un diagrama de comparaciones entre los valores y el promedio de pH. Elaborado por Bosque y Sandoval (2024).

*h) Clorofila – a (Chla)*

Para la medición de clorofila, se consideraron puntos clave en el lago: el punto PP (el más profundo), el punto PE (un punto de entrada natural) y el punto PI (ubicado entre dos entradas artificiales). Se recolectaron muestras en estos puntos y se midió la clorofila-a (Chl-a) con un fluorímetro, realizando tres mediciones por punto. Además, se incluyó un control con agua destilada. La concentración promedio de Chl-a en el lago San Marcos fue de 3,09 µg/L, calculada utilizando la Fórmula 1 de Chl-a descrita en la sección de metodología. Para el análisis, se utilizaron 10 ml de metanol y se filtró la clorofila a partir de 200 ml de la muestra.

**Tabla 12**

Medición de Chl-a y control con el fluorímetro aplicado la fórmula

<b>Datos de Chl-a</b>			
<b>1PS</b>	<b>2PS</b>	<b>3PS</b>	<b>C</b>
4,22	3,61	3,56	0,26
4,16	3,66	3,53	0,27
4,14	3,66	3,44	0,25

<b>MEAN</b>	4,17	3,64	3,51	0,26
	<b>1PE</b>	<b>2PE</b>	<b>3PE</b>	
	2,43	2,47	3,10	
	2,40	2,44	3,06	
	2,44	2,42	3,02	
<b>MEAN</b>	2,42	2,44	3,06	
	<b>1PP</b>	<b>2PP</b>	<b>3PP</b>	
	3,54	3,41	3,27	
	3,52	3,36	3,20	
	3,50	3,39	3,28	
<b>MEAN</b>	3,52	3,39	3,25	

El valor de Chl-a (3,09 µg/L) se encuentra en el rango de lagos mesotróficos (Tabla 13). Este tipo de lagos se caracteriza por tener niveles moderados de nutrientes, así como una claridad del agua y una cantidad de biomasa moderadas. Además, los lagos mesotróficos tienden a ser más estables y menos susceptibles a cambios bruscos en las condiciones ambientales en comparación con los lagos eutróficos.

**Tabla 13**

Promedios obtenidos con la fórmula general de la Chl-a

	<b>MEAN-C</b>		
	1PS	2PS	3PS
	3,91	3,64	3,25
	1PE	2PE	3PE
	2,16	2,44	2,81
	1PP	2PP	3PP
	3,26	3,38	2,98
<b>Promedio</b>	3,11	3,15	3,01
<b>Promedio Total</b>	3,09		
<b>TSI(CHL)</b>	9,81*LN(Y26) +30,6		41,67

En contraste, en el lago San Pablo, ubicado en Ecuador, Rodríguez y Miño (2018) informaron una alta concentración de clorofila-a, atribuida a la abundancia de géneros de fitoplancton, indicando un proceso de eutrofización en ese ecosistema. Asimismo, Aubriot et al. señalaron que, en la laguna de Rocha, en Uruguay, la concentración de clorofila-a fluctuó entre  $9,7 \pm$

7,1 µg/L y  $6,4 \pm 4,6$  µg/L, concluyendo que la laguna es altamente vulnerable y muestra signos de eutrofización acelerada debido a las actividades humanas en la zona.

**Tabla 14**

Clasificación del índice de estado trófico (TSI) de acuerdo con Carlson (1997)

TSI	Chl (ug/L)	SD (m)	TP (ug/L)	Attributes	Water Supply	Fisheries & Recreation
<30	<0.95	>8	<6	<b>Oligotrophy:</b> Clear water, oxygen throughout the year in the hypolimnion	Water may be suitable for an unfiltered water supply.	Salmonid fisheries dominate
30-40	0.95-2.6	8-4	6-12	Hypolimnia of shallower lakes may become anoxic		Salmonid fisheries in deep lakes only
40-50	2.6-7.3	4-2	12-24	<b>Mesotrophy:</b> Water moderately clear; increasing probability of hypolimnetic anoxia during summer	Iron, manganese, taste, and odor problems worsen. Raw water turbidity requires filtration.	Hypolimnetic anoxia results in loss of salmonids. Walleye may predominate
50-60	7.3-20	2-1	24-48	<b>Eutrophy:</b> Anoxic hypolimnia, macrophyte problems possible		Warm-water fisheries only. Bass may dominate.
60-70	20-56	0.5-1	48-96	Blue-green algae dominate, algal scums and macrophyte problems	Episodes of severe taste and odor possible.	Nuisance macrophytes, algal scums, and low transparency may discourage swimming and boating.
70-80	56-155	0.25-0.5	96-192	<b>Hypereutrophy:</b> (light limited productivity). Dense algae and macrophytes		
>80	>155	<0.25	192-384	Algal scums, few macrophytes		Rough fish dominate; summer fish kills possible

### 4.3. Establecer la funcionalidad ecológica en base a los cambios morfológicos del lago y su estado trófico

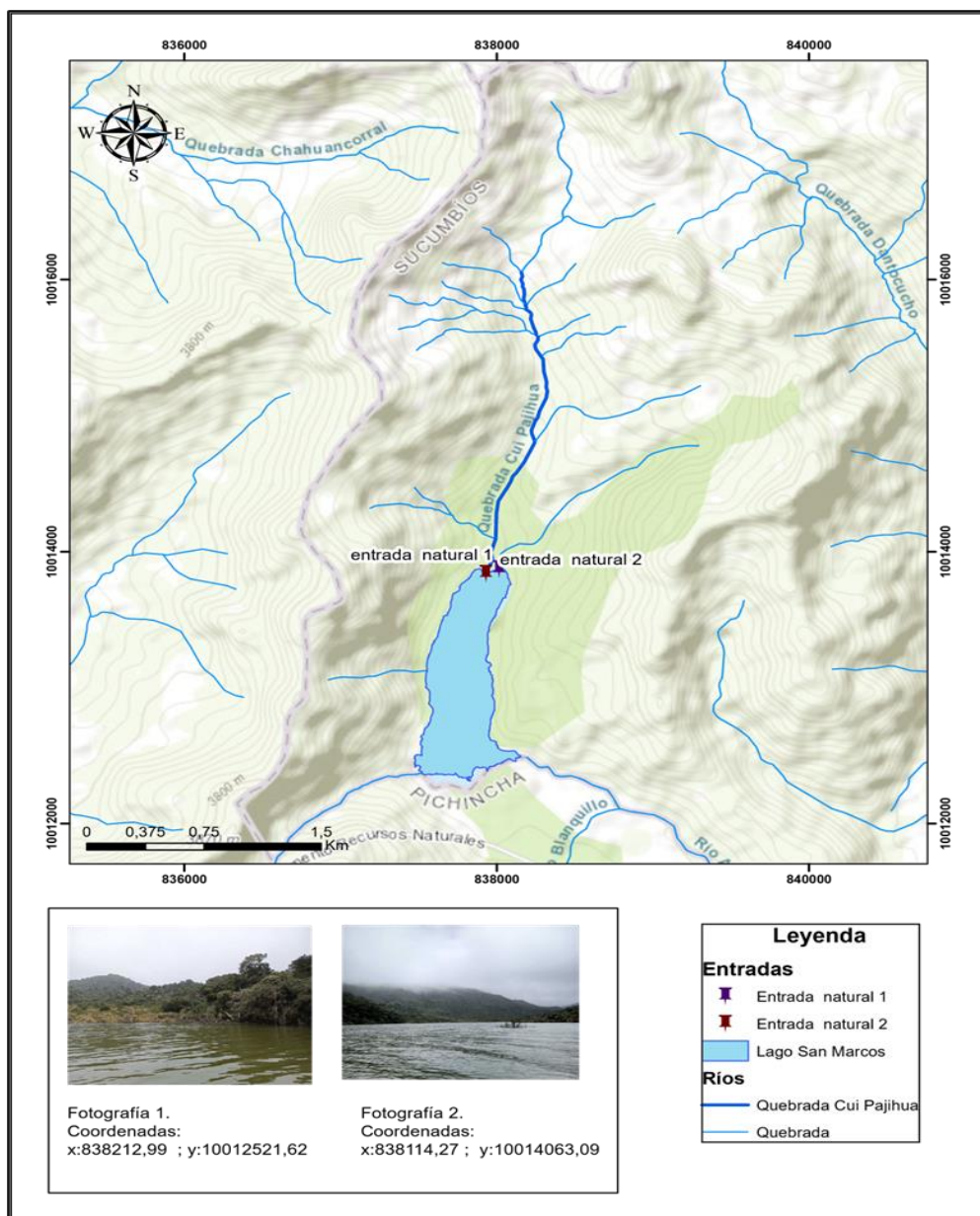
Los servicios ecosistémicos de un lago altoandino son diversos y cruciales para el equilibrio ecológico y el bienestar de las comunidades locales. Estos servicios se pueden clasificar en cuatro categorías: aprovisionamiento, regulación, cultural y soporte, cada una con funciones específicas y ejemplos que ilustran su importancia en el ecosistema. A continuación, se presenta una breve descripción del lago San Marcos en el año 2016:

El lago San Marcos se originó a partir de una erupción del volcán Cayambe y es alimentado por el río Cuyapajihua (nombre quichua que significa "cuya hierba"). Los efluentes del lago forman otros cuerpos de agua, como el río Azuela, que nace en el lago y desemboca en el río Quijos. El lago cuenta con dos accesos naturales cerca de la Quebrada Cuyapajihua, identificados como Entrada Natural 1 (coordenadas X: 838212,99; Y: 10012521,62) y Entrada Natural 2 (coordenadas X: 838114,27; Y: 1014063,09) (ver Figura 17).

Hasta ese año, el lago y su entorno seguían siendo fundamentales para la conservación del ecosistema local. Funcionaba como una importante fuente de agua para las comunidades cercanas y desempeñaba un papel esencial en la preservación de la biodiversidad regional. Para mantener el equilibrio entre el aprovechamiento humano y la protección del medio ambiente, se implementaron iniciativas de conservación y turismo sostenible.

**Figura 16**

Mapa del lago San Marcos 2016



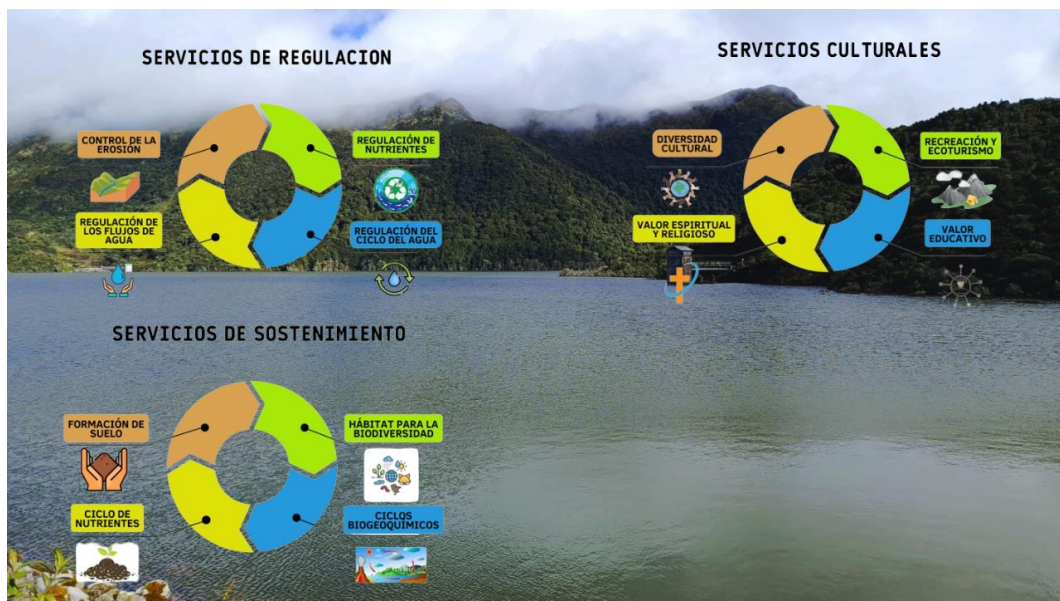
**Nota:** La gráfica muestra el mapa del lago San Marco para el año 2016 donde se aprecia las entradas de agua hacia el sitio de estudio. Elaborado por Bosque y Sandoval (2024).

#### 4.3.1. Servicios Ecosistémicos del Lago San Marcos en el año 2016

En el año 2016, se identificaron diversos servicios ecosistémicos en el lago San Marcos, los cuales incluyen servicios de regulación, soporte y culturales (Figura 17). Estos servicios son productos biofísicos esenciales que desempeñan un papel crucial y significativo en el bienestar humano y en el desarrollo sostenible de las comunidades locales.

**Figura 17**

Servicios ecosistémicos del lago San Marcos 2016



**Nota:** La gráfica se representan los servicios ecosistémicos proporcionados por el lago San Marco para el año 2016. Elaborado por Bosque y Sandoval (2024).

Acorde Vásquez (2024) “servicio de regulación” se define como habilidad de los ecosistemas para regular procesos ecológicos esenciales y mantener sistemas vitales mediante ciclos biogeoquímicos y otros procesos biológicos. “Servicios culturales” son beneficios no materiales que la población obtiene de los ecosistemas.

- Diversidad cultural: Sostenibilidad y Resiliencia
- Valor espiritual y religioso: El lago es un espacio con energía pura que debe ser respetado y conservado, así es como los pobladores en ese entonces lo definían al lago (Comunicación Social, 2019).



- Recreación y ecoturismo:” Veníamos a bañarnos sin ningún temor, porque las aguas de la laguna San Marcos son mansitas (Comunicación Social, 2019)”, el lago era visto de una forma valorada para las personas que pasaban por el lugar.
- Valor educativo: Investigaciones científicas, planes de manejo ambiental y planes de aprovechamiento del recurso hídrico (embalse)

Servicios de sostenimiento son aquellos servicios necesarios para la producción de todos los demás servicios ecosistémicos.

- Formación de Suelo: Sedimentación contribuyen a la formación y estabilización del suelo en las áreas ribereñas
- Ciclo de Nutrientes: Facilitan el reciclaje de nutrientes a través de la descomposición de materia orgánica y la actividad de microorganismos en el sedimento.
- Los ciclos biogeoquímicos facilitan el reciclaje de elementos clave para la vida, regulan el clima, y mantienen el equilibrio de los sistemas naturales.
- Hábitat para la Biodiversidad: Proveen hábitats para una amplia variedad de flora y fauna, incluyendo especies acuáticas, aves, invertebrados y plantas ribereñas (Conabio y Sedema, 2016).

A continuación, se presenta una breve descripción del lago San Marcos en 2024:

El lago San Marcos, un ecosistema prístino, albergaba una diversidad de especies de flora y fauna y funcionaba como una reserva natural de agua. Sin embargo, con el incremento de la actividad agrícola en la región, surgió la necesidad de contar con una fuente hídrica más controlada y predecible para asegurar la producción y optimizar el rendimiento de los cultivos. Así, se decidió transformar el lago en un embalse mediante el Proyecto de Riego Cayambe – Pedro Moncayo. Este proyecto incluye un subsistema de captación ubicado en la parte alta del sistema de riego, compuesto por las captaciones de los ríos Boquerón, San Pedro y Arturo, que reciben agua de los deshielos de las vertientes orientales del nevado Cayambe (Figura 18).

El acceso al lago cuenta con dos entradas naturales cercanas a la Quebrada Cuypajihua:

- Entrada Natural 1: Coordenadas X: 838212,99; Y: 10012521,62.

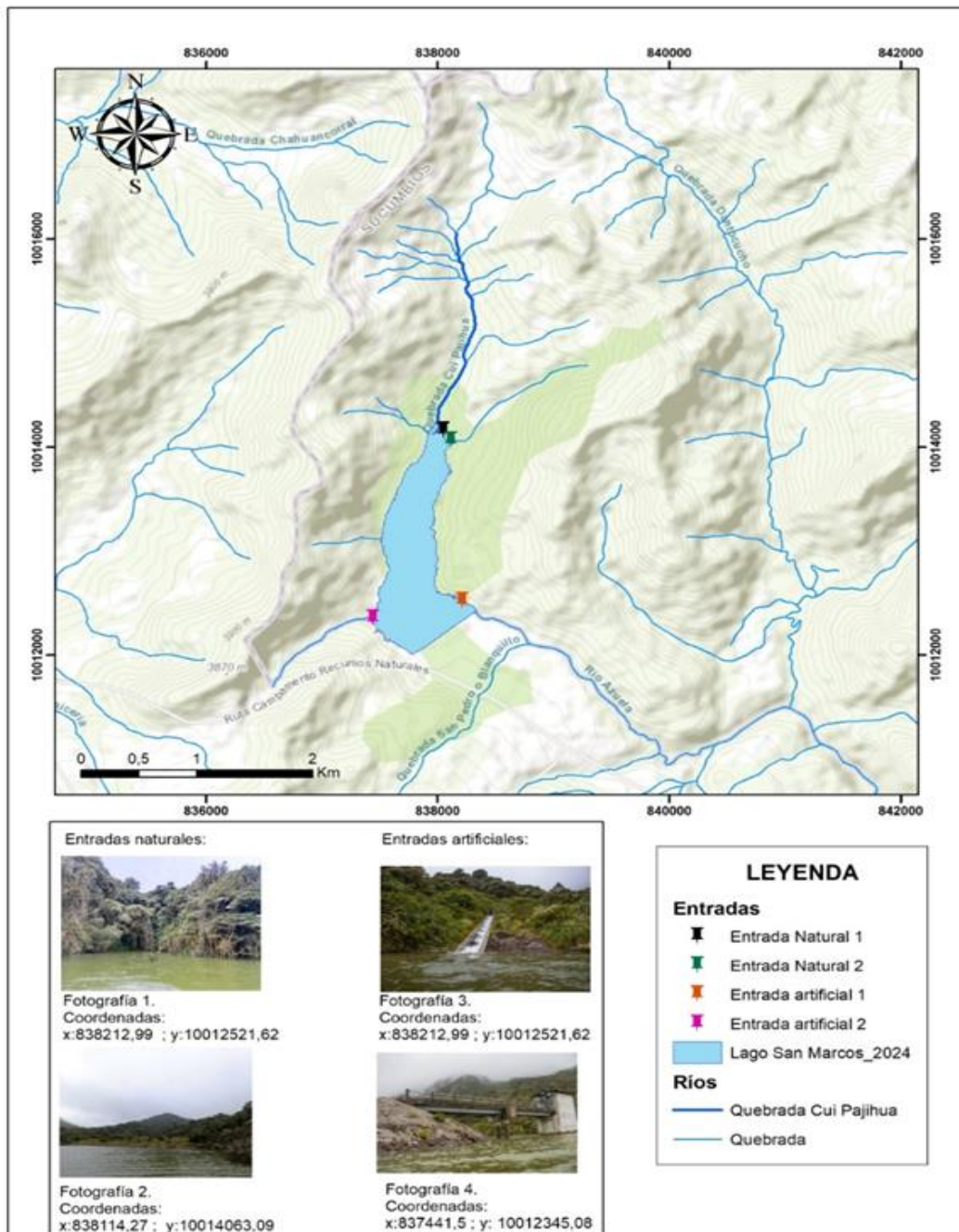
- Entrada Natural 2: Coordenadas X: 838114,27; Y: 1014063,09.

Además, se han añadido dos entradas artificiales:

- Entrada Artificial 1: Coordenadas X: 838212,99; Y: 10012521,62.
- Entrada Artificial 2: Coordenadas X: 838114,27; Y: 10014063,0.

**Figura 18**

Mapa del lago San Marcos 2024



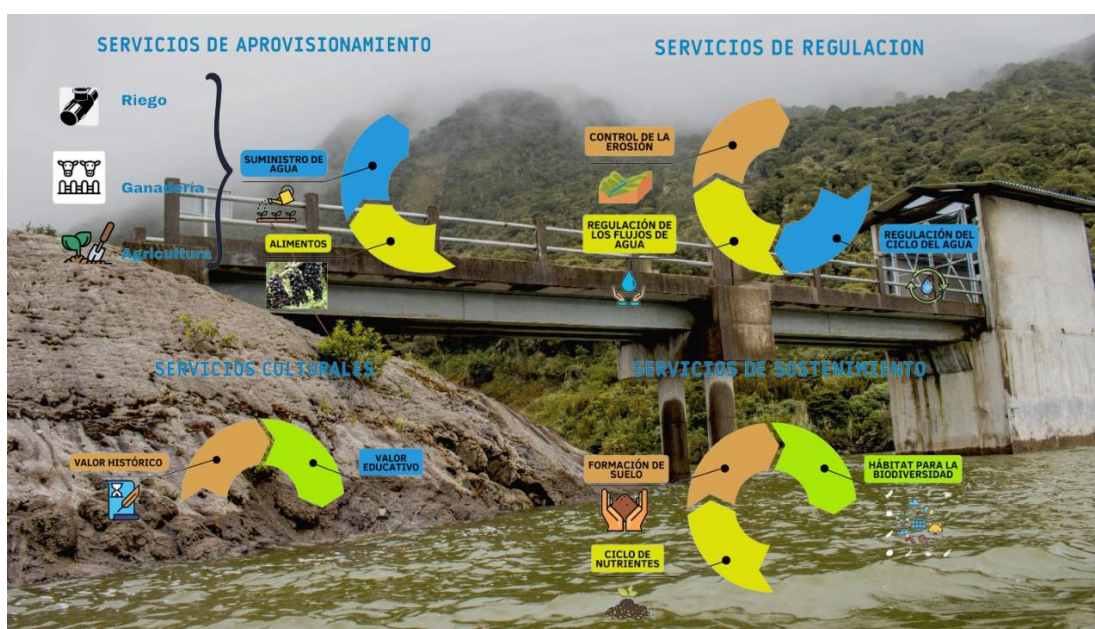
**Nota:** La gráfica muestra el mapa del lago San Marco para el año 2024 donde se aprecia las entradas de agua hacia el sitio de estudio. Elaborado por Bosque y Sandoval (2024).

### 4.3.2. Servicios Ecosistémicos del Lago San Marcos para el año 2024 – 2025

Los servicios ecosistémicos del lago San Marcos cambiaron totalmente, ya que, en la actualidad fue convertido en un embalse para el proyecto de Riego Cayambe – Pedro Moncayo. Los servicios actuales que brinda (figura 18), el servicio ecosistémico que predomina es el de aprovisionamiento desglosando en riego, ganadería y agricultura, los demás servicios como regulación, cultural y sostenimiento disminuyen a causa del trasvase del lago.

**Figura 19**

Servicios ecosistémicos del lago San Marcos 2024 -2025



**Nota:** La gráfica se representan los servicios ecosistémicos proporcionados por el lago San Marco para el periodo 2024 – 2025. Elaborado por Bosque y Sandoval (2024).

El Canal de Riego Cayambe – Pedro Moncayo beneficia a más de 10.000 familias en siete parroquias y proporciona riego a una extensión de 14.000 hectáreas. Esta obra ha sido el sueño de muchas generaciones de pequeños y medianos productores que han esperado durante décadas contar con un sistema de riego (Chavez, 2016). Un suministro confiable de agua reduce la vulnerabilidad de las comunidades a las sequías y a las fluctuaciones climáticas, asegurando así la seguridad alimentaria. Además, la infraestructura del proyecto contribuye al desarrollo económico local. Por lo tanto, el acceso a agua de riego de buena

calidad ofrece beneficios económicos y sociales, impulsando la prosperidad y sostenibilidad de la zona.

En la actualidad los servicios ecosistémicos del lago San Marcos están detallados en la Tabla 15.

**Tabla 15**

Servicios ecosistémicos de un embalse

<b>Categoría</b>	<b>Servicio</b>	<b>Descripción</b>	<b>Beneficios</b>
<b>Provisión</b>	Riego, Agricultura y Ganadería	Ofrece agua para el riego de cultivos y la producción de leche en ganadería.	Soporta la agricultura y ganadería en períodos de sequía.
	Control de Inundaciones	Regula el caudal de ríos para prevenir inundaciones.	Protege contra daños por inundaciones.
<b>Regulación</b>	Regulación del Caudal	Mantiene un flujo constante de agua durante todo el año.	Estabiliza el suministro de agua para riego y otros usos.
	Control de Sedimentos	Captura sedimentos para evitar obstrucciones en cauces fluviales.	Mejora la calidad del agua y preserva infraestructuras.
<b>Soporte</b>	Hábitat para la Biodiversidad	Crea ambientes acuáticos que albergan diversas especies.	Apoya la biodiversidad y los ecosistemas acuáticos.
	Regulación del Clima	Modifica el microclima local mediante la evaporación y almacenamiento de agua.	Contribuye al equilibrio del clima local.
<b>Culturales</b>	Educación Ambiental	Facilita la educación sobre ecología y medio ambiente.	Promueve la conexión con la naturaleza.

**Nota:** En la tabla se presenta los servicios ecosistémicos que proporciona el lago San Marcos tras convertirse en un embalse. Adaptado de Conabio y Sedema (2016).

#### 4.3.3. Impactos de Servicios Ecosistémicos

En la línea de impacto en los servicios ecosistémicos (Figura 20), el año 2016, considerado como línea base, el servicio de aprovisionamiento suministraba alimentos, recursos energéticos y era una fuente crucial de agua dulce. Para el año 2024, el impacto se enfoca

predominantemente en el suministro de agua, utilizada en sistemas de riego, ganadería y agricultura, aunque continúa desempeñando un papel esencial en el suministro de alimentos.

En cuanto al servicio de regulación, en la línea base se proporcionaba control de la erosión, regulación de nutrientes, y regulación de los flujos hídricos y del ciclo hidrológico. Sin embargo, para el año 2024, el impacto aún incluye el control de la erosión y la regulación de los flujos hídricos y del ciclo hidrológico, pero ya no ofrece la regulación de nutrientes debido al estado mesotrófico del lago.




En el año 2016, el servicio cultural tenía una gran importancia para el valor espiritual y religioso, la recreación, el ecoturismo, el valor educativo y la diversidad cultural. Sin embargo, el impacto del trasvase ha convertido al lago en un embalse que, para el año 2024, solo mantiene su valor histórico y educativo.

En cuanto al servicio de sostenimiento, en la línea base se proporcionaban servicios como la formación del suelo, el ciclo de nutrientes, el hábitat para la biodiversidad y los ciclos biogeoquímicos. Para el año 2024, este servicio sigue brindando la formación del suelo, el ciclo de nutrientes y el hábitat para la biodiversidad, pero ha perdido la capacidad de mantener los ciclos biogeoquímicos.

**Figura 20**

Línea de impacto de servicios ecosistémicos

### Línea de impacto en Servicios Ecosistémicos

SE	Línea Base (Año 2016)	Factor Cambio	Impacto (Año 2024)
Servicios de aprovisionamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alimentos</li> <li>Recursos genéticos</li> <li>Agua dulce</li> </ul>	Trasvase de los ríos Arturo, Boquerón y San Pedro 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Suministro de agua (riego; ganadería; agricultura)</li> <li>Alimentos</li> </ul>
Servicios de regulación	<ul style="list-style-type: none"> <li>Control de la erosión</li> <li>Regulación de nutrientes</li> <li>Regulación de los flujos de agua</li> <li>Regulación del ciclo de agua</li> </ul>	Cambios en el perfil lacustre en un aumento en porcentaje del 0,338 % 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Control de la erosión</li> <li>Regulación de los flujos de agua</li> <li>Regulación del ciclo del agua</li> </ul>
Servicios culturales	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diversidad cultural</li> <li>Recreación y ecoturismo</li> <li>Valor espiritual y religioso</li> <li>Valor educativo</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Valor histórico</li> <li>Valor educativo</li> </ul>
Servicios de sostenimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>Formación de suelo</li> <li>Ciclo de nutrientes</li> <li>Hábitat para la biodiversidad</li> <li>Ciclos biogeoquímicos</li> </ul>	Los parámetros fisicoquímicos indicaron que el lago está en un estado mesotrófico	<ul style="list-style-type: none"> <li>Formación de suelo</li> <li>Ciclo de nutrientes</li> <li>Hábitat para la biodiversidad</li> </ul>

**Nota:** La gráfica presentan la línea de impactos de los servicios ecosistémicos proporcionados por el lago San Marco. Elaborado por Bosque y Sandoval (2024).

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- El análisis de las imágenes satelitales de los años 2015, 2019 y 2023 determina que la microcuenca del lago San Marcos tiene un área de 13 km<sup>2</sup> y un perímetro de 18,11 km. Se observó que la infraestructura ha disminuido en un 0,023%. Por otro lado, el cuerpo de agua ha aumentado su superficie en un 0,33%, debido al encauzamiento de los ríos Arturo, Boquerón y San Pedro. Esto indica que la infraestructura no ha tenido un impacto significativo en este sitio. Finalmente, el páramo ha mostrado una reducción del 0,080%, pero sigue siendo el hábitat de muchas especies.
- El análisis multitemporal del perfil lacustre mostró un aumento porcentual en la cobertura del lago. En 2015, el lago cubría un área de 58,301 hectáreas. Para 2019, la superficie del lago aumentó a 90,36 hectáreas, lo que representa un incremento del 0,32%. En 2023, se observó un aumento adicional del 0,018%, alcanzando un total de 92,1873 hectáreas. Los datos indican una tendencia de expansión continua del lago.
- El análisis de los parámetros físicoquímicos determina que el lago se encuentra en un estado mesotrófico. Aunque actualmente el lago está en un estado saludable, es crucial implementar medidas de gestión para evitar un aumento de los nutrientes que podrían llevarlo a un estado eutrófico.
- La funcionalidad ecológica del lago San Marcos ha cambiado según la ponderación de los servicios ecosistémicos. En 2016, los servicios predominantes eran de regulación, cultural y sostenimiento. Para 2024, al transformarse en un embalse, el servicio de aprovisionamiento ha pasado a ser predominante, afectando los cambios morfológicos del lago y su estado trófico. Además, ha habido consecuencias medioambientales: las especies que vivían en el hábitat original del lago se han visto impactadas por cambios en el ecosistema, y el desarrollo de infraestructura ha alterado el flujo natural de agua, afectando el equilibrio ecológico de la zona.

## **5.2. Recomendaciones**

- Utilizar este trabajo como referencia para desarrollar y aplicar ordenanzas que involucren a los actores directos en la problemática, y para realizar una adecuada gestión que asegure la conservación del lago San Marcos.
- Considerar la incorporación de estaciones meteorológicas adicionales dentro de la Reserva Cayambe Coca para captar posibles variaciones microclimáticas y obtener una visión más completa del clima. Esto permitirá disponer de datos actualizados con mayor precisión para futuras investigaciones.
- En relación con los parámetros morfométricos, se debe tomar mediciones en diferentes zonas de la cuenca (alta, media y baja) para comparar la precisión de las imágenes satelitales con el estado actual del terreno.

## Referencias

- Acosta, C. R. (2001). Patrones de diversidad espacio-temporal de insectos acuáticos y caracterización limnológica en la quebrada Cantón, Tributaria del Río Rímac (Huarochirí, Lima). Libro de Resúmenes de la XLIII Convención Nacional de Entomología. Huancayo, Perú, 75.
- Astrálaga, M. (2006). La Convención Ramsar y los ecosistemas de manglar. Secretaría de la Convención Ramsar. Suiza.
- Arredondo, H. y Rodríguez Chávez, O. (2005), Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA, aplicado en estudios de ingeniería civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Aubriot, L., Conde, D., Bonilla, S., Hein, V., Britos, A. (2005). Vulnerabilidad de una laguna costera en una reserva de biosfera: indicios recientes de eutrofización. En: Vila y Pizarro (Ed.). Taller internacional de eutrofización de lagos y embalses. En: CYTED XVIIIB. Chile, pp. 65-85.
- Baylón Coritoma, M., Roa Castro, K., Libio Sánchez, T., Tapia Ugaz, L., Jara Pena, E., Macedo Prada, D., ... & Dextre Rubina, A. (2018). Evaluación de la diversidad de algas fitoplanctónicas como indicadores de la calidad del agua en lagunas altoandinas del departamento de Pasco (Perú). *Ecología aplicada*, 17(1), 119-132
- Blanco, J. A. (2017). Bosques, suelo y agua: explorando sus interacciones. *Ecosistemas*, 26(2), 1-9.
- Bužančić, M., Ninčević Gladan, Ž., Marasović, I., Kušpilić, G., y Grbec, B. (2016). Eutrophication influence on phytoplankton community composition in three bays on the eastern Adriatic coast. *Oceanologia*, 58(4), 302–316. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2016.05.003>
- Cadena Carrera, L. F. (2005). Macroinvertebrados acuáticos como organismos indicadores de la calidad del agua entre Caserio Ingueza y la Ciudad El Angel (Bachelor's thesis).
- Camargo, J. A., & Alonso, A. (2007). Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. *Ecosistemas*, 16(2).



- Campos Solis, E. M. (2015). Estudio de los efectos de las actividades ribereñas de la población en el comportamiento de la laguna de Ñahuinpuquio–Chupaca.
- Cao, J., Chu, Z., Du, Y., Hou, Z., y Wang, S. (2016). Phytoplankton dynamics and their relationship with environmental variables of Lake Poyang. *Hydrology Research*, 47(S1), 249–260. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.224>
- Cárdenas, J. (2005). Calidad de aguas para estudiantes de Ciencias Ambientales. Universidad distrital Francisco José De Caldas. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Bogotá.
- Carlson, R., & Simpson, J. (10 de mayo de 1996). Coordinators guide o volunteer lake monitoring methods. Illinois: Inc. Obtenido de North American lake management society.
- Castillejo-González, I., López-Granados, F., García-Ferrer, A., Peña-Barragán, J. M., JuradoExpósito, M., Sanchez de la Orden, M., y González-Audicana, M. (2009). Objectand pixel-based analysis for mapping crops and their agro-environmental associated measures using QuickBird imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68, 207–215. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.06.004>
- Casallas, J., & Gunkel, G. (2001). Algunos aspectos limnológicos de un lago altoandino: el lago San Pablo, Ecuador. *Limnetica*, 20(2), 215-232
- Cerda, J., y Villarroel, L. (2008). Evaluación de la conocordancia inter-observador en investigación: Coeficiente de Kappa. *Chil Pediatr*, 79(1), 54-58.
- Cervantes, M. (2007). Persspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México. Instituto Nacional de Ecología.
- Chávez Jaramillo, A. N. Administración del agua y procesos de democratización en el Ecuador: los casos de los cantones de Cayambe y Pedro Moncayo (Master's thesis, Quito, Ecuador: Flacso Ecuador).
- Cisterna, P. y Peña, D. (2004). Determinación de la relación DQO/DBO5 en aguas residuales de comunas con población menor a 25.000 habitantes en la VIII región. *Ingeniería Química.*, 1-18.

- Comunicación Social. (2019). El carácter sagrado de la laguna San Marcos. Recuperado de: <http://www.pichinchaldia.gob.ec/actualidad/item/3961-las-aguas-mansas-de-la-laguna-san-marcos.html>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (conabio) y Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (sedema). 2016. La biodiversidad en la Ciudad de México. conabio/sedema. México.
- Chapman, D. y Kimstach, V. (1996). Selection of water quality variables. Water Quality Assessments-University Press. Cambridge, 59-125.
- Chuvieco, E. 2008. Teledetección ambiental, la observación de la Tierra desde el espacio. 3ª edición. Editorial Ariel, Barcelona, España.
- Dasso, C., Piovano, E., Pasquini, A., Córdoba, F., Lecomte, K., Guerra, L., & Campodonico, V. (2014). Geología y recursos naturales de la Provincia de Córdoba: relatorio del XIX Congreso Geológico Argentino, 2 al 6 de junio de 2014.
- De la Aleja, S. M. G. (2006). Medida de nivel en embalses. Evolución, posibilidades y Eratamiento actual. Congreso Nacional del Medioambiente. Descargado 01/02/2021, de <http://www.hidrosanco.com/pdf/Medida%20de%20niveles%20en%20embalses.pdf>
- Del Pilar, M.; Del Pilar, C.; Consuelo, L.; Santos, S. López, C.; y Sanz del Castillo, D. (2009). Bases químicas del medio ambiente. Madrid, España. Universidad Nacional de Educación a distancia Madrid.
- Del Ecuador, C. (2008). Asamblea Nacional. Quito. Ecuador.
- Delgado Salinas, E. C. (2022). Caracterización del estado actual de eutrofización a partir de los parámetros físicos, químicos y biológico del humedal de Conococha–Aancash–2021.
- Delgado, L.E., Tironi-Silva, A., & Marín, V.H. 2018. Sistemas socioecológicos y servicios ecosistémicos: modelos conceptuales para el humedal del Río Cruces (Valdivia, Chile), en: Cerda, C.I., Silva-Rodriguez, E., & Briceño, C. (Ed.). Naturaleza en sociedad: Una mirada a la dimensión humana de la conservación de la biodiversidad. Editorial Ocho Libros, Santiago, Chile.

- Código Orgánico del Ambiente. (2017). Código Orgánico del Ambiente. Quito, Ecuador: Asamblea Nacional de la República de Ecuador, 92.
- Del Milenio, E. Asimetrías de conocimiento científico en proyectos ambientales globales.
- Dewangan, Shailesh Kumar & Shrivastava, S & Tigga, Veenita & Lakra, Meena & Namrata, y Preeti, (2007). Review paper on the role of ph in water quality implications for aquatic life, human health, and environmental sustainability. 10. 215-218. 10.17148/iarjset.2023.10633.
- FEM. (23 de diciembre de 2015). Fundamentals of environmental measurements. Water temperature. Obtenido de <http://www.fondriest.com/environmentalmeasurements/parameters/waterquality/water-temperature/>
- Fontúrbel Rada, F. (2003). Algunos criterios biológicos sobre el proceso de eutrofización a orillas de seis localidades del lago Titikaka. *Ecología Aplicada*, 2(1), 75-79.
- Gamboa, M., Reyes, R., & Arrivillaga, J. (2008). Macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores de salud ambiental. *Boletín de malariología y salud ambiental*, 48(2), 109-120.
- Geovanna, L. (2009). Guion turístico de la reserva ecológica Cayambe- Coca.
- Gómez N., Donato C., Giorgi, A., Guash H. y Sabater S. (2009). La biota de los ríos: los microorganismos autótrofos. En Elosegi, A., y Sabater, S. (Eds.) *Conceptos y Técnicas en Ecología Fluvial*. Bilbao: Fundación BBVA.
- Gonzales Medina, R. I. (2018). Implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales por el método de lagunas de estabilización en el distrito de Echarati La Convención-Cusco 2016.
- Guerra-Magaña, C., & Díaz-Pardo, E. (2019). Influencia de algunos factores limnológicos sobre los peces y la producción piscícola.)
- Hossain, M. A., Rahman, S., & Rahman, M. M. (2019). Effect of pH on the removal of organic pollutants from water. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(6), 3261-3270. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02331-7>

- IDEAM Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (2014). BATIMETRIAS. Retrieved February 4, 2020, from Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible website: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/batimetrias>
- Kiersch, B., Mühleck, R., & Gunkel, G. (2004). Las macrófitas de algunos lagos alto- andinos del Ecuador y su bajo potencial como bioindicadores de eutrofización. *Revista de biología tropical*, 52(4), 829-837.
- La Matta Romero, F. P. (2020). Influencia del drenaje ácido de roca en la comunidad de macroinvertebrados bentónicos, índices bióticos de calidad de agua y grupos funcionales alimenticios en ríos y cabeceras de la Cordillera Blanca (subcuenca de Quillcay, Ancash).
- Lampert, W., y Sommer, U. (2007). *The Ecology of Lakes and Streams Limnoecology*, 2.
- Ledesma, C. R. (2019). Modelos geoestadísticos espacio-temporales aplicados a recursos hídricos superficiales.
- López M. (2019). “caracterización fisicoquímica y bacteriológica de aguas de la laguna de colta de la zona central del ecuador” [Tesis de grado]. Universidad Técnica de Ambato
- MAAE. (2020). República del Ecuador Ministerio del Ambiente y Agua Acuerdo Ministerial Nro.: MAAE-2020-003.
- Maldonado, G. B. B. (2011). Segundo Congreso Mundial de Páramos. Memorias. Quito, Ecuador.
- Marcó, L., Azario, R., Metzler, C., Garcia, M. D., Marcó, L., & Azario, R. (2004). La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina). *Higiene y Sanidad Ambiental*, 4(11), 4-72.
- Marín, M., (2003). *Fisicoquímica y Microbiología de los medios acuáticos*. Madrid, España: Díaz de Santos.
- Medina Sánchez, J. M. (2013). El eslabón fitoplancton-bacteria en un ecosistema de alta montaña: estructura, función y regulación.

- Miranda, W. R. R., Sauleda, E. R. E., Núñez, H. M. F., & Ortega, R. M. V. (2022). Estado actual del empleo de la teledetección para el estudio de las variaciones espaciales y temporales de los ecosistemas relacionados con el agua.
- Ochoa Andrade, M. E. (2017). Evaluación del crecimiento de cianobacterias en relación a los parámetros físico-químicos del agua en el lago Yahuarcocha (Bachelor's thesis).
- Oña, J., & Tonato, C. (2017). Determinación del estado trófico de las lagunas de Mojanda a través de la cuantificación de clorofila "A". Recuperada de: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/13140/1/T-UCE-0012-38.pdf>. Ortega, C. (2023). Qué es un análisis de correlación en encuestas. QuestionPro. <https://www.questionpro.com/blog/es/analisis-de-%20correlacion/>
- Panachlor. (10 de octubre de 2015). Sólidos Disueltos Totales (TDS) & Electroconductividad (EC). Recuperado el 23 de Junio de 2019, de Panachlor.com: [http://panachlor.com/wpcontent/uploads/pdf/Solidos-Disueltos-Totales-\(TDS\)-Electroconductividad-\(EC\).pdf](http://panachlor.com/wpcontent/uploads/pdf/Solidos-Disueltos-Totales-(TDS)-Electroconductividad-(EC).pdf)
- Parque Nacional Cayambe Coca. (2021). Decreto Supremo N°. 818 de noviembre 17 de 1970. <https://www.ambiente>
- Quispe Benavides, K. L., & Ayala Amaringo, M. K. (2019). Utilización de la Eichhornia crassipes y Lemna minor en la remoción de Nitrógeno y Fósforo, de las aguas residuales de la laguna de oxidación de la empresa EMAPACOP SA-Ucayali 2018.
- Ramsar. (2014). La importancia de los humedales. Recuperado el 5 de noviembre de 2017, a partir de <http://www.ramsar.org/es/acerca-de/la-importancia-delos-humedales>
- Ramalho, R. (2003). Tratamiento de Aguas Residuales. Barcelona: España, Editorial Reverté, S.A
- Ramirez., J. y Roldán., G. (2008). Fundamentos de limnología neotropical. Universidad de Antioquia, Universidad Católica de Oriente y Academia Colombiana de Ciencias. ACCEFYN.
- Rice, E., Eaton, A., & Baird, R. (2017). Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater 23th. <https://doi.org/10.2105/SMWW.2882.216>

- Rivera, C., Zapata, Á., Pinilla, G., Donato, J., Chaparro, B., & Jiménez, P. (2005). Comparación de la estimación de la clorofila-a mediante los métodos espectrofotométrico y fluorométrico. *Acta Biológica Colombiana*, 10(2), 95-103.
- Rodríguez, E., Liriano, P y Pérez, R. (2017). Indicadores Físico-Químicos Y Biológicos Del Proceso De Eutrofización Del Oeste Y Norte Del lago Enriquillo. UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO HENRÍQUEZ UREÑA
- Miño, C y Rodrigues, J. (2018). Evaluación del estado trófico en relación al comportamiento de los parámetros físicos y biológicos del lago san pablo, ecuador [Tesis de grado]. Universidad Técnica del Norte
- Ruiz, N. E., Carvajal Escobar, Y., & Escobar, J. C. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Ingeniería e investigación*, 27(3), 172-181.
- Rull, V., López-Sáez, J. A., & Vegas-Vilarrúbia, T. (2008). Contribution of non-pollen palynomorphs to the paleolimnological study of a high-altitude Andean Lake (Laguna Verde Alta, Venezuela). *Journal of Paleolimnology*, 40, 399-411.
- Samboni Ruiz, N. E., Carvajal Escobar, Y., & Escobar, J. C. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Ingeniería e investigación*, 27(3), 172-181.
- Sacristán-Romero, F. (2006). La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Quivera Revista de Estudios Territoriales*, 8(1), 315-356.
- Samanez, I., Rimarachin, V., Palma, C., y Ortega, H. (2014). Métodos de colecta, identificación y análisis de comunidades biológicas: plancton, perifiton, bentos (macroinvertebrados) y necton (peces) en aguas continentales del Perú.
- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (2017). Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021. Quito: SENPLADES.
- Schallenberg, M., de Winton, MD, Verburg, P., Kelly, DJ, Hamill, KD y Hamilton, DP (2013). Servicios ecosistémicos de los lagos. Servicios ecosistémicos en Nueva Zelanda: condiciones y tendencias. Manaaki Whenua Press, Lincoln, 203-225.

- Úbeda, C. A. (2021). Estrategias reproductivas, hábitats y otros aspectos ecológicos de los anfibios altoandinos en la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes. *Boletín Chileno de Herpetología*, 8, 10-21
- Vásquez, K. (2024). Cambio climático, variación climática y servicios culturales Caso: lago San Pablo [Maestría]. Universidad Andina Simón Bolívar Sede Ecuador
- Winder, M., & Sommer, U. (2012). Phytoplankton response to a changing climate. In *Hydrobiologia* (Vol. 698, Issue 1, pp. 5–16). Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1149-2>
- Yaguachi, T. (2013). Diagnóstico Ambiental y Desarrollo del Plan de Manejo y conservación de la Subcuenca del Río Chillayacu de la cuenca medio del Río Jubones en la provincia del Oro. (Tesis de pregrado). Universidad Central del Ecuador.
- Zhen-Gang, J. (2008). En J. Zhen-Gang, *Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries* (pág. 245). John Wiley & Sons, Inc.

## Anexos

### Anexo 1

Datos promedios mensuales de precipitación y temperatura de la estación meteorológica M5025 La Virgen –Papallacta (2019-2021)

Mes	Prec (mm)	Temp (°C)
Ene	121,53	4,63
Feb	108,40	5,17
Mar	120,47	5,13
Ab	101,37	5,02
May	132,30	4,87
Jun	176,83	4,13
Jul	246,40	3,32
Agos	136,03	3,21
Sept	123,23	3,48
Oct	109,27	4,27
Nov	117,40	5,08
Dic	86,70	4,87

### Anexo 2

Toma de datos en el lago San Marcos





### Anexo 3

Datos tomados en campo

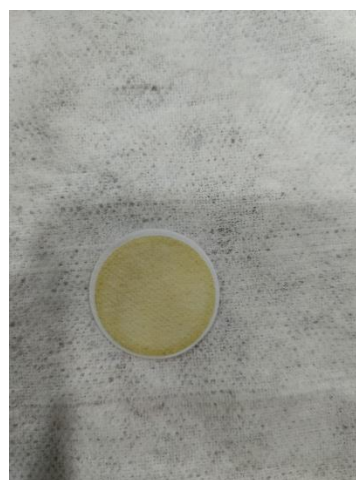
Punto	Profundidad (m)	D. Secchi (m)	O.D (mg/L)	O.D (%)	Temperatura (°C)	Presión Barométrica (mmHg)	Conductividad (Us/cm)	pH
PP	0,50	1,5	7,29	69	13,4	683,4	39,8	6,39
PE	0,50	1,9	9,04	88	14,4	683,6	39,2	6,53
PI	0,50	2	6,83	56,6	12,9	683,6	41,9	6,62
Promedio	0.50	1,80	7,72	71,2	13,57	683,53	40,30	6,51

Nota: PP: Punto Profundo; PE: Punto Entrada; PI: Punto Intermedio

### Anexo 4

Proceso de extracción de clorofila en el laboratorio

PE



### Anexo 5

Colocación de metanol a la clorofila, etiquetado y almacenamiento



## Anexo 6

Análisis de la clorofila en el fluorímetro y toma de datos



Datos de clorofila a				
	1PS	2PS	3PS	C (Agua destilada)
	4,22	3,61	3,56	0,26
	4,16	3,66	3,53	0,27
	4,14	3,66	3,44	0,25
MEAN	4,17	3,64	3,51	0,26
	1PE	2PE	3PE	
	2,43	2,47	3,10	
	2,40	2,44	3,06	
	2,44	2,42	3,02	
MEAN	2,42	2,44	3,06	
	1PP	2PP	3PP	
	3,54	3,41	3,27	
	3,52	3,36	3,20	
	3,50	3,39	3,28	
MEAN	3,52	3,39	3,25	

# **ANEXO DE MAPAS**

# MAPA DE UBICACIÓN DEL LAGO SAN MARCOS

**LEYENDA**

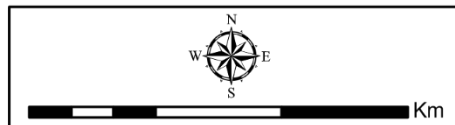
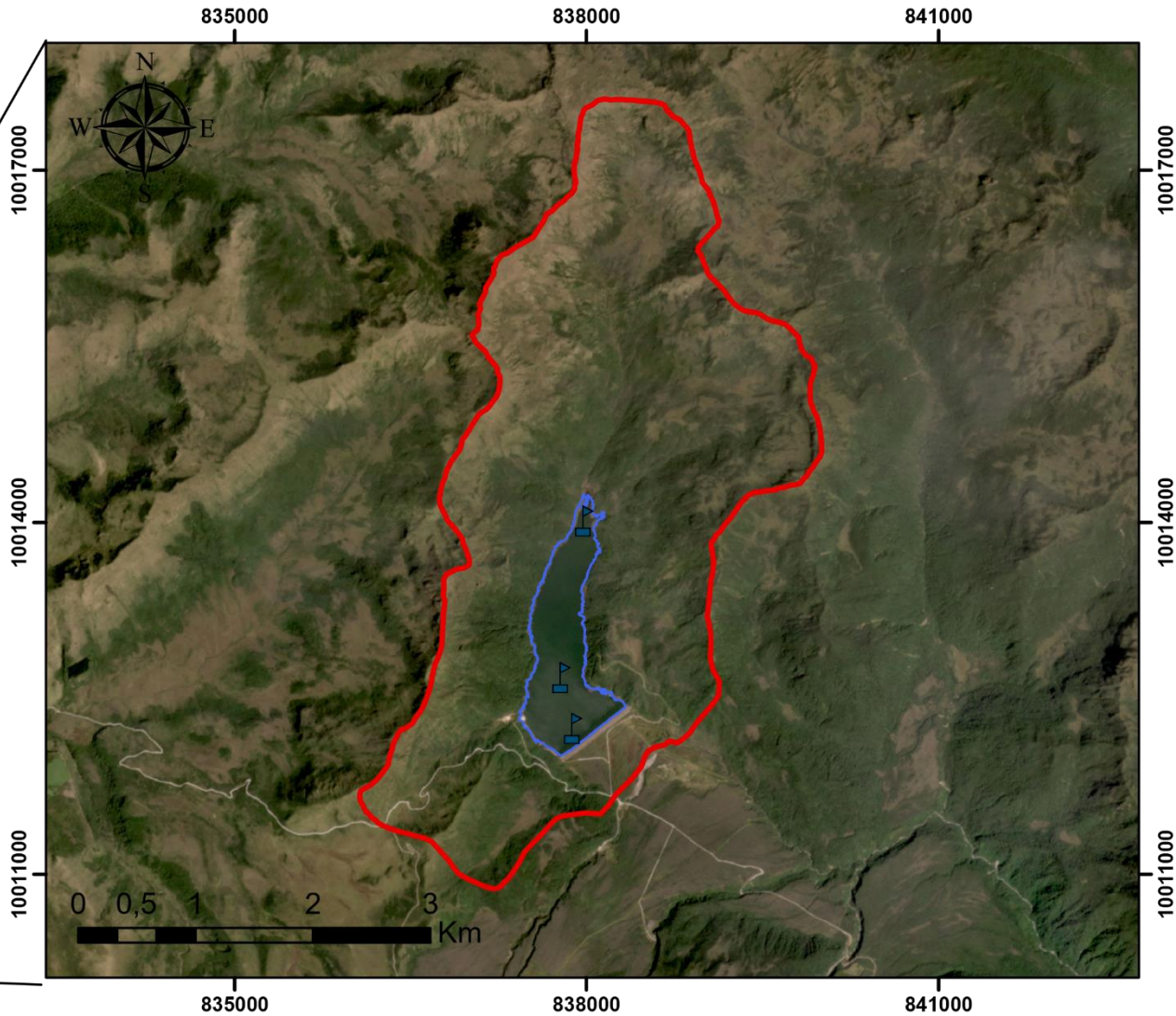
-  Parque Nacional Cayambe Coca
-  Cuenca hidrográfica San Marcos
-  Lago San Marcos

**Elevación msnm**

**Value**

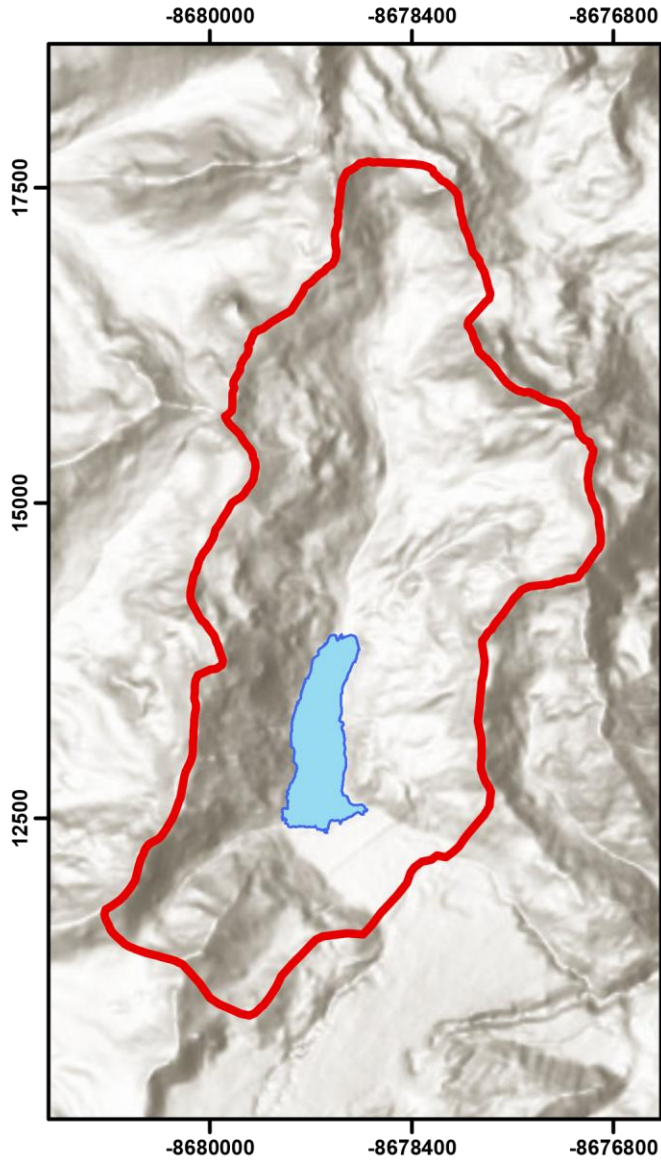
-  High : 3934
-  Low : 3441

 Puntos de muestreo

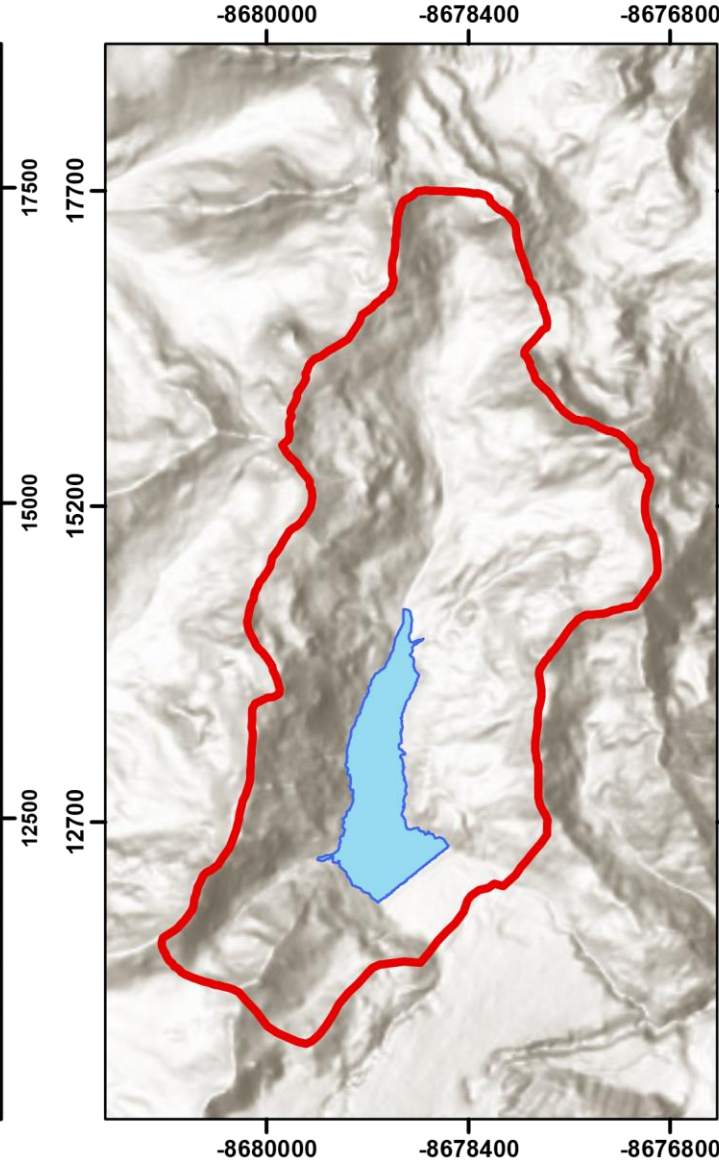


UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE	
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES	
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES	
MAPA DE UBICACIÓN DEL LAGO SAN MARCOS	
ELABORADO :	FECHA:

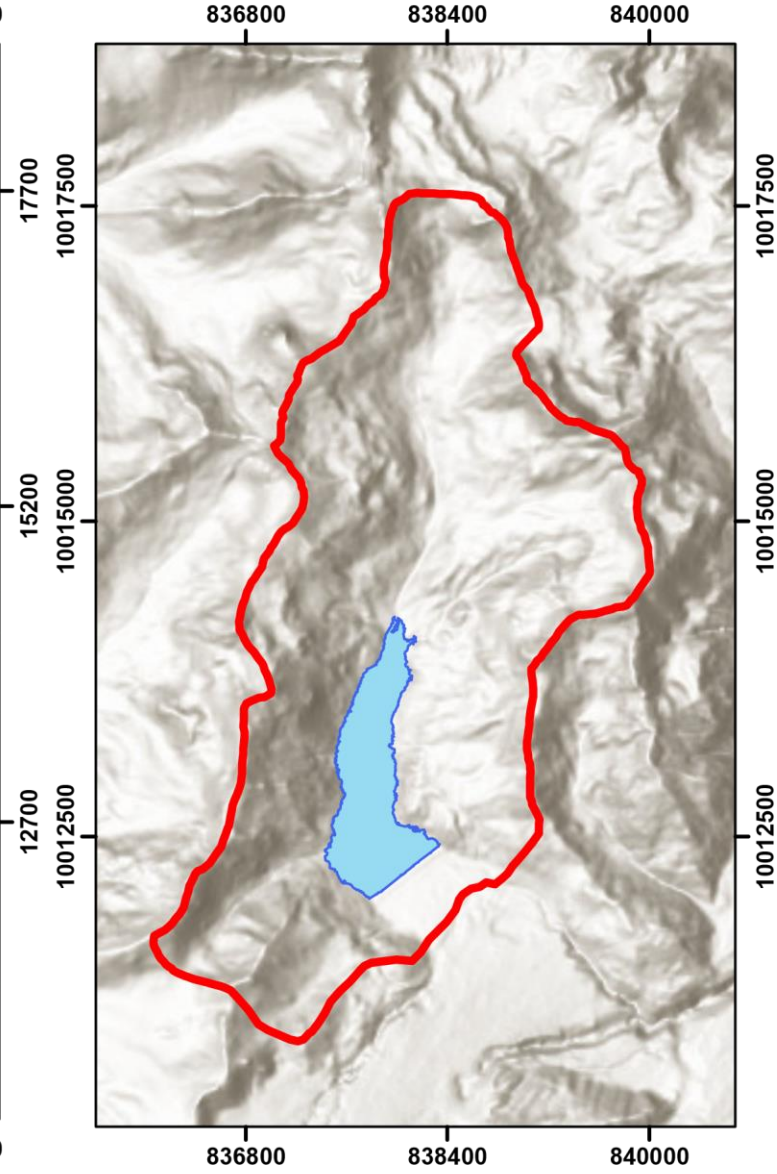
2015



2019



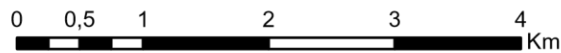
2023



**LEYENDA**

 Delimitación





PROYECCIÓN UNIVERSAL DE

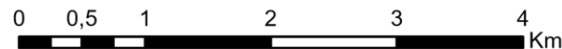
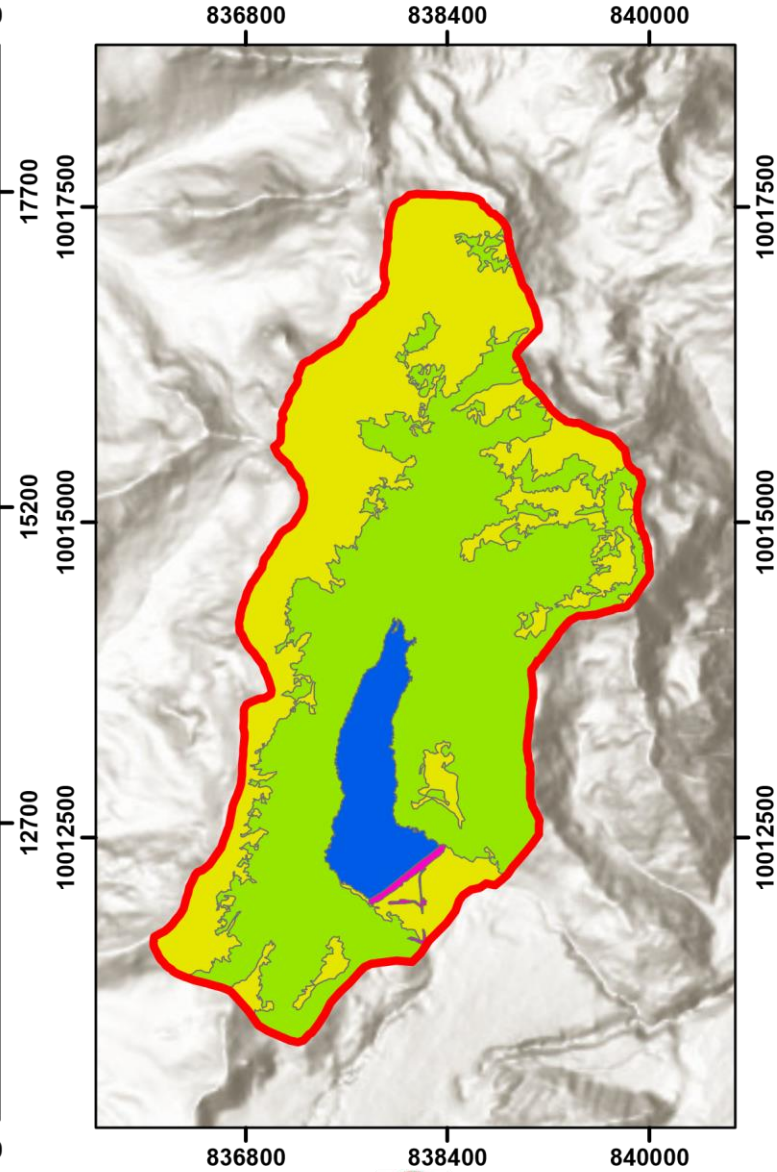
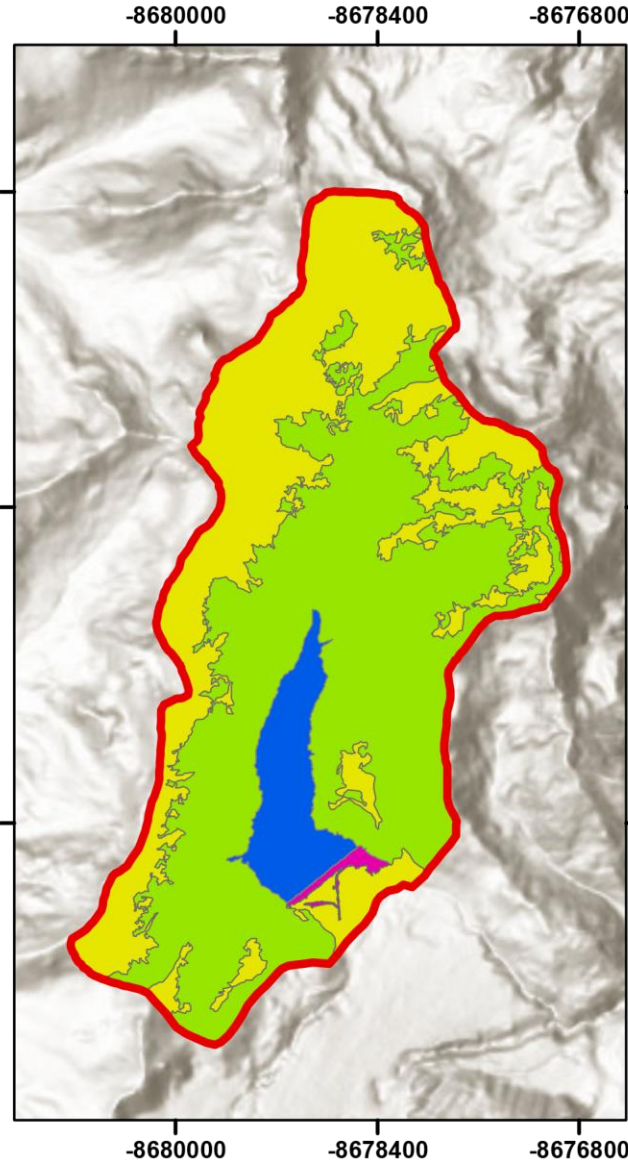
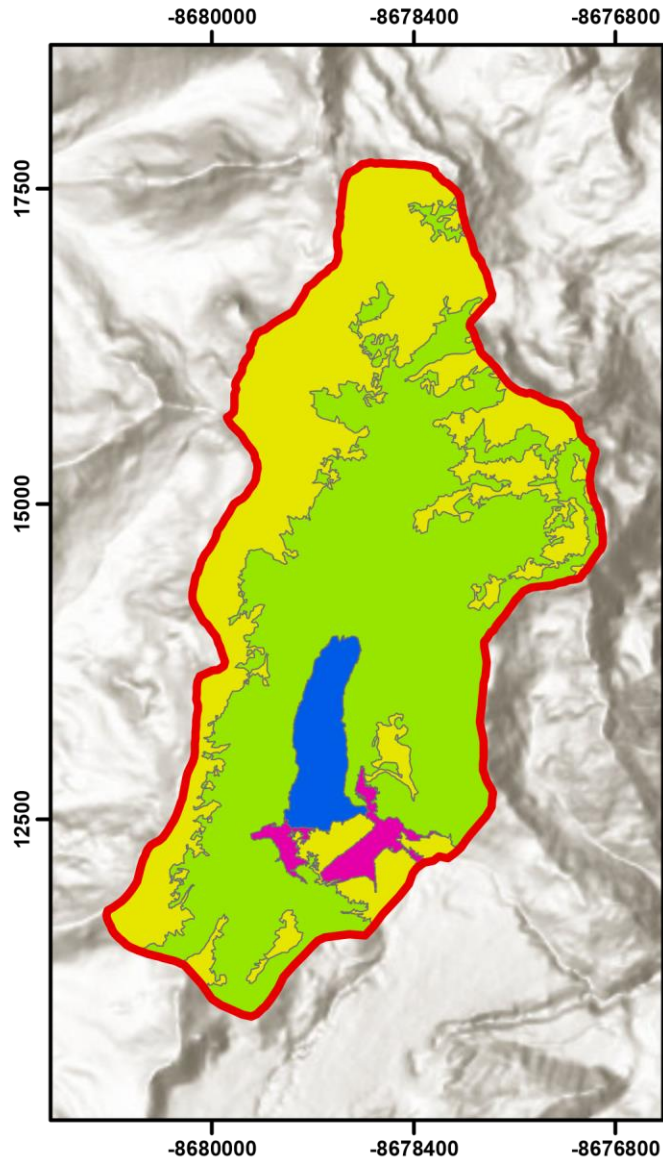


UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE	
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES	
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES	
MAPA DE CAMBIOS EN EL PERFIL DEL LAGO SAN MARCOS	
ELABORADO :	FECHA:
BOSQUE GISEL - SANDOVAL ERVIN	2024

2015

2019

2023



PROYECCIÓN UNIVERSAL DE



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE	
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES	
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES	
MAPA DE USO Y COBERTURA DE SUELO DE LOS AÑOS, 2015, 2019 Y 2023	
ELABORADO:	FECHA:
BOSQUE GISEL SANDOVAL ERVIN	2024

# MAPA BATIMÉTRICO DEL LAGO SAN MARCOS 2024

836800 837200 837600 838000 838400 838800



10014000

10013500

10013000

10012500

10012000



## MAPA DE UBICACIÓN



## Simbología

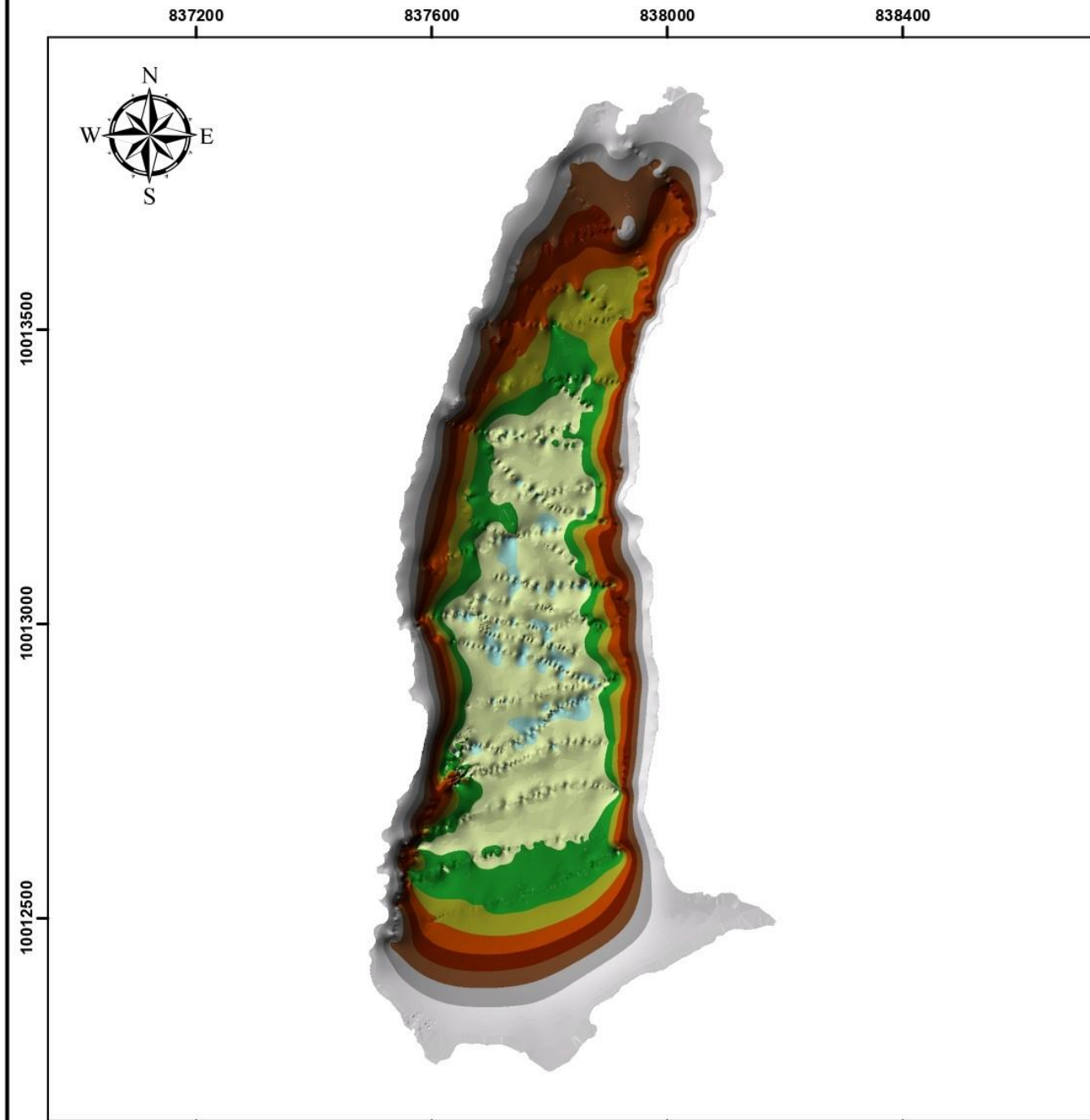
### Elevación

Grey	-7,494 - -1,95
Light Brown	-13,039 - -7,494
Dark Brown	-18,583 - -13,039
Orange	-24,128 - -18,583
Yellow-Green	-29,672 - -24,128
Green	-35,217 - -29,672
Light Green	-40,761 - -35,217
Yellow	-46,306 - -40,761
Light Blue	-51,85 - -46,306

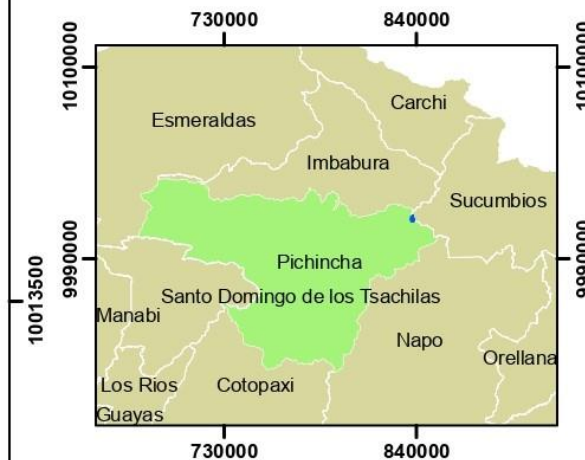


UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE		
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES		
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES		
MAPA BATIMÉTRICO DEL LAGO SAN MARCOS DEL 2024		
ELABORADO :	FECHA :	
BOZQUE GISEL ; SANDOVAL ERVIN	2024	
ESCALA :	FUENTE :	N° : 5
1:50.000	LABINAM	

# MAPA BATIMÉTRICO DEL LAGO SAN MARCOS 2016



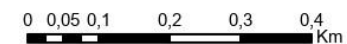
## MAPA DE UBICACIÓN



### Simbología

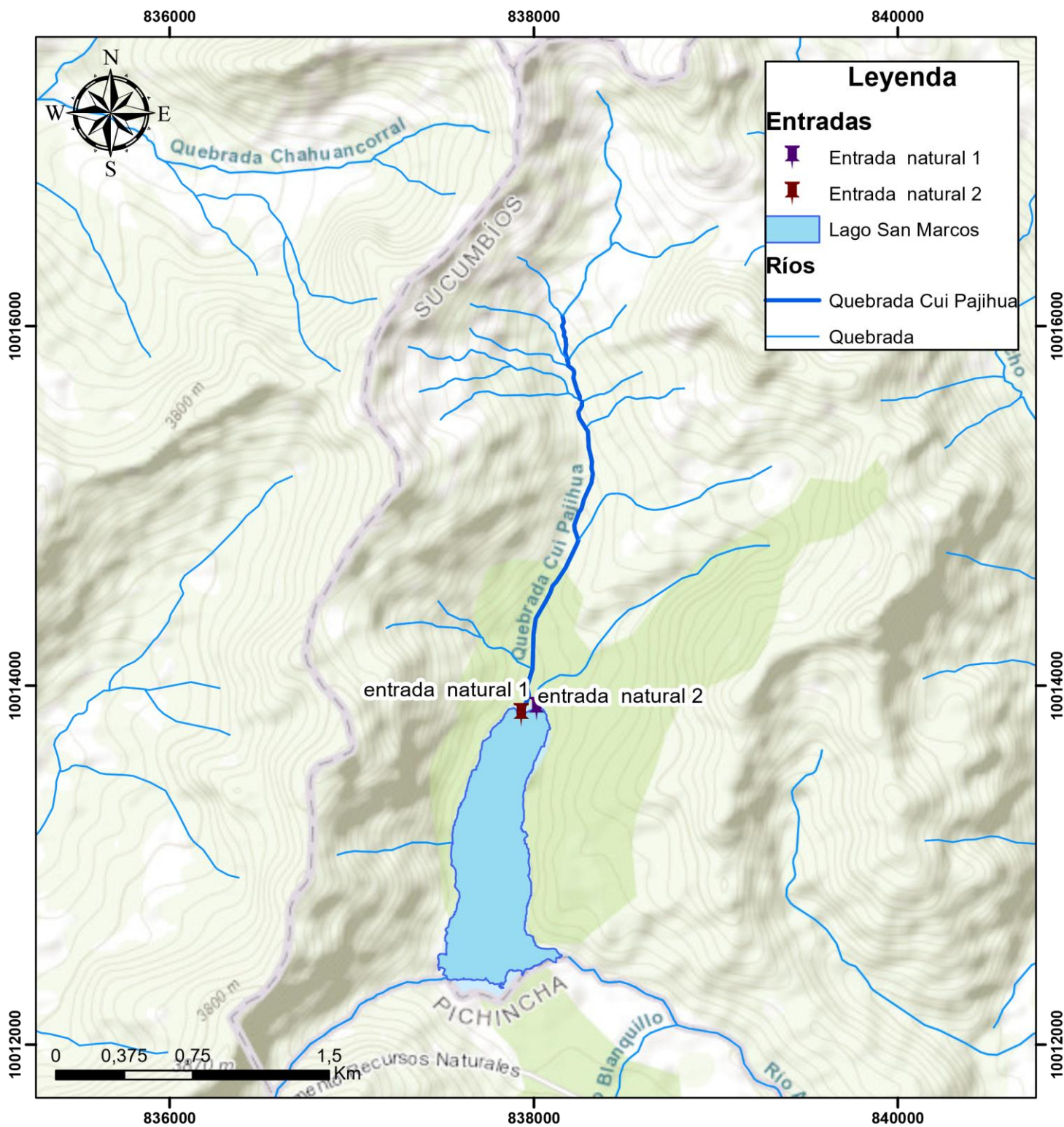
Elevación

White	-5.111 - 0
Light Gray	-10.222 - -5.111
Brown	-15.333 - -10.222
Dark Brown	-20.444 - -15.333
Orange	-25.556 - -20.444
Olive Green	-30.667 - -25.556
Green	-35.778 - -30.667
Light Green	-40.889 - -35.778
Cyan	-46 - -40.889



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE		
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES		
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES		
MAPA BATIMÉTRICO DEL LAGO SAN MARCOS DEL 2016		
ELABORADO :	BOSQUE GISEL ; SAN DOVAL ERVIN	FECHA: 2024
ESCALA:	1:60.000	FUENTE: LABINAM
		N°: 4

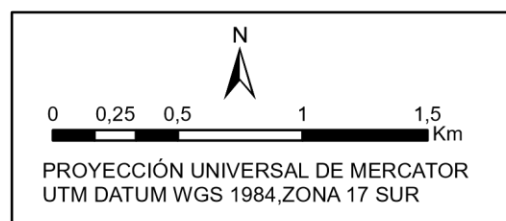




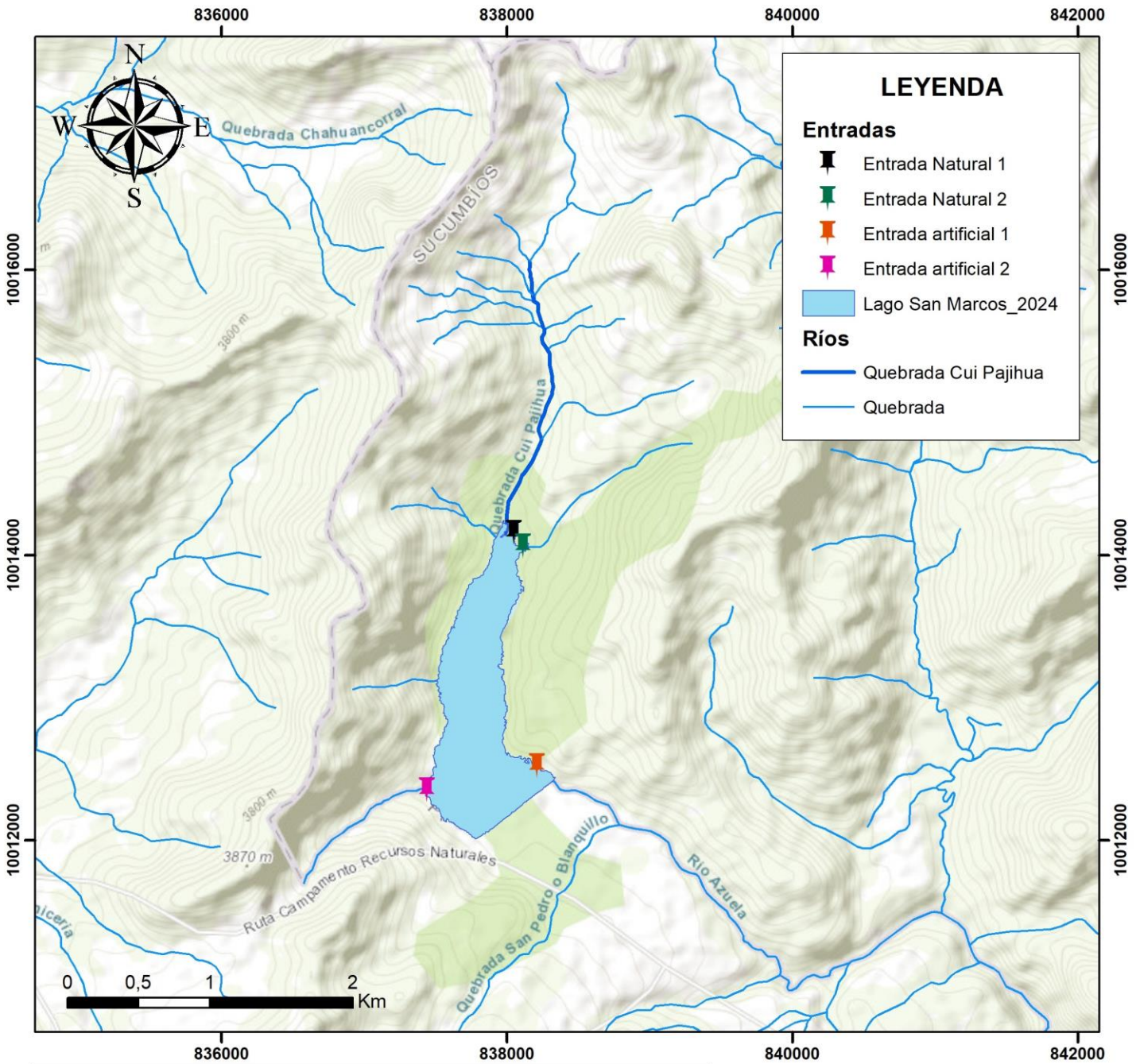
Fotografía 1.  
 Coordenadas:  
 x:838212,99 ; y:10012521,62



Fotografía 2.  
 Coordenadas:  
 x:838114,27 ; y:10014063,09



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE	
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES	
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES	
MAPA DEL LAGO SAN MARCOS AÑO 2015	
ELABORADO:	FECHA: 37
BOSQUE GISEL ; SANDOVAL ERVIN	2024
ESCALA:	FUENTE:
1:60.000	IGM-SNI
N° : 6	



Entradas naturales:



Fotografía 1.  
Coordenadas:  
x:838212,99 ; y:10012521,62



Fotografía 2.  
Coordenadas:  
x:838114,27 ; y:10014063,09

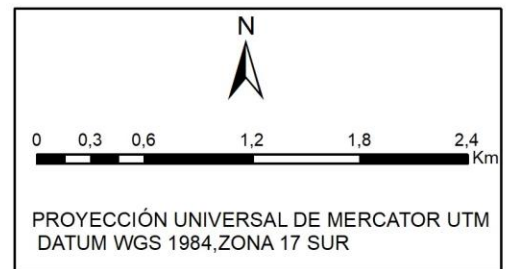
Entradas artificiales:



Fotografía 3.  
Coordenadas:  
x:838212,99 ; y:10012521,62



Fotografía 4.  
Coordenadas:  
x:837441,5 ; y: 10012345,08



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE	
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES	
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES	
MAPA DEL LAGO SAN MARCOS AÑO 2024	
ELABORADO:	FECHA:
BOSQUE GISEL ; SANDOVAL ERVIN	2024
ESCALA:	FUENTE:
1:60.000	IGM-SNI
N° : 7	