

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y**  
**AMBIENTALES**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES**



**TEMA:**

**ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA CALIDAD DE AGUA DEL LAGO  
YAHUARCOCHA UTILIZANDO MÉTODOS CONVENCIONALES Y  
SENSORES REMOTOS**

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales, especialidad Recursos Naturales Renovables.

**AUTORAS:**

Nelly Patricia Quimbiamba Moposa  
Alexandra Elizabeth Sánchez Barahona

**DIRECTOR(A):**

MSc. Jairo Santiago Cabrera

Ibarra, 2023



**CERTIFICACIÓN TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN**

Ibarra, 14 de febrero de 2023

Para los fines consiguientes, una vez revisado el documento en formato digital el trabajo de titulación: “ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA CALIDAD DE AGUA DEL LAGO YAHUARCOCHA UTILIZANDO MÉTODOS CONVENCIONALES Y SENSORES REMOTOS”, de autoría de las señoritas **Quimbiamba Nelly y Sánchez Alexandra** estudiantes de la Carrera de **INGENIERÍA RECURSOS NATURALES RENOVABLES** el tribunal tutor **CERTIFICAMOS** que el/la autor/a o autores ha procedido a incorporar en su trabajo de titulación las observaciones y sugerencia realizadas por este tribunal.

Atentamente,

**TRIBUNAL TUTOR**

**FIRMA**

MSc. Santiago Cabrera  
**DIRECTOR TRABAJO TITULACIÓN**

MSc. Oscar Rosales  
**MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN**

MSc. Gabriel Jácome  
**MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN**



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**

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

**3. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA**

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

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1723976591		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Quimbiamba Moposa Nelly Patricia		
DIRECCIÓN:	Tabacundo, Velasco Ibarra		
EMAIL:	<a href="mailto:npquimbiambam@utn.edu.ec">npquimbiambam@utn.edu.ec</a>		
TELÉFONO FIJO:	022366411	TELÉFONO MÓVIL:	0984025291

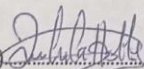
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA CALIDAD DE AGUA DEL LAGO YAHUARCOCHA UTILIZANDO MÉTODOS CONVENCIONALES Y SENSORES REMOTOS
AUTOR (ES):	Quimbiamba Nelly y Sánchez Alexandra
FECHA: DD/MM/AAAA	14/02/2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Recursos Naturales y Renovables
ASESOR /DIRECTOR:	MSc. Santiago Cabrera

**4. CONSTANCIAS**

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 que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 14 días del mes de febrero de 2023

**EL AUTOR:**

(Firma)   
Nombre: Nelly Quimbiamba



## 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, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	060551331-6		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Sánchez Barahona Alexandra Elizabeth		
DIRECCIÓN:	Quinta El Olivo		
EMAIL:	<a href="mailto:aesanchezb@utn.edu.ec">aesanchezb@utn.edu.ec</a>		
TELÉFONO FIJO:	(06) 2580 741	TELÉFONO MÓVIL:	0967942658

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA CALIDAD DE AGUA DEL LAGO YAHUARCOCHA UTILIZANDO MÉTODOS CONVENCIONALES Y SENSORES REMOTOS
AUTOR (ES):	Quimbiamba Nelly y Sánchez Alexandra
FECHA: DD/MM/AAAA	14/02/2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Recursos Naturales y Renovables
ASESOR /DIRECTOR:	MSc. Santiago Cabrera

#### 2. CONSTANCIAS

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 que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 14 días del mes de febrero de 2023

EL AUTOR:

(Firma).....  
Nombre: Alexandra Sánchez

## **Agradecimiento**

*El presente trabajo lo dedicamos principalmente a Dios por darnos la vida, ser el inspirador y darnos la fuerza para continuar con este sueño.*

*A nuestras familias por su amor, trabajo y sacrificio en estos años, por acompañarnos en los días y noches difíciles de estudio, hemos llegado hasta aquí por ustedes es este logro y meta conquistada.*

*A la Universidad Técnica del Norte, Facultad en Ciencias Agropecuarias y Ambientales por darnos la oportunidad de pertenecer a la institución y brindarnos los conocimientos necesarios para la culminación de esta carrera.*

*MSc. Santiago Cabrera director de tesis, sin sus virtudes, paciencia y constancia no lo hubiésemos logrado fácilmente, de igual manera a nuestros asesores MSc. Oscar Rosales y MSc. Gabriel Jácome por compartir sus conocimientos y experiencias para el desarrollo de este estudio.*

*A todas las personas que nos han apoyado, a los que nos abrieron las puertas, después de años de esfuerzo y sacrificio llegó el día de decir gracias a cada uno.*

*Nelly Patricia Quimbiamba Moposa  
Alexandra Elizabeth Sánchez Barahona*

## **Dedicatoria**

*En primer lugar, a Dios por bendecir mi vida y guiarme a lo largo de estos años, ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y dificultad para hoy cumplir con un sueño anhelado.*

*A mi Padre José Quimbiamba por ser el principal promotor de mi sueño, por inculcar en mi valor, ser ejemplo de esfuerzo y valentía. Admiro la dedicación el trabajo por sacarme adelante, no ha sido fácil pero hoy puede decir que este triunfo es por los dos ¡Le amo!*

*A mis hermanos Geovanny, Mirian, Wilmer y Gladys por estar presentes y apoyarme en mi etapa académica, fue posible a ustedes el poder alcanzar estos sueños, no me alcanza l vida para expresar la gratitud que siento.*

*A mi amiga y cómplice de sueño Alexandra S. gracias por cada momento vivido, por el apoyo y el impulso a seguir, hoy culminamos nuestra vida universitaria, las risas y los recuerdos se quedan marcados para siempre, vamos por más años juntas y más metas por cumplir.*

*A cada una de mis amigas Erika D. e Ivonne R., con quien tuve el gusto de compartir esta hermosa carrera, éxitos en sus vidas y bendiciones.*

**Nelly Quimbiamba**

## **Dedicatoria**

*Primeramente, a Dios por ser mi guía, por brindarme salud y conocimiento para culminar esta etapa universitaria.*

*A mis padres Bolívar Sánchez y Cecilia Barahona por sus consejos, paciencia y enseñanzas, por los valores que me han inculcado y sobre todo por sus esfuerzos y apoyo incondicional que a pesar de las adversidades me motivaron para que pueda cumplir mis metas.*

*A mi hermano Diego Sánchez que con su apoyo y aliento incesante supo motivarme para lograr este objetivo.*

*En especial a mi hijo Jheremy Sánchez que paso junto a mí las malas noches, por ser mi motivación y fuente de energía para no rendirme en los estudios y ser un ejemplo para él.*

*A mi amiga y compañera de sueño Nelly Q. gracias por aguantar mis cambios de humor, por cada momento vivido, por compartir tus conocimientos conmigo, por el apoyo para no desmayar en los estudios y la motivación para cumplir este meta.*

*De igual manera a mis amigas Erika D. e Ivonne R. , porque de cada una de ellas aprendí algo nuevo que me ayudo a superarme, por estar junto a mí durante esta etapa, por compartir cada sonrisa, palabra e historia.*

**Alexandra Sánchez**

## Índice

Resumen.....	13
Abstrat.....	14
Introducción .....	15
1.1. Revisión de antecedentes o estado del arte .....	15
1.2. Problema de investigación y justificación.....	17
1.3. Objetivos .....	19
1.3.1. Objetivo general .....	19
1.3.2. Objetivos específicos .....	19
1.4. Preguntas directrices de la investigación .....	19
1.5. Hipótesis.....	20
Capítulo II .....	21
Marco teórico .....	21
2.1. Eutrofización .....	21
2.2. Contaminación en el lago Yahuarcocha.....	22
2.3. Análisis de calidad de agua .....	23
2.1.1. Métodos convencionales .....	24
2.1.1.1. Parámetros físicos .....	24
2.1.1.2. Parámetros químicos .....	26
2.1.1.3. Parámetros biológicos .....	27
2.4. Índice de contaminación .....	28
2.5. Métodos de toma de muestras .....	29
2.6. Metodología de análisis de muestras de agua .....	29
2.7. Teledetección .....	30
2.7.1. Espectro electromagnético .....	30
2.7.1.1. Regiones espectrales .....	31
2.7.2. Agua en el espectro visible e infrarrojo .....	31
2.7.3. Resolución de sensores remotos .....	32
2.7.3.1. Resolución espacial.....	32
2.7.3.2. Resolución espectral.....	33
2.7.3.3. Resolución temporal.....	33



2.7.3.4. Resolución radiométrica.....	34
2.7.4. Sensores remotos.....	34
2.7.4.1. Tipos de sensores .....	34
2.7.5. Imágenes multiespectrales .....	37
2.7.6. Índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI).....	38
2.8. Revisión literaria de estudios de calidad de agua a través de Teledetección.....	38
2.9. Marco legal.....	40
Metodología .....	43
3.1. Descripción del área de estudio .....	43
3.2. Métodos.....	45
3.2.1. Análisis multitemporal de la información de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos con información actual .....	45
3.2.1.1. Primera fase .....	47
3.2.1.2. Segunda fase .....	47
3.2.2. Estimación de la concentración de clorofila “a” en el lago mediante la aplicación de las bandas del sensor remoto Dove Classics del satélite PlanetScope.....	50
3.2.2.1. Obtención del índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI).....	50
3.2.3. Análisis de la relación de datos obtenidos con métodos convencionales y sensores remotos.....	51
3.2.3.1. Generación de imágenes de distribución espacio temporal de clorofila “a” .....	51
3.2.3.2. Evaluación de la calidad del agua.....	52
3.2.3.4 Índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO) .....	52
3.3. Materiales y equipos .....	54
Resultados y Discusión .....	55
4.1. Análisis multitemporal de la información de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos con información actual.....	55

4.1.1. Análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.....	55
4.1.2. Análisis del parámetro biológico .....	60
4.2. Estimación de la concentración de clorofila “a” en el lago mediante la aplicación de las bandas del sensor remoto <i>Dove Classics</i> del satélite PlanetScope.....	62
4.3. Análisis de la relación de datos obtenidos con métodos convencionales y sensores remotos .....	67
4.3.1. Construcción de imágenes de distribución espacio temporal de clorofila “a”.....	67
4.3.2. Evaluación de la calidad del agua .....	73
4.3.3. Índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO) .....	74
Conclusiones y recomendaciones .....	77
5.1. Conclusiones .....	77
5.2. Recomendaciones.....	78
Referencias.....	80
Anexo A .....	92

## Índice de figuras

Figura 1. Esquema explicativo del proceso de eutrofización.....	22
Figura 2. Comparación de tamaño de píxel de una imagen .....	33
Figura 3. Volcán Imbabura .....	36
Figura 4. Estructura de una imagen multiespectral .....	37
Figura 5. Ubicación geográfica del lago Yahuarcocha .....	44
Figura 6. Puntos de muestreo del Lago Yahuarcocha.....	46
Figura 7. Recolección de muestras agua del lago Yahuarcocha .....	47
Figura 8. Filtración de las muestras y extracción de pigmentos de clorofila.....	48
Figura 9. Centrifugación de muestras filtradas en tubos eppendorf.....	49
Figura 10. Concentraciones mensuales de Clorofila "a" del lago Yahuarcocha...	61
Figura 11. Índice diferencial de vegetación normalizados (NDVI) reclasificado del lago Yahuarcocha del año 2017 .....	64
Figura 12. Índice diferencial de vegetación normalizados (NDVI) reclasificado del lago Yahuarcocha del año 2021 .....	66
Figura 13. Distribución espacio temporal de la clorofila “a” del año 2017.....	69
Figura 14. Distribución espacio temporal de la clorofila “a” del año 2021 .....	71
Figura 15. Escala de contaminación ICOMO .....	75

## Índice de tablas

Tabla 1 . Ubicación geográfica del lago Yahuarcocha WGS 1984UTM, Zona 17 Sur .....	43
Tabla 2. Clasificación de los valores de NDVI.....	51
Tabla 3. Criterios de aplicación del Índice OCDE.....	52
Tabla 4. Significancia de los Índices de contaminación .....	53
Tabla 5. Materiales y Equipos.....	54
Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos del lago Yahuarcocha .....	56
Tabla 7. Modelos de regresión seleccionados.....	67
Tabla 8. Prueba t para dos muestras independientes.....	73
Tabla 9. Concentraciones de clorofila “a” del año 2021 en $\mu\text{g/L}$ .....	73
Tabla 10. Estimación del índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO) .....	74

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

### CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

#### ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA CALIDAD DE AGUA DEL LAGO YAHUARCOCHA UTILIZANDO MÉTODOS CONVENCIONALES Y SENSORES REMOTOS

Quimbiamba Nelly;  
Sánchez Alexandra

#### Resumen

El lago Yahuarcocha es uno de los atractivos turísticos que se ha visto sometido a una presión antrópica en los últimos años, lo que ha provocado un deterioro en el ecosistema y ha ocasionado un cambio en el estado trófico del lago. La presente investigación analizó espacial y temporalmente la calidad de agua del lago Yahuarcocha utilizando métodos convencionales y sensores remotos. Se tomaron muestras de agua entre agosto y diciembre de 2021 y se analizaron los parámetros fisicoquímicos y biológicos y se los comparó con datos de parámetros fisicoquímicos de los años 2017 al 2020, mismos que fueron obtenidos de monitoreos realizados por el laboratorio de EMAPA-I. Por otro lado, se calculó el índice de vegetación (NDVI) para obtener la distribución espacio temporal de la clorofila “a”. Los resultados muestran que algunos parámetros fisicoquímicos superan los límites permisibles según la Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua del Libro VI Anexo 1 Tabla 8 del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, tales como el pH con datos mayores a 6.5-8.5, saturación de oxígeno media de 79,76%, aunque en agosto alcanzó el 107% superando al 80% del límite máximo permisible. La clorofila “a” alcanzó 150.3  $\mu\text{g/l}$ , mostrando que el lago está en estado hipertrófico. El NDVI indicó de manera general la presencia de vegetación ligera y entre las especies más abundantes se encuentran; la *Typha latifolia*, *Eichhornia crassipes* y *Elodea canadensis*. Los mapas de distribución espacio temporal demostraron el potencial de integrar datos tomados en campo con información satelital, en el que se muestra que, mediante la relación generada, este método podría funcionar como una herramienta para complementar estudios y monitoreos en cuerpos de agua mediante la aplicación de métodos estadísticos para generar modelos representativos para la variable clorofila “a”.

**Palabras clave:** Calidad de agua, Clorofila, Índice de vegetación, Parámetro biológico, Parámetros fisicoquímicos, Teledetección.

## Abstrat

Lake Yahuarcocha is one of the tourist attractions that has been subjected to anthropic pressure in recent years, which has caused a deterioration in the ecosystem and a change in the trophic state of the lake. The present investigation analyzed spatially and temporally the water quality of Lake Yahuarcocha using conventional and remote sensing methods. Water samples were taken between August and December 2021 and analyzed for physicochemical and biological parameters and compared with physicochemical parameter data from 2017 to 2020, which were obtained from monitoring conducted by the EMAPA-I laboratory. On the other hand, the vegetation index (NDVI) was calculated to obtain the spatio-temporal distribution of chlorophyll "a". The results show that some physicochemical parameters exceed the permissible limits according to the Environmental Quality and Effluent Discharge Standards for Water Resources in Book VI Annex 1 Table 8 of the Unified Text of Secondary Legislation of the Ministry of the Environment, such as pH with data greater than 6.5-8.5, average oxygen saturation of 79.76%, although in August it reached 107%, exceeding 80% of the maximum permissible limit. Chlorophyll "a" reached 150.3  $\mu\text{g/l}$ , showing that the lake is in a hypertrophic state. The NDVI generally indicated the presence of light vegetation and among the most abundant species were *Typha latifolia*, *Eichhornia crassipes* and *Elodea canadensi*. The spatio-temporal distribution maps demonstrated the potential of integrating data taken in the field with satellite information, showing that, through the relationship generated, this method could function as a tool to complement studies and monitoring in water bodies through the application of statistical methods to generate representative models for the variable chlorophyll "a".

**Key words:** Water quality, Chlorophyll, Vegetation index, Biological parameter, Physicochemical parameters, remote sensing.

# Capítulo I

## Introducción

### 1.1. Revisión de antecedentes o estado del arte

La provincia de Imbabura cuenta con diversos lugares turísticos, uno de ellos en el cantón Ibarra, el lago Yahuarcocha es uno de los principales atractivos turísticos (Guerrero, 2018). Este ecosistema presenta un gran valor ecológico, económico y escénico, el mismo que se ha visto afectado por diferentes factores que incrementan la contaminación del cuerpo lacustre (Oquendo 2016). Dentro del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) del Gobierno Autónomo Descentralizado de Ibarra (2015) se presenta a la descarga de efluentes, eutrofización, eliminación de especies nativas, crecimiento poblacional y disminución del nivel de agua, como los principales problemas ambientales asociados al lago (Lara, 2015).

El estado de contaminación progresivo ocasionado por los diferentes problemas ambientales en el lago Yahuarcocha lo ha convertido en un punto de investigación importante dentro de los ecosistemas lénticos de la provincia de Imbabura (Torres, 2020). Dentro del cual se han desarrollado estudios que van desde conocer la vegetación acuática y el estado trófico (Terneus, 2017), absorción de plomo y propuesta de fitorremediación de aguas residuales en el lago (Oquendo, 2016) y conservación de los recursos naturales, entre otros.

A nivel mundial, la evaluación de la calidad de agua generalmente se realiza por métodos convencionales los cuales se determina por un número de análisis cuantitativos y se limita a la interpretación de los resultados del monitoreo. Asimismo, han surgido nuevas tecnologías como el monitoreo de la calidad de cuerpos de agua por sensores remotos, las cuales llevan menos tiempo para su análisis (Bellido, 2019), y cuya tecnología puede tener las características de ser innovadora y sostenible desde un punto de visto ecológico, social y económico (Chaves-Campos et al., 2005).

En Europa la Universidad de Valencia realizó un estudio sobre el análisis de la clorofila “a” en cuerpos de agua de la zona costera de Gandía mediante el uso de imágenes multiespectrales (Estruch, 2010). Por otra parte, en Sudamérica, en el año 2016, se realizó un análisis espacio temporal de la calidad de agua del embalse el Guájaro, Atlántico en Colombia mediante la aplicación de algoritmos y metodologías las que permitieron realizar la estimación de parámetros de calidad de agua a través de técnicas de percepción remota (Berdugo y Reales, 2016). En el mismo país se trabajó en la determinación de la variación espacio-temporal de clorofila “a” caso de la Ciénaga de Ayapel y el Lago Tota mediante imágenes satelitales (Merchán, 2018). Igualmente, en Perú se realizó un estudio del comportamiento espacio temporal de la clorofila “a” en la represa Aguada Blanca, donde la metodología aplicada se basa en la relación de la clorofila “a” medida *in-situ* con imágenes satelitales Sentinel 2A del portal de datos de la Agencia espacial europea del proyecto Copérnico (Bellido, 2019).

En Ecuador se han realizado varios estudios sobre la estimación de la calidad de agua a través de métodos convencionales como es el análisis fisicoquímico y microbiológico. Moreta (2008) realizó evaluaciones en un estudio sobre la eutrofización de varios lagos del país en el cual se analizó parámetros físicos y químicos como la temperatura, oxígeno disuelto y turbidez. En la laguna Colta ubicada en Chimborazo se realizaron mediciones de conductividad eléctrica, pH, sólidos totales disueltos, temperatura por un periodo de dos años (Escobar et al., 2021).

Otro estudio evaluó el estado trófico del lago Yahuarcocha, en el que se valoró la contaminación analizando los niveles de concentraciones en macronutrientes (Ca, Na, Fe, Mg y K) (Terneus, 2017). Finalmente, la publicación realizada por Benavides y Méndez (2020) examinó la presencia de cromo y plomo en el agua determinando el estado eutrófico del ecosistema acuático. Cabe mencionar que dentro de la provincia de Imbabura y a nivel del país no se han realizado estudios sobre la calidad de agua mediante el uso de sensores remotos.



## 1.2. Problema de investigación y justificación

En aguas superficiales de ecosistemas lénticos, la calidad de agua se ha ido deteriorando, como resultado del crecimiento poblacional, incremento de industrias, actividades agrícolas y la urbanización (Torres, 2020), lo que ha ocasionado que los cuerpos de agua enfrenten el deterioro de la calidad especialmente en lagos y embalses. El análisis de los cambios producidos en la calidad del agua es uno de los aspectos vitales en el manejo y gestión de los recursos hídricos ya sea para informar el estado del ecosistema o la necesidad para acciones correctiva o preventivas (Bellido, 2019).

La evaluación de la calidad del recurso hídrico por lo regular se lo realiza por métodos convencionales los cuales se monitorean a través de mediciones *in-situ* y toma de muestras para el posterior análisis en laboratorios. Mediante la medición de parámetros fisicoquímicos como turbidez, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), clorofila, oxígeno disuelto (OD), coliformes fecales, entre otros, es posible interpretar y llegar a la conclusión de la calidad de los ecosistemas acuáticos (Bellido, 2019).

Generalmente los monitoreos *in-situ* o *ex-situ* presentan una dificultad en el momento de precisar el número de muestras, así como también su distribución espacial y temporal, estos factores inciden en el uso de los recursos humanos y económicos (Quintana-Sotomayor, 2012), por lo que este tipo de evaluaciones tienden a ser costosas, además de que requieren de tiempo para su interpretación. La principal desventaja de los monitoreos *in-situ* o *ex-situ* es que se encuentra limitada, obviando la variabilidad espacial y temporal, lo que dificulta la predicción de la calidad de agua a corto plazo (Bellido, 2019). A diferencia del monitoreo por sensores remotos que demandan de una gran logística, las técnicas por Teledetección pueden ser usadas como una herramienta complementaria al monitoreo, cartografía y valorización de la calidad de agua en menor tiempo y con costos bajos (Berdugo y Reales, 2016), por lo que las tecnologías de monitoreo por

sensores remotos se presentan como una nueva alternativa dentro del monitoreo de calidad.

El analizar muestras de agua mediante el uso de métodos convencionales requiere de esfuerzo y tiempo para la toma de muestras y su posterior interpretación, por lo que se presenta una alternativa, que es el monitoreo de la calidad de agua mediante la aplicación de sensores remotos. En este sentido la implementación de técnicas de Teledetección para los monitoreos de calidad ambiental presenta una serie de ventajas, dentro de las cuales resulta más rápida la adquisición de la información de grandes cuerpos de agua, además de monitoreos permanentes en la zona de estudio (Bellido, 2019)

Mediante la Teledetección se puede generar bases de datos actualizados, además de facilitar el estudio en zonas de difícil acceso. En esta investigación se analiza la calidad de agua del Lago Yahuarcocha por métodos convencionales mediante el monitoreo de parámetros fisicoquímicos (turbidez, oxígeno disuelto, pH, sólidos totales, coliformes totales, temperatura, entre otros) y biológico (clorofila “a”) además de la aplicación de sensores remotos para evaluar la validez técnica y la reducción de los costos de monitoreo.

El Departamento de Calidad Ambiental de la dirección Zonal 1 del Ministerio del Ambiente y Agua menciona que la calidad del ecosistema lacustre de Yahuarcocha presenta un acelerado deterioro (Rosales, 2020), además, en el ecosistema lacustre no se han realizado monitoreos constantes en la última década por parte de las autoridades ambientales. En un informe técnico sobre las muestras de agua receptados en noviembre del 2020 por Técnicos del Ministerio del Ambiente y los Técnicos del Laboratorio de Análisis Ambiental e Inspección (Lab-Cestta) de la Escuela Politécnica del Chimborazo se señala el estado grave de contaminación del lago por la presencia de coliformes, fenoles y metales pesados (Rosales, 2020). Por consiguiente, la investigación busca determinar si la información obtenida por métodos convencionales de la calidad de agua del Lago

Yahuarcocha se puede relacionar con la información obtenida por sensores remotos y que a su vez presenten una validez técnica.

Esta investigación está encaminada con el Objetivo 13 del Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025, en el que menciona “*Promover la gestión Integral de los Recursos Hídricos*”, el mismo que trabaja en conjunto con el objetivo 11 del Desarrollo sostenible “*Ciudades y comunidades sostenibles*” (Secretaría Nacional de Planificación, 2021). Cabe destacar que el alcance de este análisis permitirá realizar monitoreos permanentes de los ecosistemas acuáticos a largo plazo.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. *Objetivo general***

Analizar espacial y temporalmente la calidad del agua del lago Yahuarcocha utilizando métodos convencionales y sensores remotos.

#### **1.3.2. *Objetivos específicos***

- Analizar la información multitemporal de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del lago Yahuarcocha con información actual.
- Estimar la concentración de clorofila “a” en el lago mediante la aplicación de las bandas del sensor remoto *Dove Classics* del satélite PlanetScope.
- Analizar la relación de los datos obtenidos con métodos convencionales y por sensores remotos para la generación de un método estimativo de la calidad del agua del lago.

### **1.4. Preguntas directrices de la investigación**

¿Cuál es el estado trófico del Lago Yahuarcocha a partir de información por métodos convencionales y sensores remotos?

¿Cómo se puede generar un método de análisis de calidad de agua que tenga validez técnica y reduzca costos de monitoreo a partir de parámetros fisicoquímicos y la clorofila “a”?

### **1.5. Hipótesis**

- **Hipótesis nula**

Los datos de calidad de agua obtenidos por métodos convencionales son similares a los datos obtenidos por sensores remotos.

- **Hipótesis alterna**

Los datos de calidad de agua obtenidos por métodos convencionales son diferentes a los datos obtenidos por sensores remotos.

## Capítulo II

### Marco teórico

#### 2.1. Eutrofización

La eutrofización es un proceso en el que un ecosistema acuático trófico cambia a otro nivel por la contaminación de los cuerpos de agua, principalmente en lagos y embalses, este proceso ocurre por el desequilibrio en la disponibilidad de nutrientes, enriquecimiento principalmente de nitrógeno y fósforo (Urrutia, 2014). Este proceso por lo general es de forma lenta e independiente de la actividad del hombre, sin embargo, se acelera por actividades antropogénicas, como el uso de fertilizantes químicos, la descarga de aguas residuales e industriales, produciendo la proliferación de algas las cuales ocasionan un desequilibrio en el ecosistema (García y Miranda, 2018).

Un lago puede presentar diferentes niveles tróficos, entre ellos: oligotrófico, mesotrófico, eutrófico e hipereutrófico (García y Miranda, 2018), el nivel se determina utilizando índices calculados en base a diferentes parámetros, estos proporcionan información sinóptica sobre el estado trófico del ecosistema, lo cual permite generar criterios ecológicos para definir acciones, dentro de ellos se encuentran: la clasificación propuesta por la OCDE (Cooperación para el Desarrollo Económico), Índice del Estado Trófico de Carlson (IET), (Ramos, 2018).



**Figura 1.** Esquema explicativo del proceso de eutrofización  
**Fuente:** Bragado (2017)

*Nota.* El gráfico representa el proceso de deterioro de la calidad de agua.

## 2.2. Contaminación en el lago Yahuarcocha

Sánchez (2019) explica que uno de los factores más notables que conlleva a incrementar la contaminación y agotamiento de los recursos naturales es el crecimiento demográfico desmesurado el cual trae consigo el incremento en urbanización, industrialización y producción. La ciudad de Ibarra cuenta con 181.175 habitantes de los cuales 3.000 aproximadamente habitan en zonas aledañas a el lago Yahuarcocha esto de acuerdo con el último censo realizado por el INEC (2010). El aumento demográfico ha perjudicado al ecosistema acuático debido al cambio de uso de suelo a las actividades antrópicas generadas alrededor del lago, descargas directas en el sistema léntico (Pabón, 2015; Oquendo, 2016).

Oquendo (2016) menciona que el nivel de contaminación presente en el espejo de agua del área de estudio es ocasionado por las actividades turísticas, mala infraestructura, descarga de aguas, actividad agrícola y ganadera, presentando a San Miguel de Yahuarcocha como la principal fuente de contaminación para el lago. Además, las malas prácticas ambientales y la falta de conciencia por parte de la población han dificultado la investigación hidrológica, así como también la

alteración en el estado trófico del lago debido a los problemas de contaminación que existe en la microcuenca (Revelo, 2017).

La causa principal del estado eutrófico del lago es el incremento de nutrientes provenientes de la microcuenca (Portilla, 2015). Así mismo la poca o nula intervención del ecosistema y la falta de tratamiento de los espacios destinados a actividades humanas ocasionan problemas de contaminación, así como también de imagen (Verdezoto, 2018).

### **2.3. Análisis de calidad de agua**

La calidad del agua dentro de un ecosistema acuático puede definirse como la numeración de las concentraciones y especificaciones de los aspectos físicos, así como de las sustancias orgánicas e inorgánicas además de tomar en cuenta la composición y el estado de la biota en el cuerpo de agua. Las variaciones espaciales y temporales que presenta la calidad de agua se deben a factores externos e internos al medio acuático (Sierra-Ramírez, 2011). Los cuerpos de agua superficiales están expuestos a la contaminación natural (materia orgánica o transporte de material particulado o disuelto) y de origen antrópico (descargas de aguas residuales, escorrentía agrícola y otros) (Torres et al., 2009).

El monitoreo de calidad de agua es una herramienta fundamental para conocer el estado del agua y de los ecosistemas acuáticos, se define de acuerdo con su uso potencial comparando las características de variables físicas (turbidez, sólidos totales, temperatura), variables químicas (pH, oxígeno disuelto), biológicas (clorofila) y microbiológicas (coliformes) (Marín-Galvín, 2020). La mala gestión del recurso hídrico puede afectar la calidad y generar procesos de eutrofización, desequilibrios tróficos (Molden, 2007).

### **2.1.1. Métodos convencionales**

La evaluación de calidad del recurso agua mediante métodos convencionales presenta limitaciones, dado que es necesario de un laboratorio para determinar los diferentes parámetros de calidad, además de la recolección de muestras en el área de estudio que requiere de esfuerzo de muestreo dependiendo de la proporción al tamaño del cuerpo de agua (Torres et al., 2009). Una de las ventajas del análisis de agua por métodos fisicoquímicos, es que sus análisis suelen ser rápidos y se puede realizar con mayor frecuencia (Samboni-Ruiz, 2007).

Los parámetros de calidad de agua, al entrar en contacto con diferentes agentes como el aire suelo, vegetación, adquieren parte de estos, haciendo que las aguas dulces presenten número de sustancias en su composición, lo que influye en las condiciones estéticas del agua y provoca que adopten ciertas características. Los organismos vivos requieren de agua con suficiente calidad para sobrevivir, pese a que algunas pueden tolerar distintos niveles de calidad de agua (Gil-Marín et al., 2018). La contaminación se puede calcular a través de valores o parámetros que sean medibles, entre las variables fisicoquímicas que más se identifican está el pH, conductividad, DBO<sub>5</sub> entre otros (Zarzosa-González y Aragonese-López, 2020). Los parámetros más estudiados dentro del análisis de calidad de agua son:

#### **2.1.1.1. Parámetros físicos**

Se los conoce como aquellos que alteran los aspectos físicos de un componente hídrico, así como los sentidos humanos; vista, gusto, olfato, estas inciden de manera directa en la parte estética del agua (Montoya et al., 2017). La composición específica de un agua va a influir en sus propiedades físicas tales como:

##### **a) Turbidez**

Es el grado de opacidad que adquiere el agua por la presencia de material particulado en suspensión, cuya concentración determina la transparencia ya que



esta tiende a limitar el paso de la radiación solar, esta característica es ampliamente aplicada como un criterio de calidad de agua, de medición rápida, económica y de fácil interpretación a los operadores (Montoya et al., 2017). Comúnmente en estudios de campo para medir la turbidez se la realiza a través del disco *secchi*, el cual se encuentra dividido en cuatro secciones y pintado blanco y negro alternadamente, este instrumento se introduce en el agua hasta que deja de verse.

Otra medida de la turbidez es mediante el fundamento de nefelometría, en el cual las partículas que están en suspensión dispersan parte de la luz que penetra en la muestra (medida a una longitud de onda de 420 nm), esta es recogida en una célula fotoeléctrica y en función de su intensidad provoca una corriente eléctrica, midiendo así la turbidez de una muestra (Marín-Galvín, 2020).

#### **b) Conductividad eléctrica**

Parámetro que mide la capacidad de una solución para conducir la corriente eléctrica, la presencia de sales en forma ionizada, como cloruros, iones de sodio, carbonatos, pueden conducir corriente eléctrica, los valores del parámetro indican la concentración de solutos, y puede ser afectada por la temperatura o material de composición. El agua pura presenta 25 °C, una conductancia específica de 0.56  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que un agua contaminada presenta una conductancia de 1000 a 10.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , cuanto menor sea la conductividad más pura es el agua (Chamba y Guallasamín, 2015), este parámetro puede variar por factores como concentración, movilidad, valencia y temperatura.

#### **c) Sólidos totales**

Este parámetro permite determinar la medida de la materia en una muestra de agua, la presencia de sales disueltas, partículas en suspensión de origen orgánico e inorgánico en un medio acuoso, dicho material puede reflejarse después de la evaporación del agua o por un proceso de filtración fina a través de una membrana con poros de 2.0  $\mu\text{m}$  (Gualdrón, 2016). Su determinación se basa en la medición

cuantitativa del incremento de peso de una capsula previo a la evaporación de la muestra y el secado entre los 103 a 105 °C los resultados se expresan en mg/L. El análisis es importante en el control de proceso de tratamientos físicos y biológicos de aguas.

### **2.1.1.2. Parámetros químicos**

Se identifican durante la modificación de balance químico en el cuerpo de agua el cual tiene incidencia en la salud de los seres humanos.

#### **a) Oxígeno disuelto**

El oxígeno disuelto (OD) toma importancia en la respiración de los microorganismos aerobios y formas de vida aerobia, es definido como la cantidad de oxígeno encontrado en el agua para la sobrevivencia y desarrollo de organismos. Permite evaluar la calidad de agua superficial, su presencia se evidencia por el aporte del oxígeno de la atmósfera y de la fotosíntesis en el agua, generalmente en las superficies de agua limpia se encuentran saturadas de oxígeno mientras que las aguas contaminadas presentan un nivel de oxígeno bajo demostrando la incapacidad para mantener formas de vida (Gualdrón, 2016). Las concentraciones de OD va a depender tanto de característica fisicoquímicas y la actividad bioquímica de los organismos en los cuerpos de agua, este parámetro es uno de los más usados en el control de contaminación de aguas, proceso de tratamiento de aguas residuales, y otros (Gaitán, 2015).

#### **b) Potencial de hidrógeno (pH)**

Hace referencia a la acidez o alcalinidad presente en los cuerpos de agua, determinándose como sustancia ácida en un rango de (0 - 7), alcalina desde (7 - 14) y su punto neutro se lo halla en un valor de 7, el pH de las aguas puede ir cambiando, dependiendo de la cantidad de SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, cantidad de materia orgánica (Minaya, 2016). Muchas reacciones químicas dentro de los organismos acuáticos son

importantes para la supervivencia y crecimiento, los cambios en el pH llegan a alterar la concentración de otras sustancias en el agua provocando que haya un aumento en nivel de toxicidad.

#### **c) Demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>)**

Se define como la cantidad de oxígeno disuelto que es consumido por los microorganismos entre los primeros cinco días a 20 °C en una muestra de agua en que se da la biodegradación de la materia orgánica, su importancia dentro de la calidad de agua es que permite prever cuanto oxígeno es necesario para la depuración (Minaya, 2016). La aplicación del DBO<sub>5</sub> puede ayudar a calcular los efectos que tiene las descargas de efluentes industriales o domésticos sobre los cuerpos de agua, pues es un método aplicable para aguas continentales, aguas negras, pluviales, o de diferente procedencia.

#### **2.1.1.3. Parámetros biológicos**

Las aguas superficiales poseen una amplia cantidad de organismos, algunos considerados como contaminantes que puede alterar la calidad del recurso hídrico, dentro de los organismos que producen toxinas se encuentran bacterias como *E. Coli*, *Salmonella*, *Vibrio cholerae*, virus como enterovirus, rotavirus, adenovirus entre otros (Samboni-Ruiz, 2007).

#### **d) Clorofila “a”**

Pigmento de los organismos productores primarios que se relaciona con la productividad y desarrollo vegetal, usado para determinar el nivel trófico en el cuerpo de agua, este es el principal pigmento fotosintético que está presente en las algas, por lo cual es un indicador de contaminación por exceso de nutrientes en el cuerpo de agua (Bellido, 2019). Los organismos fotosintéticos tienen pigmentos que permiten absorber energía de una amplia gama de longitudes de onda, las moléculas de clorofila absorben longitudes de onda azules y rojas.

Las diferentes concentraciones en el cuerpo líquido y las profundidades en la columna de agua hacen que las ondas del espectro electromagnético también cambien por las propiedades de reflectancia espectral del agua (Bellido, 2019). Según Preciado y Silva (2015) una alta concentración de clorofila “a” es cercana a  $1 \text{ mg/m}^3$  en el agua, debido a ello se puede medir la cantidad de algas en el cuerpo de agua, las concentraciones de nutrientes también varía por cambios físicos, químicos y climatológicos. Dentro de la medición de la clorofila “a” es importante coleccionar muestras en algunos puntos de muestreo tanto a superficie como en profundidad Secchi, y conservar para el posterior análisis (Gómez, 2015).

Las concentraciones de clorofila “a” (Chl-a) en el agua permite calcular la cantidad de biomasa fitoplanctónicas en el agua (Estruch, 2010), la cual presenta una relación a la concentración de nutrientes y producción de algas, el grado de eutrofia tiene como consecuencia la producción excesiva de algas, las cuales consumen oxígeno, aumentan el  $\text{DBO}_5$  y producen la muerte de peces y animales (Vera et al., 2021).

#### **2.4. Índice de contaminación**

El índice de contaminación fue desarrollado a partir del análisis de componentes principales aplicado a información fisicoquímica resultante de los estudios limnológicos, extensos programas de monitoreo implementados por la industria petrolera sobre diferentes regiones de Colombia, estos índices evalúan la condición o nivel de contaminación del agua mediante la agrupación de variables fisicoquímicas que expresan la misma condición ambiental (Ramírez et al., 1997). Los ICO complementan el panorama ambiental de un recurso hídrico tal como lo demuestra la correlación próxima a cero, las correlaciones frecuentes y reiteradas entre variables físicas y químicas dan origen a cuatro índices de contaminación; ICO por materia orgánica (ICOMO), ICO por mineralización (ICOMI), ICO por contaminación de sólidos (ICOSUS), ICO de contaminación trófico (ICOTRO) (Ramírez et al., 1997).

## **2.5. Métodos de toma de muestras**

La metodología de muestreo va a variar dependiendo de los procedimientos analíticos y de los objetivos del estudio a desarrollar, el muestreo se basa en tomar una parte representativa del material a estudiar, que posteriormente es transportado para el respectivo análisis. Las técnicas dentro de la recolección de muestras deben asegurar la preservación de las características del material original, debido al requerimiento de precisión, exactitud y representatividad de datos, con el fin de evitar errores y sesgos en los resultados (Instituto de Toxicología de la Defensa, 2016).

La muestra simple se desarrolla en un tiempo y lugar determinado, para un análisis individual la muestra debe representar la composición del agua original para el lugar, tiempo y circunstancia, mientras que la muestra compuesta o alícuota consta de la toma de varias muestras pequeñas individuales en distintos momentos, pues la composición de agua varía a lo largo del tiempo, el término compuesto se refiere a la combinación de muestras sencillas en el mismo sitio, pero en intervalos de tiempo, empleada para medir las concentraciones promedio (Sierra-Ramírez, 2011).

## **2.6. Metodología de análisis de muestras de agua**

El muestreo presenta gran importancia en relación con los resultados que se obtenga de los análisis, Sierra-Ramírez (2011) menciona el valor desde su recolección, preservación y traslado deben ser correctos para evitar que carezcan de validez, la recepción de muestras debe cumplir con ciertos requisitos a fin de que no afecte a la calidad de resultados, como la verificación del sellado de muestra dependiendo del tipo de ensayo, verificación de la preservación, transporte en condiciones óptimas y en tiempo requerido, además que las muestras deben identificar de inmediato y claramente su punto y fecha de recolección (Espinosa et al., 2006).

## **2.7. Teledetección**

La percepción remota o conocido como Teledetección es el proceso por el cual se colecta o se adquieren datos de la superficie de la Tierra y el medio ambiente desde sensores instalados en plataformas espaciales, sin tener contacto físico con el mismo, la interacción electromagnética entre el sensor y el terreno genera una serie de datos que son: procesados, almacenados para posteriormente tener información interpretable de la Tierra, permite conocer mejor los problemas ambientales, y la solución dependerá en la capacidad del usuario (Chuvieco, 2020).

Vera et al., (2021) mencionan que el monitoreo por sensores remotos ofrece una factible solución a los obstáculos de monitoreo in situ, pues toma datos disponibles públicamente a escalas regionales y resoluciones temporales. También permite la rápida identificación de aguas deterioradas, la extracción de mediciones de calidad de agua directamente de las imágenes, dando lugar a respuestas más rápidas.

### ***2.7.1. Espectro electromagnético***

Es la distribución de radiación electromagnética según la energía, las fuentes de radiación son diversas dado que sus ondas varían de longitudes pequeñas a largas, lo que ha provocado que se cree un sistema de clasificación de acuerdo con la longitud de onda que se mueve, en consonancia a la velocidad constante de la luz, incluye un rango continuo de longitudes de onda, pero comúnmente se identifican como regiones (Chuvieco, 2016). La energía electromagnética atraviesa el espacio a la velocidad de la luz en forma de ondas del sinusoidal, en sensores remotos es muy común caracterizar las ondas en función de su posición dentro del espectro electromagnético (Pérez, 2007).

### **2.7.1.1. Regiones espectrales**

Las regiones espectrales presentan el espectro visible que muestra un rango de frecuencia del ojo humano con una radiación solar máxima dividido en bandas: rojo (0.6-0.7  $\mu\text{m}$ ), verde (0.5-0,6  $\mu\text{m}$ ) y azul (0.4-0.5  $\mu\text{m}$ ) (Bellido, 2019). El infrarrojo cercano es similar al espectro visible, conocido como IR fotográfico o reflejado, energía solar que refleja los cuerpos, rango de (0.7-1.1  $\mu\text{m}$ ), el infrarrojo medio entremezcla entre la radiación solar y emisión, aprovechado para medir concentraciones de vapor agua, ozono, aerosoles, presenta un rango de (1.1-8  $\mu\text{m}$ ) (Chuvieco, 2016), infrarrojo térmico muestra la radiación emitida por los cuerpos y determina la temperatura (IR térmico), se encuentra a disposición a cualquier hora del día con un rango de (8-14  $\mu\text{m}$ ) (Bellido, 2019) y el microondas que son perturbaciones atmosféricas menores, transparente a las nubes, que hace uso de sensores activos, tiene un rango espectral de (1 mm-1 m) (Chuvieco, 2016).

### **2.7.2. Agua en el espectro visible e infrarrojo**

Los cuerpos de agua transmiten la mayor parte de radiación visible que reciben, y presentan mayor absorptividad cuanto mayor sea la longitud de onda, la detección de la viabilidad del agua es mejor en longitudes de onda más corta (azul y verde), que se relaciona con su profundidad, contenido de materiales en suspensión y rugosidad de superficie (Bravo-Morales, 2017). El agua al ofrecer importantes cantidades de clorofila “a”, hace que la reflectividad en el azul baje y aumente el verde, permitiendo la correlación de signo negativo, entre la reflectividad del agua en la banda azul y el contenido de la clorofila “a” (Bellido, 2019).

En el espectro visible, cuando el agua es clara presenta unas excelentes propiedades en relación con la transmisión de la radiación electromagnética y absorción del infrarrojo. En cuanto a la reflectividad se muestra un pico en el verde y va disminuyendo hasta el infrarrojo. La falta de reflectividad en el infrarrojo permite diferenciar las áreas de tierra de los cuerpos de agua, ya sea en las costas, lagos o ríos.

La profundidad de la luz a la que puede penetrar depende de la longitud de onda. Mientras más profundo sea, la reflectancia en cualquier longitud de onda va a disminuir. En el caso de aguas turbias la reflectancia varía, si el agua presenta turbidez por fitoplancton va a haber alteraciones en el color verde (incrementa) y el azul (disminuye). En el caso de sedimentos inorgánicos la reflectancia incrementa principalmente en el rojo. Estas variaciones permiten el desarrollo de distintas ecuaciones (López-Montecinos, 2019).

El espectro infrarrojo del agua presenta divisiones conocidas como regiones; el lejano ( $10\text{-}300\text{ cm}^{-1}$ ) detecta movimientos microscópicos de traslaciones restringidas de una molécula en la “caja” constituido por su contiguo ( $50\text{ cm}^{-1}$ ), así como una vibración de tensión de puentes de hidrógenos ( $200\text{ cm}^{-1}$ ), en la zona de infrarrojo medio ( $300\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ ) se distingue movimientos de libración y vibraciones internas de la molécula de agua (Rabassa, 1995).

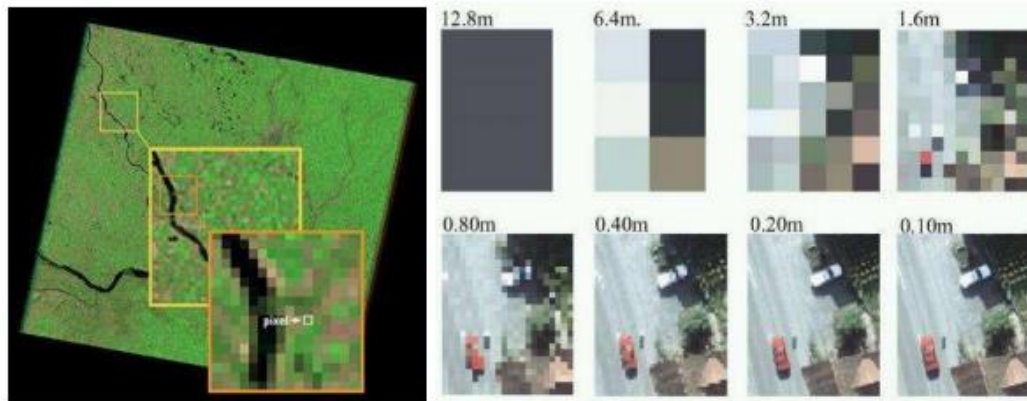
### ***2.7.3. Resolución de sensores remotos***

#### **2.7.3.1. Resolución espacial**

Esta puede identificar el objeto más pequeño dentro de una imagen, es decir, tiene relación con el tamaño del píxel, se puede identificar como la unidad mínima de información que está contenida en una imagen, en algunos casos se usa el concepto de IFOV (Campo instantáneo de visión) que se define como la sección angular del área captada por detector individuales y observada en un momento determinado. Si el píxel tiene menor tamaño la resolución espacial será mayor, es así como el sensor presentara más detalles de los objetos (Chuvieco, 2016).

Así mismo Gonzales y Mendoza (2018), mencionan que la resolución espacial indica el tamaño de cada píxel contenida en una imagen. Las imágenes que contienen pixeles más pequeños son las que presentan una resolución alta, en la que se puede apreciar vistas más claras, mientras que las imágenes que tienen pixeles más grandes presentan una resolución más baja.





**Figura 2.** Comparación de tamaño de píxel de una imagen

**Fuente:** Bravo-Morales (2017)

*Nota.* En la imagen se hace una comparación de píxeles de una imagen.

### 2.7.3.2. Resolución espectral

Esta resolución indica el número y el ancho que tienen las bandas en las que el sensor puede captar radiación electromagnética, el número de bandas y su localización en el espectro va a depender del objetivo que se pretenda cubrir, cuantas más bandas incluya un sensor será mejor ya que cada banda constituye un variable, además que es preferible que sean estrechas para que su poder discriminante aumente (Rivas, 2014). Mientras mayor sea la resolución del sensor, se tendrá información más precisa del comportamiento de la cobertura vegetal en distintas bandas espectrales (Bravo-Morales, 2017).

### 2.7.3.3. Resolución temporal

Es el tiempo o periodicidad que toma el sensor para volver a la zona de inicio de la Tierra, no es más que el periodo que requiere un sensor remoto para adquirir las imágenes de una misma zona de la superficie terrestre (Rodríguez y Arredondo, 2005), algunos sensores pueden entregar la información cada 30 minutos y otros como PlanetScope que tienen un ciclo de repetición diaria en una hora de cruce de 9:30 a 11:30 hora local de Ecuador (European Space Agency [ESA], 2016). El ciclo de cobertura depende de las características orbitales de la plataforma como de la altura, velocidad e inclinación, así como también del diseño que tenga el sensor.

#### **2.7.3.4. Resolución radiométrica**

Indica la sensibilidad que tiene el sensor y muestra la gama de colores disponibles, es decir, las variaciones en la radiación que es captada. Esta suele expresarse mediante el número de bits (dígitos binarios), los cuales son necesarios para almacenar cada uno de los píxeles y estos pueden asumir un valor específico. Por lo que mientras mayor sea la precisión radiométrica, mayor será el número de detalles que podrán captarse en una imagen (Rivas, 2014).

#### **2.7.4. Sensores remotos**

Los avances de las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) así como el desarrollo de nuevos satélites permite realizar hoy en día la observación y monitoreo de los recursos suelo, agua, vegetación a diferentes escalas (Giri, 2016). Los sensores remotos son sistemas o instrumentos que permiten captar la información de un objeto a distancia, entre los más conocidos se encuentra el satélite, desde el primer lanzamiento del satélite realizado por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) de Satélite de Tecnología de Recursos Terrestres (ERTS) por sus siglas en inglés, conocido en la actualidad como Landsat, es un sistema de información que presenta un potencial en la fuente de datos, una herramienta dentro del análisis, investigación de medios ambientales, de mediana resolución y libre acceso (Perea-Ardila et al., 2019).

##### **2.7.4.1. Tipos de sensores**

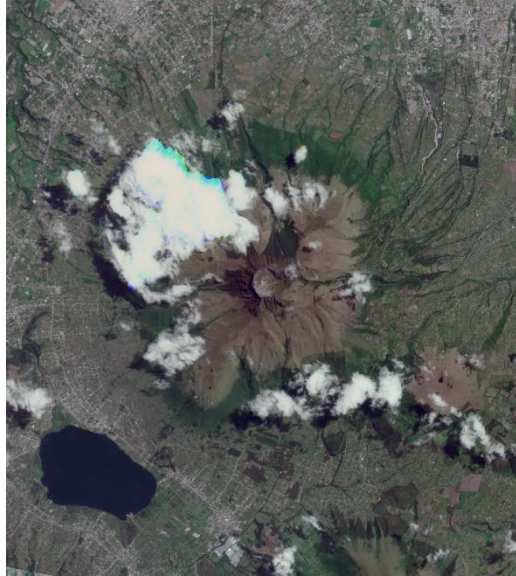
Según Abac (2015) los sensores tienen diversas aplicaciones y operaciones, debido a ello estos se clasifican de acuerdo con su modo de operación:

- Por su funcionamiento
- Por el tipo de señal eléctrica que maneja
- Por el tipo rango de valores que suministra
- Por el tipo de variable física que mide

Para la siguiente investigación se analizaron los sensores por su funcionamiento siendo así que: los sensores activos son muy utilizados dentro de la automatización, seguridad, automovilismo y ciencias médicas, este sensor posee una fuente propia de energía y no depende de una fuente externa para irradiar la superficie de la Tierra, el sensor emite un flujo de radiación en determinada faja espectral que interactúa con la superficie y la parte que refleja es captada por el sensor. Ejemplo: LiDAR, Sonar, Radar (Abac, 2015; Pérez, 2007).

Los sensores pasivos son los más utilizados para realizar evaluaciones de los recursos naturales, estos sensores no requieren de un transmisor, es decir, esta toma directamente una señal eléctrica del medio en respuesta a un estímulo externo, que se requiere para el funcionamiento adecuado (Abac, 2015). Detectan y miden la radiación electromagnética emitida por la superficie que proviene de una fuente externa. Ejemplos: SENTINEL, Landsat, Radiómetro Especial Avanzado de Emisión y Reflexión Térmica (ASTER), Espectro radiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS), *Satélite PlanetScope* (Pérez, 2007).

- **Satélite *PlanetScope* (PS).** La constelación de satélites PlanetScope consta con más de 180 satélites llamados Dove, la información recopilada por *Planet* de constelaciones de imágenes de la Tierra, es procesada en una variedad de formatos con el fin de ser usados a diferentes casos de uso tales como: cartografiar, respuesta a desastres, agricultura de precisión, análisis de imágenes temporales para crear datos de información enriquecida, además que es considerada una excelente fuente para el monitoreo de vegetación pues complementa los datos de Sentinel-2 con mejor resolución espacial y cobertura temporal (PlanetScope, 2022).



**Figura 3.** Volcán Imbabura

**Fuente:** Imagen del Satélite PlanetScope (2022)

El satélite se diseñó con el objetivo de capturar un Tails continuo de imágenes de un solo fotograma llamadas escenas, las cuales se pueden adquirir con una composición de bandas RGB (rojo, verde, azul) o un fotograma dividido con una mitad RGB y una mitad NIR (infrarrojo cercano) dependiendo de la capacidad que tenga el satélite. La constelación se encuentra constantemente encendida sin requerimiento a una planificación de adquisición, los datos que se proporciona son una excelente fuente para monitoreo de vegetación, complementa los datos e Sentinel-2 con una mejor resolución espacial y cobertura temporal se considera importante frente a áreas nubladas (PlanetScope, 2022).

#### **a) Características del sensor**

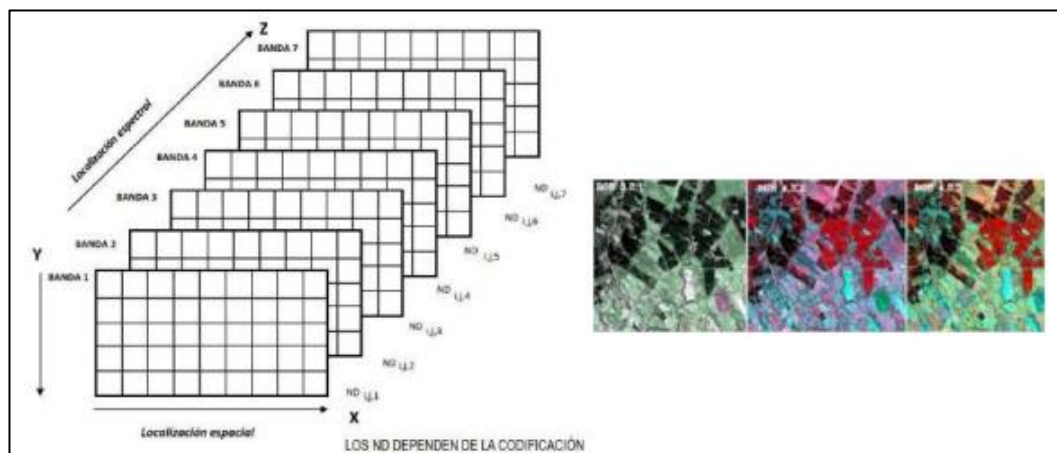
Constelación con más de 180 satélites lanzados en grupos que mejora constantemente las características de la misión, cada satélite es un factor de forma CubeSat hecho de tres unidades cubicas 3 U por lo tanto llega a medir solo (10 cm x 10 cm x 30 cm), la constelación presenta una capacidad de recolección diaria de 150 millones de km<sup>2</sup>/día. El producto *PlanetScope Analytic Ortho Tile* es ocorrectificado, imágenes multiespectrales calibrados que permiten derivar productos de información para la ciencia y el análisis de datos, diseñado para una variedad de usos que requieran imágenes con una geolocalización precisa y

proyección cartográfica, elimina distorsiones causadas por el terreno y se puede utilizar para muchas aplicaciones analíticas y de ciencia de datos (Planet, 2016).

PlanetScope cuenta con mosaicos de reflectancia de superficie y tiene una resolución espacial de 4.77 m por píxel; la resolución espectral tiene 4 bandas (rojo, verde, azul e infrarrojo cercano); su resolución temporal tiene archivos semestrales (desde diciembre del 2015 a agosto del 2020) y archivos mensuales (desde septiembre del 2020 en adelante) y una resolución radiométrica de 16 bits (Norway's International Climate and Forests Initiative [NICFI], 2022).

### 2.7.5. *Imágenes multiespectrales*

Son un arreglo de columnas y filas que conforman una matriz de datos niveles digitales, los cuales representan la intensidad de la energía electromagnética reflejada por los objetos en la superficie terrestre, es aquella que captura los datos de la imagen dentro de un rango de longitud de onda específica realizada a través del espectro electromagnético (Sánchez y Arguijo, 2018). Las longitudes de onda pueden estar separadas por filtro o por el uso de instrumentos sensibles a longitudes de onda particulares, la imagen multiespectral divide la luz captada en bandas espectrales, generalmente se dividen de 3 a 15 bandas por cada imagen (Kanaan y Ventura, 2018).



**Figura 4.** Estructura de una imagen multiespectral

**Fuente:** Bravo-Morales (2017).

### ***2.7.6. Índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI)***

El índice diferencial de vegetación normalizados (NDVI por sus siglas en inglés) es el cálculo del parámetro de vegetación a partir de valores de reflectancia mediante el uso de las longitudes de onda del rojo e infrarrojo. El NDVI muestra la cubierta vegetal que se encuentra en buen estado, mediante la banda del rojo que tiene una longitud de onda entre 0.6 y 0.7  $\mu\text{m}$ , la misma que es absorbida generalmente por las hojas, y el infrarrojo cercano con longitud de onda entre 0.7 y 1.1  $\mu\text{m}$ , la cual en su mayoría es reflejada (Rodríguez y Gutiérrez, 2017). Los valores varían entre  $-1$  y  $1$ , donde los valores negativos corresponden a una superficie sin vegetación y valores cercanos a  $1$  indican una vegetación densa (Sánchez y Arguijo, 2018).

Estruch (2010) en su estudio denominado “Análisis de la clorofila “a” en el agua a partir de una imagen multiespectral Quickbird en la zona costera de Gandia”, en el que se aplicó regresiones simples y múltiples, relacionando los valores de clorofila “a” y los valores de reflectancia. Se seleccionó la ecuación con un coeficiente de regresión de 0.68, las variables utilizadas fueron creadas a partir de la banda 1 que aporta información en relación con el agua y la banda 4 contiene información de la cantidad de biomasa. A partir de estas ecuaciones se generó un mapa temático, en el que se muestra los problemas ambientales, como la alta concentración de clorofila “a” en la zona portuaria y el efecto submarino.

## **2.8. Revisión literaria de estudios de calidad de agua a través de Teledetección**

Alrededor de varios países se ha venido desarrollando la implementación de nuevas tecnologías para conocer el estado o calidad de los ecosistemas y sus recursos, tal es así que dentro de calidad de agua se hace uso de la Teledetección como una nueva herramienta para conocer el estado en el que se encuentra los ecosistemas lacustres. Los estudios permiten comprender y dimensionar la aplicación de Teledetección en calidad de agua siendo así;

En un estudio realizado en Arequipa - Perú, se propuso estudiar la variabilidad y comportamiento que presenta la clorofila “a” mediante el uso de imágenes satelitales de Sentinel 2A en la represa de Aguada Blanca, además del uso de técnicas estadísticas para la generación de algoritmos representantes para los meses de estudio (Bellido, 2019).

Estudio que manifestó el comportamiento espacio-temporal del embalse, ubicación de fuente de mayores concentraciones en el cual se generaron algoritmos para cada mes de estudio en el que se mostró la distribución de la clorofila “a”. Los algoritmos mostraron que la variable independiente (clorofila “a”) presentaba una mayor concentración con relación a las b en bandas 2, 3 y 4 del sensor Sentinel 2A. Así mismo que las concentraciones de clorofila “a” mostraron variabilidad espacial en el embalse. Además, se presenta como referencia de la aplicación de imágenes satelitales como complemento del monitoreo de calidad de agua (Bellido, 2019).

El avance de nuevas tecnologías facilita este tipo de estudios por la disponibilidad de información, costos menores a los convencionales, además ofrecen una solución a los obstáculos de monitoreo *in-situ*. Briceño et al., (2018) estudió la distribución espacial y dinámica de los parámetros de calidad de agua del Lago Vichuquen en dos temporadas del año 2016 usando imágenes del satélite del sensor OLI de Landsat 8 en conjunto con datos *in-situ*.

Dicho estudio recalca que los niveles de eutrofización se ven influenciado en primer lugar por la estacionalidad dado que categorizó en estado eutrófico en verano y mesotrófico en otoño debido a los promedios que presento la clorofila “a”, seguido de los distintos usos de suelo que aceleran pues se los caracteriza como influyentes en la eutrofización de las aguas, por otra parte, también se menciona las actividades agrícolas y las áreas urbanas adyacentes al lago (Briceño et al., 2018).

La extracción de las mediciones de calidad de agua de las imágenes satelitales permite la rápida identificación de agua deterioradas, información usada como apoyo para la evaluación y monitoreo espacio temporal de ecosistemas, el objetivo

del estudio “Estimación de parámetros de calidad de agua en la Laguna Santa Elena usando imágenes satelitales” se basa en evaluar modelos preexistentes y desarrollar modelos empíricos utilizando los sensores de Landsat 8 OLI y Sentinel 2 (Rivera, 2020).

Dentro del estudio de Rivera (2020) se generó modelos para la estimación de clorofila “a” turbiedad y transparencia, de los cuales los modelos con mejores correlaciones fueron utilizados para generar series espacio temporales de la laguna Santa Elena logrando identificar claramente un estado eutrófico y creando una necesidad de generar un plan de manejo con el fin de evitar un deterioro del ecosistema.

## **2.9. Marco legal**

Esta investigación se fundamentó en el Marco legal de la República, dentro de las leyes del Ecuador, en la Constitución, en el título II, se presentan los artículos relacionados con la naturaleza entre ellos el Art. 14 y Art. 15 en el que se reconoce que preservar el ambiente y conservar los ecosistemas es de interés público, además que el estado promoverá el uso de tecnologías alternativas que sean amigables con el ambiente. En el Art 313, Art 318 se habla sobre los sectores estratégicos los cuales deberán estar administrados, regulados y gestionados de acuerdo con los principios de sostenibilidad. Además, que el aprovechamiento de estos recursos naturales o servicios públicos será manejado bajo empresas públicas que cuentan con altos parámetros de calidad ambiental.

El agua es parte de los sectores estratégicos que son de uso público y que constituye un elemento vital para la naturaleza. El Estado se encarga del funcionamiento y gestión de la prestación del agua en servicios públicos, que garantiza el caudal ecológico (Constitución de la República del Ecuador, 2008). El Convenio sobre la Diversidad Biológica (1992) aborda todos los aspectos de los recursos biológicos, recursos genéticos, especies y ecosistemas cuyo objetivo es la



conservación, el uso sostenible y la participación justa en beneficio del recurso, el objetivo es promover medidas que conlleven a un futuro sostenible.

En el Código Orgánico de Organización Territorial Autonomía y Descentralizado (2010), se menciona dentro del capítulo II Art. 54 que los GAD'S son los encargados en regular, prevenir, y controlar la contaminación que se presente dentro del cantón, así como también es responsable de la gestión de cuencas hidrográficas reflejado en el Art. 132 capítulo IV. En el Art. 136 se menta que los GAD'S obtendrán recursos destinados a la conservación de cuencas hidrográficas a fin de recuperar las fuentes.

El estudio se rige en parte al Reglamento de Código Orgánico del Ambiente (2019), puesto busca regular los derechos, deberes y garantías ambientales que se presentan en la Constitución, dentro del Título II Sistema Único de Manejo Ambiental, Capítulo V Calidad de los componentes abióticos y estado de los componentes bióticos Art. 190, Art. 191 hace referencia a la calidad ambiental para el funcionamiento de los ecosistemas, las actividades que causen riesgos o impacto al ambiente deberán velar por la conservación de los ecosistemas y de sus componentes bióticos y abióticos, por otra parte, en el Art. 5 se comenta acerca de la conservación, preservación del recurso hídrico, además en el libro segundo del Patrimonio Natural en el Art. 30 se presenta un enfoque integral y sistemático para la conservación y el uso sostenible de cuencas hidrográficas, además el Gobiernos Autónomo Descentralizado competente realizara un seguimiento a la calidad de cuerpos hídricos mencionado en el Art. 191.

La Ley Orgánica de Recursos Hídricos Usos y Aprovechamiento del Agua (2014), en su Art. 1 y 3 hace referencia a que el recurso Hídrico es imprescindible para la vida, elemento vital de la naturaleza y fundamental para asegurar la soberanía alimentaria, el objeto de la ley es garantizar el derecho al agua, regular y controlar la autorización, gestión conservación, preservación, y restauración del recurso hídrico. Dentro del Reglamento Ley de Recursos Hídricos Uso y Aprovechamiento de Agua (2015) se establece en los Art. 54, Art. 55, Art. 61 que

la Autoridad Única emitirá criterios técnicos de protección y delimitación de uso público para las aguas superficiales.

Las características físicas, químicas y biológicas deben satisfacer el bienestar de la población y equilibrio ecológico y su evaluación es mediante muestreos y monitoreos lo que es mencionado en el Acuerdo Ministerial 061, capítulo VIII sección III, Art. 209. El Plan de creación de oportunidades (2021-2025), refleja en su cuarto eje Transición ecológica, objetivo 13 “Promover la gestión integral de los recursos hídricos”

Es importante citar que dentro del presente estudio se tuvo en cuenta el Anexo 1 del Libro IV del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes del Recurso Agua, debido a que da a conocer los límites máximos permisibles de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, debido a que la normativa determina los principios básicos para el control de la contaminación del agua, así como también los criterios de calidad en sus diferentes usos. Debido a ello se analizó la Tabla 3 para la Preservación de la Vida Acuática y Silvestre en aguas dulces frías o cálidas y la Tabla 8 de la Calidad para fines recreativos mediante contacto secundario.

## Capítulo III

### Metodología

#### 3.1. Descripción del área de estudio

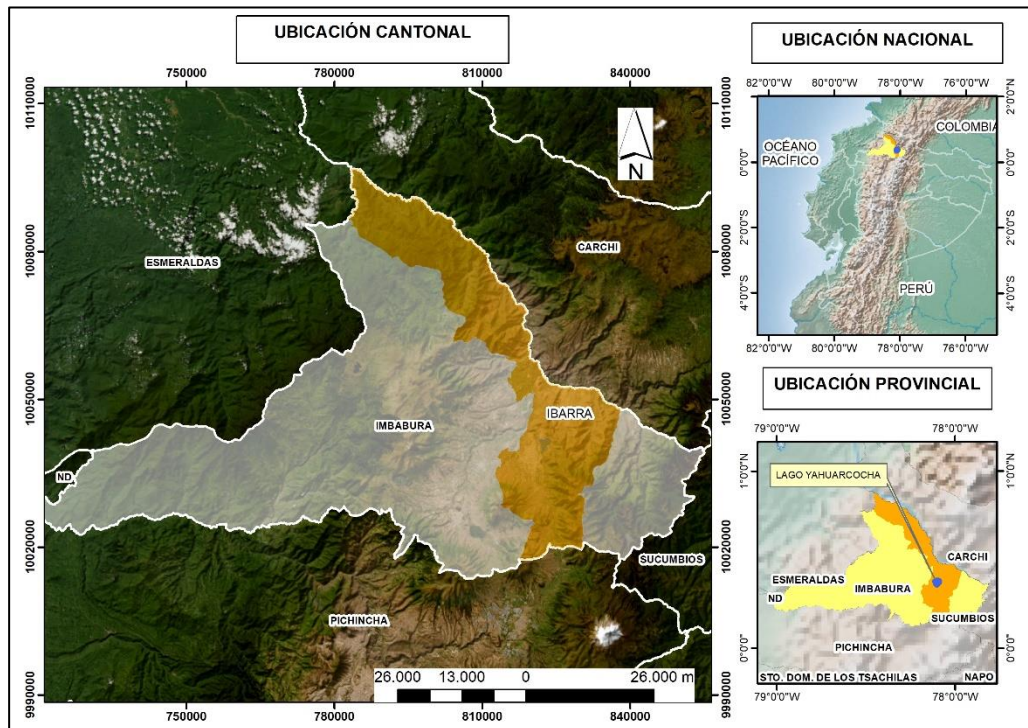
El estudio se realizó en el lago Yahuarcocha ubicado al norte del Ecuador, centro-este de la provincia de Imbabura a 3.5 km al norte de la ciudad de Ibarra (Figura 5). Tiene una altitud de 2200 m.s.n.m y se ubica dentro del cantón Ibarra, parroquia Priorato. El lago ocupa una depresión volcánica de la cordillera andina, siendo el punto hídrico más importante en la cuenca (Lara, 2015), presenta un máximo de profundidad de 6.9 m y profundidad media de 4.9 m. Además, tiene una superficie de 2.41 km<sup>2</sup> y presenta una forma alargada (Jácome et al., 2018). A continuación, se detallan los puntos de ubicación geográfica del Lago Yahuarcocha (Tabla 1).

**Tabla 1 .** Ubicación geográfica del lago Yahuarcocha WGS 1984UTM, Zona 17 Sur

Punto	Coordenadas	
	X	Y
Norte	823186	10042107
Sur	822644	10039657
Este	823947	10041592
Oeste	821622	10041583

La provincia de Imbabura cuenta con 11 complejos volcánicos siendo una de las provincias con mayor diversidad geológica, estos volcanes brindan una gran belleza paisajísticas, unos se encuentran extintos o dormidos, tal como Cubilche, el cual es considerado de bajo riesgo y otros que se encuentran potencialmente activo como el volcán Imbabura (Jácome et al., 2020). Yahuarcocha es un lago originado en el pleistoceno ocasionado por un proceso de glaciación, su aumento es de forma natural del escurrimiento de las precipitaciones, las principales fuentes de entrada de agua al lago son las quebradas Manzano Huayco y Chiquita, Santo Domingo, Polo Golo y San Antonio (Patiño, 2020) con un régimen hídrico intermitente

secándose durante la época de estiaje entre los meses de julio a septiembre (Lara, 2015).



**Figura 5.** Ubicación geográfica del lago Yahuarcocha

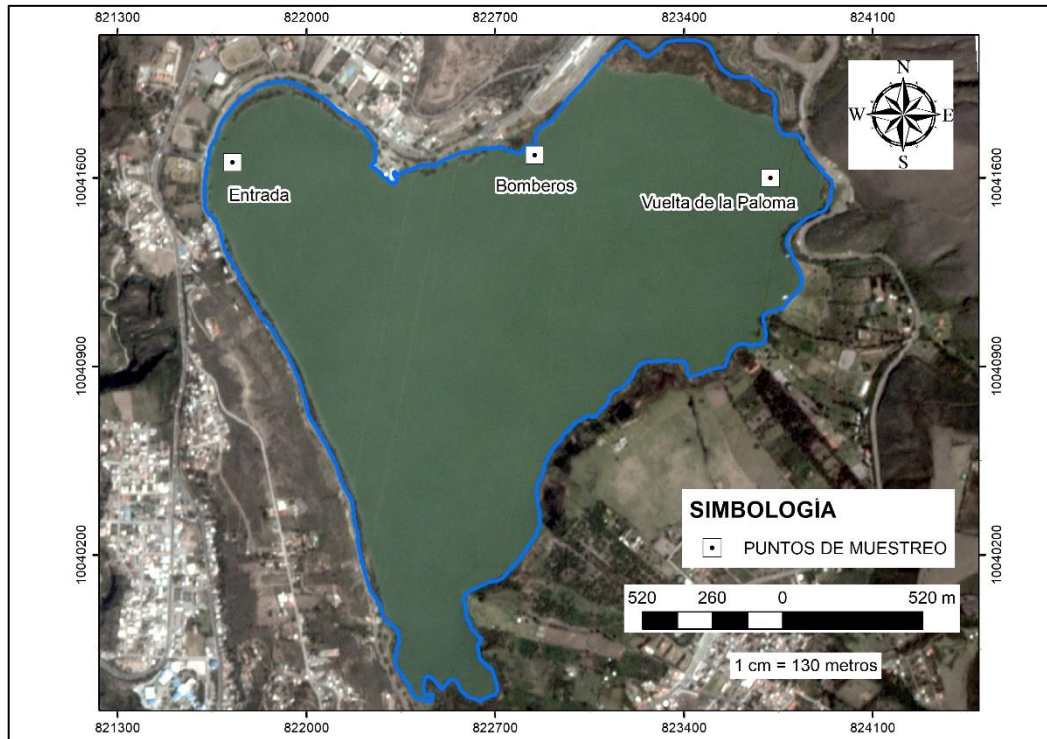
En el área de estudio la actividad económica está ligada primordialmente a la producción agrícola y agropecuaria ocupando la mayor parte de superficie de la microcuenca (Jácome, 2015) las actividades antrópicas que se desarrollan son: el comercio, recreación, hospedaje y actividades acuáticas, mismas que permiten un movimiento económico dentro de la zona. En los últimos años, la gran demanda de producción de servicios y bienes ha ido aumentando la presión antrópica, lo que explica la pérdida y fragmentación del ecosistema. El lago se encuentra en estado de eutrofización con una tendencia a hipertrófico, consecuencia de las distintas fuentes de contaminación del lago, Oquendo (2016) menciona que la agricultura es una de las principales fuentes de contaminación de los ecosistemas acuáticos debido al incrementos de nutrientes, la mayoría de las descargas son transportadas y depositados por medio de escorrentía hasta el cuerpo de agua (Terneus, 2017).

## 3.2. Métodos

### 3.2.1. *Análisis multitemporal de la información de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos con información actual*

Para cumplir con este objetivo se realizó la búsqueda de información de distintos estudios realizados en el Lago Yahuarcocha de los últimos 5 años, sobre el análisis de parámetros fisicoquímicos y biológicos, parte de la información se solicitó al laboratorio de Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ibarra (EMAPA-I), acerca de los parámetros de pH, conductividad, clorofila, turbidez, sólidos totales y oxígeno disuelto, temperatura, los años a analizar dependió de los datos proporcionado por el laboratorio.

Para la obtención de información del estado actual de la calidad de agua del Lago Yahuarcocha, se realizó la toma de 30 muestras durante los meses de agosto a diciembre del 2021. Fue necesario la recolección de muestras de agua del lago, en la cual se estableció puntos de muestreo aleatorio (Figura 6) dado el estado homogéneo en la composición de agua y profundidad del lago condición mencionada por Patiño (2020) en un muestreo realizado en conjunto con el grupo VLIR-UOS y la Universidad Técnica del Norte, de manera que se estableció 3 puntos de muestreo. Identificados como; 1) cercanías del Cuerpo de Bomberos de Yahuarcocha, 2) Vuelta de la Paloma, y 3) la zona de anidamiento de las aves, puntos seleccionados según estudios previamente realizados dentro del área tales como (Chamba y Guallasamín, 2015; Patiño, 2020).



**Figura 6.** Puntos de muestreo del Lago Yahuarcocha

Para el análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos se recolectó 2500 ml de agua en cada punto de muestreo, que posteriormente fueron enviados al Laboratorio de EMAPA-I para la obtención de información actual de los parámetros fisicoquímicos del lago, adicionalmente se recolectó 250 ml de agua para el análisis de oxígeno disuelto el cual fue enviado al Laboratorio de Agua, Suelos y Alimentos (Lasa). Finalmente, para la cuantificación de la clorofila “a” se tomó 1000 ml de agua para la extracción de pigmento en los Laboratorios de Investigaciones Ambientales (LABINAM) de la FICAYA de la Universidad Técnica del Norte (Figura 7).



**Figura 7.** Recolección de muestras agua del lago Yahuarcocha

El análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de calidad de agua del lago se realizó en dos fases:

#### **3.2.1.1. Primera fase**

Posteriormente a la recolección de muestras se envió un total de 15 muestras correspondiente a los 5 meses de estudio al laboratorio de EMAPA-I, para el análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos: turbidez, conductividad eléctrica, sólidos totales, DBO<sub>5</sub>, pH, coliformes totales y al Laboratorio de Agua Suelos y Alimentos (LASA) se envió 5 muestras para análisis de oxígeno disuelto. Las muestras fueron recolectadas en cantidad de 1 litro para el análisis de parámetros fisicoquímicos y 250 ml para el análisis microbiológico. Cada muestra fue recolectada en botellas de ámbar oscuras esterilizadas y selladas para la conservación de la muestra y cadena custodia.

#### **3.2.1.2. Segunda fase**

En esta etapa tras el muestreo se realizó la extracción y cuantificación de la clorofila “a”, se obtuvo los datos en unidades de fluorescencia, para posteriormente realizar el cálculo mediante la aplicación de una ecuación.

a) Medición de pigmentos (clorofila “a”)

Las muestras que fueron colectadas para la extracción y análisis de clorofila “a” se transportaron a LABINAM, donde se procedió a realizar de forma inmediata la extracción del pigmento y análisis de la clorofila “a” extraída, la medición de pigmento de clorofila por fluorescencia molecular se realizó según la metodología aplicada por Vitta et al. (2009), como se detalla a continuación:

En el laboratorio se filtró las muestras recolectadas en una red Nylal de 64  $\mu\text{m}$  evitando que pasen las impurezas, restos sólidos, rocas, dado que una mala muestra puede generar un sesgo en los datos. Posteriormente se realizó una filtración, donde se extrajo con una jeringuilla 50 ml de la muestra para filtrar la clorofila del agua y que esta se adhiera al filtro marca Whatman de 25 mm de diámetro verificando simultáneamente que la clorofila se encuentre adherido adecuadamente para la extracción y medición (Figura 8).



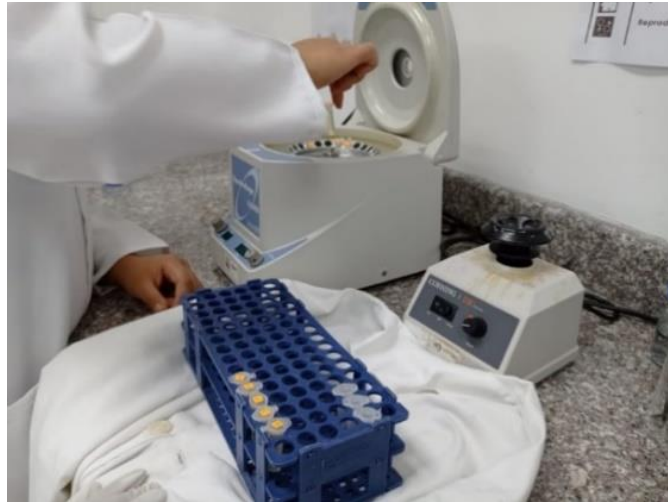
**Figura 8.** Filtración de las muestras y extracción de pigmentos de clorofila

*Nota.* La imagen (a) hace referencia a la filtración de 50 ml de muestra de agua del lago, en cuanto a la (b) muestra los pigmentos de clorofila como resultado de la filtración de un volumen determinado de agua en un Filtro Whattman.

Más adelante se procedió a doblar los filtros por la mitad y secar, para después recortar pequeños fragmentos y depositarlos en tubos de ensayo correspondientemente etiquetados con 10 ml de etanol al 99.8% y mezclarlo



ligeramente con movimientos circulares, luego se pasó a una refrigeración de 24 horas. Pasado este tiempo se vertió 2 ml de la solución generada en tubos *ependorf* de 1.5 ml para su ubicación en una gradilla, procurando proteger las muestras de la exposición a la luz solar, posteriormente fueron llevadas a una centrifugadora a las que se le expuso a una centrifugación de 3000 rpm durante 30 minutos (Figura 9).



**Figura 9.** Centrifugación de muestras filtradas en tubos ependorf

La solución centrifugada se cuantificó con el fluorímetro programado en el canal B para medir en unidades de fluorescencia (RTU), dichos datos fueron determinados tres veces para cada una de las muestras, con la finalidad de evitar errores como se menciona en otros estudios (Patiño, 2020; Van-Colen et al., 2017), posteriormente los datos registrados fueron transformados a microgramos sobre litro ( $\mu\text{g/l}$ ) mediante la siguiente ecuación (1):

$$\text{Chl } a \left( \frac{\mu\text{g}}{\text{l}} \right) = \frac{1,1526 * (\text{VFL}) * \left( \frac{\text{V1}}{\text{V2}} \right)}{2.45} \quad (1)$$

Donde:

Chl “a”: Clorofila extraída en ( $\mu\text{g/l}$ )

VFL: Valor fluorimétrico

V1: Volumen de metanol

V2: Volumen de filtrado

### **3.2.2. Estimación de la concentración de clorofila “a” en el lago mediante la aplicación de las bandas del sensor remoto *Dove Classics* del satélite *PlanetScope***

Para la determinación de la clorofila “a” mediante sensores remotos se adquirió 10 imágenes satelitales del sensor *PlanetScope*, las cuales se adquirieron en la página web de la Agencia Espacial Europea (<https://www.planet.com>), cubriendo un área aproximada de 5 km<sup>2</sup> por lo que se usó 1 imagen por cada mes de estudio, con una resolución de 3 metros por píxel. Los archivos fueron descargados en formato GEOTIFF. Para el procesamiento de las imágenes satelitales se usó el software ArcGIS 10.8, en el que se realizó un procesamiento de nivel 1, las mismas que fueron geográficamente referenciadas con el Datum WGS84 en el sistema de proyección UTM en la zona 17 Sur.

#### **3.2.2.1. Obtención del índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI)**

Se realizó el cálculo del NDVI mediante el uso de imágenes satelitales *PlanetScope*, de los meses de agosto al mes de diciembre de los años 2017 y 2021. Para realizar el cálculo se utilizó la herramienta *Raster Calculator*. Los valores de NDVI se calcularon mediante la siguiente ecuación (2) para cada una de las imágenes.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (2)$$

Donde:

NDVI= Índice diferencial de vegetación normalizada

NIR= Infrarrojo cercano

R= Rojo

Las bandas utilizadas para las imágenes de *PlanetScope* fueron la banda 4 (NIR) y la banda 3 (R). Los resultados obtenidos al aplicar el índice NDVI, fueron clasificados con los valores propuestos por Merg et al., (2011) estos valores se detallan en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Clasificación de los valores de NDVI

Rangos	Descripción
< 0.2	Nubes y agua (NA)
0.2 – 0.25	Suelo sin vegetación (SV)
0.25 – 0.50	Vegetación ligera (VL)
0.5– 0.75	Vegetación media (VM)
> 0.75	Vegetación alta (VA)

**Fuente:** Merg et al. (2011)

### **3.2.3. Análisis de la relación de datos obtenidos con métodos convencionales y sensores remotos**

Se realizó un modelo de correlación (regresión simple), en el cual se relacionó los valores de la clorofila “a” con la información satelital extraída. Se analizó los datos para determinar si corresponden a valores paramétricos o no paramétricos, mediante el software IBM SPSS Statistics 21 para el análisis de distribución normal y homogeneidad de la varianza (Bautista-Díaz et al., 2020). y de acuerdo con los resultados se aplicó la correlación de Pearson o Spearman. Para realizar este proceso no se tomaron en cuenta las bandas que corresponden a aerosoles y vapor de agua.

Posteriormente se relacionó los valores extraídos de cada banda de cada mes con las concentraciones de clorofila “a” que fueron tomadas *in-situ*. Se utilizó los valores extraídos y las variables dependientes de la clorofila “a”, para generar una ecuación por puntos de muestreo y cuantificar los parámetros de calidad del agua en lagos mediante el uso de la reflectancia de imágenes multiespectrales satelitales (Bellido, 2019).

#### **3.2.3.1. Generación de imágenes de distribución espacio temporal de clorofila “a”**

Una vez aplicado el modelo de regresión simple, se seleccionó la ecuación con el  $R^2$  elevado. En el software ArcGIS 10.8 se procedió a validar la ecuación mediante la herramienta *Raster Calculator*, en la que se ingresó los valores obtenidos en la ecuación junto con el ráster de cada uno de los meses. Esta

herramienta permitió realizar las sumas de los ráster seleccionados para cada uno de los meses de muestreo (Bellido, 2019). Luego se procedió a la generación de los resultados de las imágenes con la distribución espacio temporal de la clorofila “a” para los años 2017 y 2021 y en la cual se clasificó los valores de acuerdo con los rangos del estado trófico propuesto por la OCDE.

### 3.2.3.2. Evaluación de la calidad del agua

Para la evaluación del estado trófico del agua, se usó la clasificación del grado de eutrofia para lagos y embalses propuesta por el Comité de eutrofización de la Organización Para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) en 1982 (como se citó en López y Madroñero, 2015). Esta clasificación facilita un esquema de distintas categorías en el que se analiza los nutrientes (fósforo), la cantidad de biomasa (clorofila “a”) y la transparencia en la columna vertical del agua.

Esta clasificación presenta una medida de eutrofia de la clorofila “a”. Para el análisis se tomó en cuenta la clorofila “a” obtenida *in-situ* y mediante imágenes satelitales y se determinó el estado trófico mediante el índice la clasificación con valores propuestos para cada rango. A continuación, se presenta los rangos para el índice del estado trófico (Tabla 3).

**Tabla 3.** Criterios de aplicación del Índice OCDE

Categoría trófica	Clorofila "a" ( $\mu\text{g/L}$ )
Ultra oligotrófico	< 2.5
Oligotrófico	2.5 – 8
Mesotrófico	8 – 25
Eutrófico	25– 75
Hipertrófico	>75

### 3.2.3.4 Índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO)

Se expresa en diferentes variables fisicoquímicas de las cuales se usa la demanda bioquímica de oxígeno ( $\text{DBO}_5$ ), coliformes totales y porcentaje de saturación del oxígeno, las cuales recogen los efectos de contaminación por materia

orgánica (Ramírez et al., 1997). El ICOMO es el valor promedio de los índices de cada una de las tres variables como se expresa en la ecuación (3).

$$ICOMO = \frac{1}{3} (I_{DBO} + I_{COL. TOT} + I_{OXÍGENO \%}) \quad (3)$$

$I_{DBO}$ : Se obtiene a partir de la expresión:

$$I_{DBO} = -0,05 + 0,70 \text{ Log}_{10} DBO \text{ (g/m}^3\text{)}$$

DBO mayores a 30 g/m<sup>3</sup> tienen  $I_{DBO} = 1$

DBO menores a 2 g/m<sup>3</sup> tienen  $I_{DBO} = 0$

$I_{Col.tot}$ : Se obtiene de la siguiente expresión:

$$I_{COL.TOT} = -1,44 + 0,56 \text{ Log}_{10} COL.TOT \text{ (NMP.100cm}^{-3}\text{)}$$

COL.TOT mayores a 20.000 NMP/100 cm<sup>3</sup> tienen  $I_{COL.TOT} = 1$

COL.TOT menores a 500 NMP/100 cm<sup>3</sup> tienen  $I_{COL.TOT} = 0$

$I_{Oxígeno \%}$ : Se obtiene de la siguiente expresión:

$$I_{Oxígeno \%} = 1 - 0,01 \text{ oxígeno \%}$$

Oxígenos (%) mayores a 100% tienen  $I_{Oxígeno \%} = 0$

De manera general, los porcentajes de saturación mayores a 100%, en los sistemas lóticos, son ventajosos o indicativos de una buena capacidad de re-aireación de los recursos hídricos, mientras que, para los sistemas lénticos, pueden reflejar graves problemas de eutrofización (Ramírez et al., 1997). En la Tabla 4 se presenta los rangos asociados a los valores consignados donde se muestran el rango de la escala de contaminación.

**Tabla 4.** Significancia de los Índices de contaminación

ICO	CONTAMINACIÓN	ESCALA DE COLOR
0 – 0,2	Ninguna	Azul
>0,2 - 0,4	Baja	Verde
>0,4 - 0,6	Media	Amarillo
>0,6 - 0,8	Alta	Naranja
>0,8 – 1	Muy alta	Rojo

Fuente: Ramírez et al. (1997)

### 3.3. Materiales y equipos

Para el proceso de recolección y análisis de muestras, se utilizó los siguientes materiales, equipos y programas de software, mismos que se detallan a continuación (Tabla 5).

**Tabla 5.** Materiales y Equipos

<b>Materiales</b>	<b>Equipos</b>
Libreta de campo	GPS Garmín
Lápices	Bote alquilado
Software ArcGIS 10.8	Cámara
Imágenes satelitales	Computadora
Marcadores	Fluorímetro
Guantes quirúrgicos	Centrífuga
Envases ámbar oscuro	
Red Nylal 64 $\mu$ m	
Jeringuilla	
Filtro Whattman	
Tubos de ensayo	
Tubos eppendorf	
Gradilla	
Etiquetas	

## **Capítulo IV**

### **Resultados y Discusión**

#### **4.1. Análisis multitemporal de la información de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos con información actual**

##### ***4.1.1. Análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos***

La primera fase del estudio se desarrolló con el análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos (Tabla 6), cuya información fue solicitada al laboratorio de EMAPA-I, mismos que comprenden entre los años del 2017 al 2020, a fin de obtener una perspectiva de los antecedentes del estado de calidad de agua del lago con los datos del año 2021 que corresponde al año de muestreo de la presente investigación.

**Tabla 6.** Parámetros fisicoquímicos del lago Yahuarcocha

Año 2017 al 2020										
Meses	Puntos	pH	Temperatura °C	Turbiedad (*) NTU	Conductividad (*) µS/cm	Sólidos Totales mg/l	(DBO <sub>5</sub> ) mg/l	Coliformes totales (*) UFC/100 ml	Oxígeno disuelto %	Chl "a"
30/5/2017	V. Paloma	8.86	21.3	25.5	566	300	Sin dato	380	Sin dato	Sin dato
10/9/2018	Laguna	8.92	Sin dato	41.5	628	358	Sin dato	600	Sin dato	Sin dato
16/1/2020	Entrada	8.82	21.7	Sin dato	Sin dato	510	6	3670	109.8	Sin dato
11/12/2020	Entrada acequia	8.85	23.5	48.9	Sin dato	26.25	8	3670	Sin dato	Sin dato
Año 2021										
Agosto	Bomberos	8.92	22.6	68	567	415	17	228	90.7	75.06
	V. Paloma	9.03	22.6	53	560	420	9	388	98.9	79.47
	Entrada	8.95	22.6	60	566	435	9	114	107	113.38
Septiembre	Bomberos	8.75	24.1	177	589	482.5	45	410	88.3	70.89
	V. Paloma	8.76	24.2	13	579	417.5	10	2090	15.9	150.3
	Entrada	8.73	24.4	82	579	412.5	8	1340	52.5	118.76
Octubre	Bomberos	8.78	22.8	63	576	430	11	170	97.7	62.97
	V. Paloma	8.78	22.8	77	572	516.3	12	400	85.7	63.61
	Entrada	8.78	22.8	63	576	423.8	7	240	85	75.99
Noviembre	Bomberos	8.6	22.1	22	572	410	12	1730	104.8	88.06
	V. Paloma	8.53	22	24	574	425	21	2860	104.3	84.63
	Entrada	8.66	22	24	567	407.5	23	3640	91.5	102.51
Diciembre	Bomberos	8.75	24.2	37	543	382.5	8	5170	40.6	59.78
	V. Paloma	8.86	24.2	37	540	385	8	2220	75.7	86.26
	Entrada	8.85	24.2	39	538	387.5	8	5040	69.6	44.62

*Nota:* La información presentada de los años 2017 al 2020 son datos en bruto proporcionados por el laboratorio de EMAPA-I, los espacios en blanco no se registran por la ausencia de información. Los datos del año 2021 corresponden a los meses de muestreo realizados para la presente investigación. Los ensayos marcados con (\*) están fuera del Sistema de Gestión del Laboratorio bajo la norma NTE-INEN ISO/IEC 17025:2018.



### **a) Potencial hidrógeno (pH)**

Los antecedentes de 2017 a 2020 muestran un promedio de pH de 8,86 lo que representa que es una solución ligeramente alcalina, así como también se refleja en los datos tomados en el año 2021 cuyo promedio de pH es de 8.78, por otra parte, los puntos de muestreo no representan diferencias significativas. Patiño (2020) menciona en su estudio un pH promedio alcalino de 8.64 de similar manera que, en el estudio presente, según Camacho (2017), el pH puede presentar variaciones de manera diurna debido al crecimiento elevado de algunas algas, ya que estas producen CO<sub>2</sub> como resultado de la fotosíntesis. Por lo tanto, el agua se vuelve más alcalina.

En la Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua del Libro VI Anexo 1 con la Tabla 8 del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA), se muestra el máximo permisible de pH en el agua para fines recreativos mediante contacto secundario de 6.5 a 8.5, por lo tanto, en los años muestreados desde 2017 a 2021 se supera este límite máximo permisible, por otra parte la Tabla 3 para la preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces frías o cálidas presenta un rango de 6.5 a 9, los datos actuales no presentan que se supere este límite aunque presenten datos cercanos.

### **b) Temperatura**

La temperatura es un parámetro que tiene influencia en otros factores de la calidad de agua, ya que las variaciones de esta pueden afectar a la solubilidad de sales y en el contenido de OD, así como también en la biodegradación de materia orgánica y de algunos parámetros fisicoquímicos (Gil-Marín et al., 2018). Entre los años del 2017 y 2020 los datos de la temperatura se obtuvo un valor de 21.3 °C y 23.5 °C respectivamente, valores similares a los del estudio de Saelens (2015) con un promedio de 21.4 °C en un periodo de marzo 2014- marzo 2015. En el año 2021 se registró una temperatura promedio de 23.2 °C, teniendo 22 °C como valor

mínimo en el mes de noviembre y 24.4 °C como valor máximo en el mes de septiembre.

Según el estudio realizado por Ochoa (2017), obtuvo una temperatura promedio de 21.7 °C, con un registro mínimo de 19.5 °C. A partir de la información obtenida se determina que la temperatura en el Lago Yahuarcocha varía 1 a 2 °C mensualmente, debido a la posición del país existe poca variación estacional con respecto a la temperatura, pero su altitud elevada ocasiona que la temperatura sea referentemente baja, lo que es característico de los lagos templados y pocos profundos según lo menciona Saelens (2015).

### **c) Conductividad eléctrica**

La variación en la conductividad se ve relacionada a ciertos factores como la pureza química del agua, al tener una menor concentración de electrolitos esta tendrá mayor pureza, por lo tanto, su conductividad será menor. Los datos obtenidos en el 2021, el lago presentó valores en un rango de 538 a 589  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En el estudio de Jácome et al., (2018) indica un valor promedio de 481.8  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para el periodo agosto-septiembre 2013 y julio-agosto 2014 y un valor de 497.9  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para el periodo octubre-diciembre 2013 y enero-junio 2014.

Estos valores son relativamente similares al estudio realizado por Saelens (2015), que tiene una conductividad media durante todo el año de 498  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , pues sus datos fluctuaron entre 443 y 572  $\mu\text{S}/\text{cm}$  valores que se pueden dar por la acumulación de materiales y desechos arrastrados por los efluentes que lo alimentan (Terneus, 2017). Según la calidad de agua en función de la conductividad eléctrica los valores comprendidos entre 430-600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  están comprendidos como contaminadas (Massol, 2010), y entre 500 hasta 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  son aguas fuertemente mineralizadas (Roldan y Ramírez 2008).

#### **d) Sólidos totales**

El análisis de los sólidos es importante en el control de los procesos de tratamiento biológico y físico de aguas residuales para evaluar el cumplimiento de las limitaciones que pueden presentar según el caso de estudio, y el destino de uso. En cuanto a la cantidad de sólido totales analizados, los valores van de un promedio mayor de 456.7 mg/l y mínimo de 385.0 mg/l de materia contenida en el agua, según lo mencionado en el Anexo 1 del Libro IV del TULSMA: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes los límites permisibles con respecto a la descarga de efluentes en un cuerpo de agua dulce es de 1600 mg/l mostrando que los rangos de los valores de sólidos no tienen una variabilidad alta.

#### **e) Demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>)**

El DBO<sub>5</sub> es un indicativo de la cantidad de materia orgánica biodegradable que están presentes en el agua. En un estudio realizado por el Municipio de Ibarra 2020 se identificó un DBO<sub>5</sub> de 145 mg/l y Escobar et al., (2021) registró un dato de 127 mg/l. Así mismo el caso de Rivera (2021) un DBO<sub>5</sub> de 64 mg/l, en la evaluación de los parámetros se concluye que no cumplen con la normativa con respecto al criterio de calidad admisible para la preservación de la vida acuática en aguas dulces, marinas y estatuarios Acuerdo Ministerial N° 67 pues sobrepasa los 40 mg/l de límite máximo permisible. En los datos obtenidos dentro de este estudio para los puntos de muestreo los valores de DBO<sub>5</sub> presenta valores de 7 a 45 mg/l, siendo septiembre el mes con datos que sobrepasa el límite permisible.

#### **f) Coliformes totales**

Dentro de los coliformes totales en el 2021 se observa la variabilidad en base a los meses de muestreo, puesto que existe una marcada diferencia entre agosto con un valor mínimo de 243.3 UFC/100 ml, con el mes de octubre con un valor de 270 UFC/100 ml. Con respecto al mes de noviembre se registró un valor de 2743 UFC/100 ml y finalmente para diciembre con un valor máximo de 4143 UFC/100

ml, teniendo en cuenta la Normativa de TULSMA, Libro VI, ANEXO 1, para la calidad de agua para fines recreativos de contacto secundario, dentro del límite máximo permisible se muestra un valor de 4000 NMP/100 ml. En el estudio realizado por Maridueña et al., (2011) se obtuvo que los coliformes totales variaron entre 700 y 1000 UFC/100 ml. Así mismo se menciona que en el lago hay un aporte de 4000 UFC/100 ml, provenientes del canal del Río Tahuando.

#### **g) Oxígeno disuelto (OD)**

En cuanto al oxígeno disuelto es un parámetro que juega un papel importante como índice de calidad ambiental, además este se obtiene por aireación y como producto de desechos resultado de la fotosíntesis (Gil-Marín et al., 2018). En los datos obtenidos en el año 2020 se registró un valor de 109.8 %. En el mes de septiembre del 2021, en el punto vuelta de la paloma se detalla el valor registrado de OD, con un porcentaje mínimo de 15.9 % para el mes de septiembre. En el estudio realizado por Saelens (2015), se registró un promedio de 76.2 % de oxígeno disuelto medidos entre los meses de marzo 2014 hasta marzo de 2015.

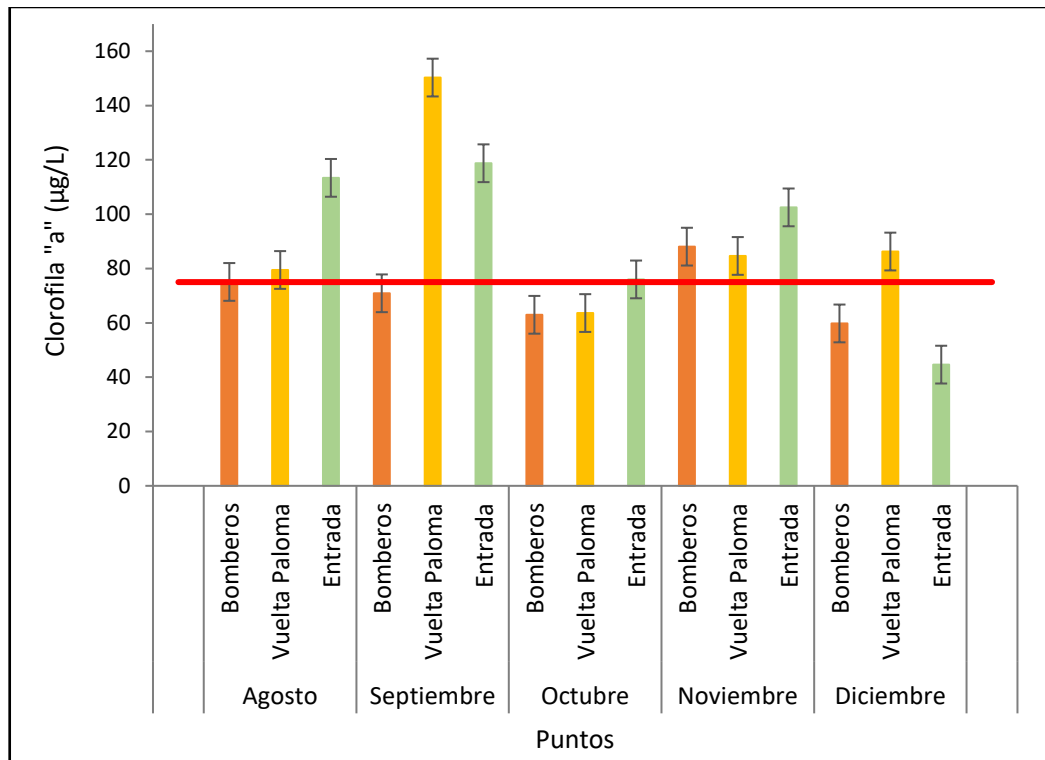
Las variaciones en los niveles de oxígeno disuelto se deben al aumento en la profundidad en la que se toma la muestra (Saelens, 2015). A partir de las medidas para cada punto muestreado se registra una media de 79.76 %. En el Anexo 1 del TULSMA de la Tabla 3 y Tabla 8 nos menciona que el límite máximo permisible no debe ser >80% de concentración siendo los años 2020 y 2021, donde se presenta una mayor concentración superando el límite permisible.

#### ***4.1.2. Análisis del parámetro biológico***

En la segunda fase se cuantificó la concentración de clorofila “a” extraída, para el periodo agosto-diciembre del 2021. Los datos obtenidos en la presente investigación se detallan en la Tabla 7:

### a) Clorofila "a"

En la Figura 10, se presenta la concentración de clorofila "a", donde el mes de septiembre muestra un incremento de la productividad del lago, teniendo así una concentración de 150.3  $\mu\text{g/L}$ , correspondiente al punto de la vuelta de la paloma, mientras que en el mes de diciembre en el punto de la entrada se obtuvo una concentración de 44.62  $\mu\text{g/L}$ . Esta variable tuvo diferenciaciones durante el tiempo de muestreo, teniendo en cuenta que la clorofila depende de la cantidad de nutrientes presente, concentración de la luz y la temperatura del agua.



**Figura 10.** Concentraciones mensuales de Clorofila "a" del lago Yahuarcocha

*Nota:* La imagen muestra los datos la clorofila "a", de los 5 meses de muestreo de cada punto muestreo del del Lago Yahuarcocha del 2021, los valores mayores a 75  $\mu\text{g/L}$  se encuentran en estado eutrófico.

En el estudio realizado por Van-Colen et al., (2017) determinaron que entre julio del 2014 y marzo del 2015 las concentraciones de clorofila "a" llegaron hasta un máximo de 185  $\mu\text{g/L}$ , este incremento se debe a que hubo una floración de la cianobacteria *Cylindrospermopsis*. Así mismo, determinaron que las concentraciones de clorofila "a" variaron entre 30 y 100  $\mu\text{g/L}$ .

De acuerdo con la clasificación del índice de estado trófico propuesto por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), los valores que presentan una concentración de clorofila entre 25 a 75  $\mu\text{g/L}$  se encuentran en estado eutrófico y valores mayores corresponden a estado hipereutrófico. De los cinco meses de muestreo, octubre y diciembre se presentan una media de entre 63.5 y 67.5  $\mu\text{g/L}$  y los meses de agosto, septiembre y noviembre presentan una media de 89.3; 113.3 y 91.7  $\mu\text{g/L}$  respectivamente. Teniendo en cuenta la Normativa Francesa norma NFT 90 -117 se indica un valor umbral de 10  $\mu\text{g/L}$  para aguas recreativas, los datos obtenidos superan este límite.

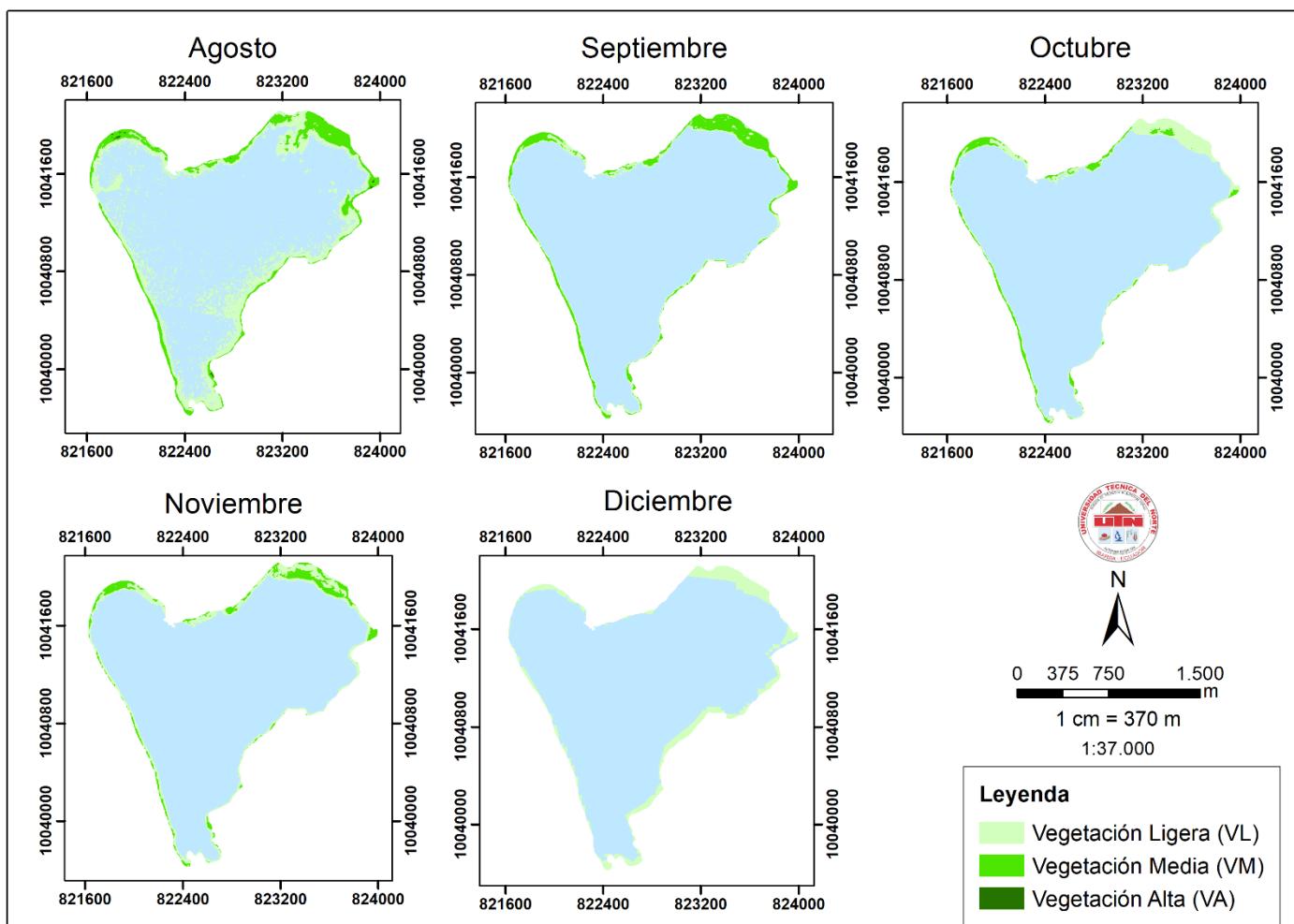
Los datos de clorofila “a” del presente estudio (Tabla 6), el cual refleja datos en un rango de 0.94 - 0.09 RFU, el mes de agosto presenta un valor sumamente alto, mientras que los meses de septiembre octubre y diciembre reflejan una productividad similar. Astudillo (2018), menciona en su estudio que los niveles de productividad del lago reflejan características de eutrofización, productividad evidenciada en la medición de clorofila “a” in vivo, misma que permite determinar la biomasa del lago. La alta productividad de biomasa algal justifica el estado de eutrofización, en el mes julio y octubre del 2016 se obtuvo 0.1952 y 0.1945 RFU y el promedio de productividad en el periodo de investigación de 0,132 RFU, algunos autores como Caicedo (2015) y Ochoa (2017) que se debe a la alta cantidad de fitoplancton producto de las actividades antrópicas que se desarrollan alrededor del lago.

#### **4.2. Estimación de la concentración de clorofila “a” en el lago mediante la aplicación de las bandas del sensor remoto *Dove Classics* del satélite PlanetScope**

Los valores calculados del NDVI para cada píxel permitió agrupar zonas con distintos valores de NDVI de acuerdo con los rangos establecidos por la OCDE, para la representación de los mapas, no se tomaron en cuenta los pixeles que corresponden a nubes y agua y suelo sin vegetación. Además, se definió las superficies con cada tipo de vegetación y su área total en relación con la superficie

total del lago Yahuarcocha para cada uno de los años. El cálculo del NDVI muestra los cambios en las condiciones ambientales entre los meses, exponen el grado de alteración en la cobertura vegetal dentro del lago, así como también el aumento o disminución de nutrientes ocasionan un cambio en la población de algas.

Para el año 2017 (Figura 11), en el mes de agosto se muestra que hay mayor presencia vegetación ligera con un área de 56.4 ha, a diferencia del mes de septiembre que tiene un área de 11.6 ha. En cuanto a la vegetación media y alta, en el mes de agosto se obtuvo un máximo de 21 y 0.2 ha respectivamente. En el año 2021 (Figura 12), se puede observar que para los meses de octubre y diciembre el área de vegetación ligera es de 13.8 y 24.8 ha correspondientemente. Para la vegetación media en el mes de agosto el área máxima fue de 22.7 ha y un mínimo para el mes de octubre con 9.7 ha. Finalmente, en el mes de agosto y octubre, la vegetación alta vario entre 0.7 y 16.4 ha, de las 286.5 ha que corresponden al lago.



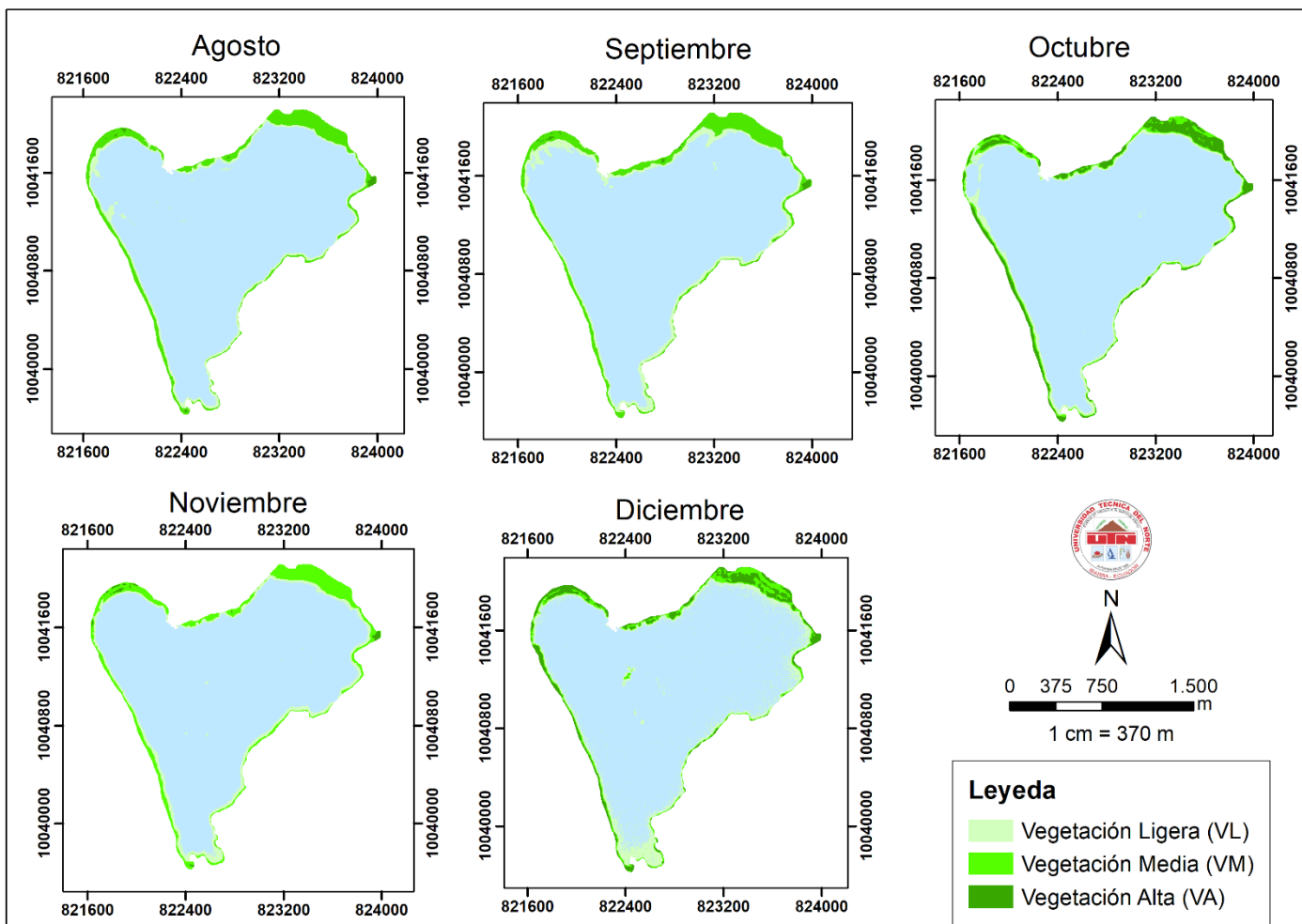
**Figura 11.** Índice diferencial de vegetación normalizados (NDVI) reclasificado del lago Yahuarcocha del año 2017



En las franjas cubiertas por vegetación ligera son principalmente las especies *Typha latifolia* (Totora), *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) y *Elodea canadensis* (Yana) (Terneus, 2017), las cuales se encuentran principalmente en la zona litoral del lago. Las franjas que presentan vegetación media y alta corresponden a especies arbustiva, las cuales se encuentran en las orillas del lago. Cabe mencionar que las concentraciones de clorofila se van reduciendo a medida que se alejan de la orilla. Aguas adentro se registran menores valores de concentración de clorofila, debido a que disminuye la vegetación.

Según Estruch (2010), la presencia de altas concentraciones de clorofila en las orillas o zona litoral se debe a una mayor acumulación de materia orgánica. Esto se debe al aporte de nutrientes desde la tierra y al oleaje, lo que ocasiona que las concentraciones de clorofila sean más elevadas en la zona litoral a diferencia de las zonas más alejadas. Salcedo (2019), indica que en la época seca (septiembre del 2017) en el sitio de muestreo Cuerpo de Bomberos de Yahuarcocha, se registró un valor promedio de NDVI bajo, debido a que la vegetación se encontraba sometida a intervenciones antrópicas (actividades automovilísticas).

En el país, el índice NDVI ha sido empleado para el análisis sobre la cobertura vegetal, tal es el caso de Gonzaga (2015) que aplicó este índice en la provincia de Loja; no obstante, autores como Rosero (2020) que aplico el índice NDVI para analizar el estado nutricional del maíz en la provincia de Manabí. Así mismo, Cargua et al., (2018) aplico este índice para evaluar el estado de conservación de bosque en el Parque Nacional Sangay, es decir, este índice tiene efectividad para estudios de coberturas vegetales en distintas zonas de interés.



**Figura 12.** Índice diferencial de vegetación normalizados (NDVI) reclasificado del lago Yahuarcocha del año 2021

### 4.3. Análisis de la relación de datos obtenidos con métodos convencionales y sensores remotos

Los 15 datos relacionados entre clorofila “a” *in-situ* y mediante información satelital mostraron que corresponden a valores no paramétricos, debido a que la prueba de normalidad de Shapiro Wilks, dio como resultado un valor de 0.010 cuyo valor es menor a 0.05 (Anexo A1), por lo que los datos no presentan distribución normal, por lo que se aplicó la correlación de Spearman. En la correlación de Spearman, el p-valor calculado fue de 0.027 de los cinco meses de muestreo que es menor a 0.05 (Anexo A2), por lo que no existe una correlación entre los datos de clorofila “a” obtenidos *in-situ* con los datos obtenidos mediante información satelital.

La distribución espacio temporal de los datos analizados por puntos de muestreo de las imágenes satelitales con los datos *in-situ* fue irregular, en donde la relación de los datos de clorofila “a” obtenidos *in-situ* con la información satelital en el punto de los Bomberos presentó una buena relación dando una ecuación con un  $R^2$  mayor al 70 % (Tabla 7).

**Tabla 7.** Modelos de regresión seleccionados

Puntos	$R^2$	Ecuaciones generadas
Bomberos	71.93	$Chla = -90.164x + 95.482$
Vuelta de la Paloma	36.83	$Chla = -156.91x + 130.41$
Entrada	51.65	$Chla = -210.03x + 150.6$

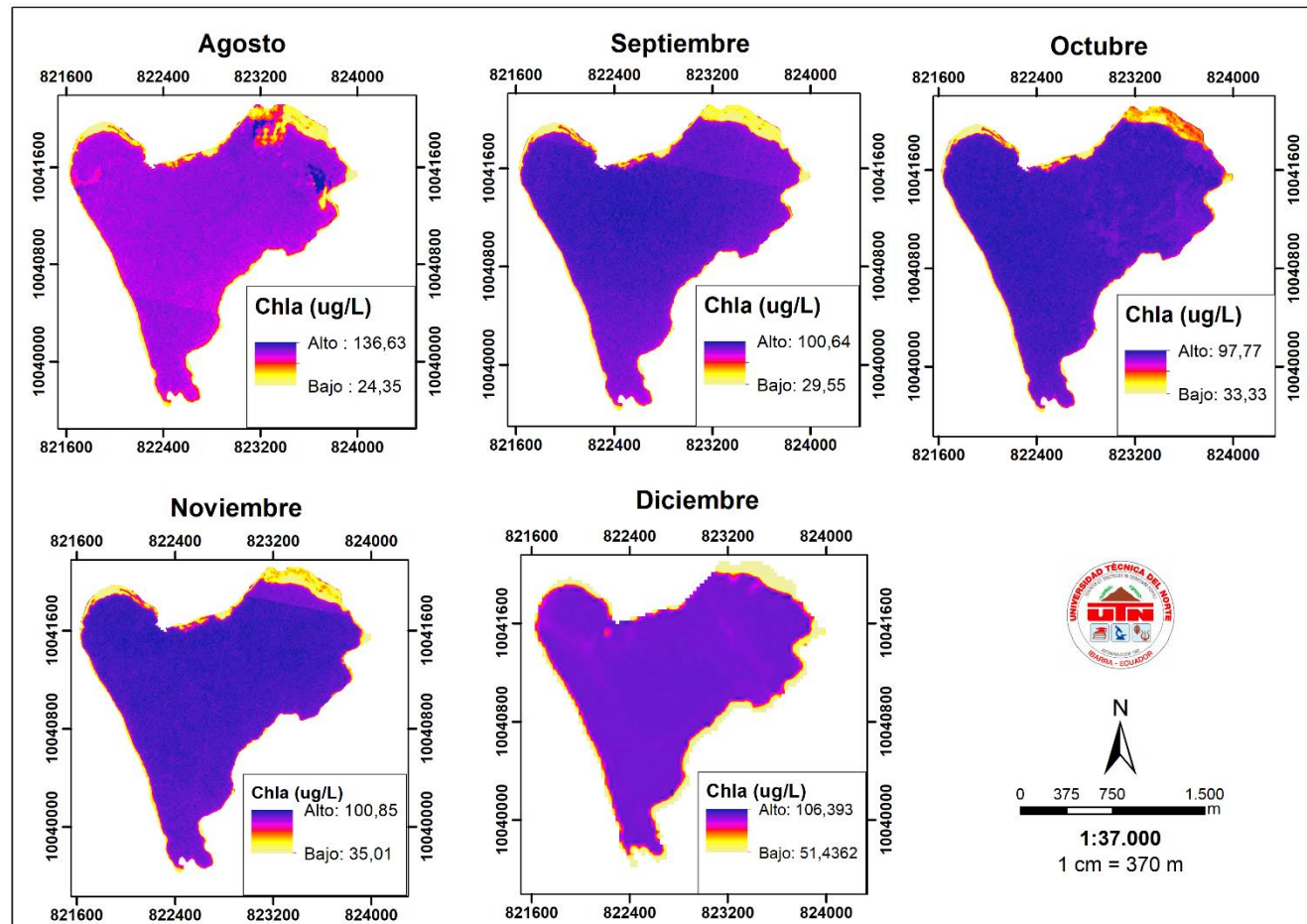
#### 4.3.1. Construcción de imágenes de distribución espacio temporal de clorofila “a”

Se obtuvo dos mapas de distribución espacio temporal de la clorofila, en la que se determinó la concentración de clorofila “a” para cada uno de los meses, donde se obtuvo tres estados tróficos: el estado mesotrófico, eutrófico e hipereutrófico. Entre los meses de agosto a diciembre se muestra una variación en cuanto al estado trófico. La distribución espacial y temporal mostró que el lago Yahuarcocha es un

sistema homogéneo, ya que se evidencia la predominancia del estado hipereutrófico.

Para el año 2017 (Figura 13) en el mes de agosto se muestran tres estados tróficos. El estado mesotrófico tiene un área de 43.06 m<sup>2</sup>, el estado eutrófico un área de 146.78 ha y para el estado hipereutrófico un área de 139.67 ha. Para los meses de septiembre hasta diciembre se presentan dos estados tróficos, que van del estado eutrófico e hipereutrófico, mostrando así que los niveles de contaminación han incrementado.

En el mes de agosto es donde más afloramiento por lo que la concentración de clorofila “a” con un valor máximo de 136.63 µg/L, pero empieza a disminuir y se mantiene más o menos estable desde septiembre hasta diciembre, sin embargo, están concentraciones superan los 75 µg/L, por lo que el lago está en estado hipereutrófico.



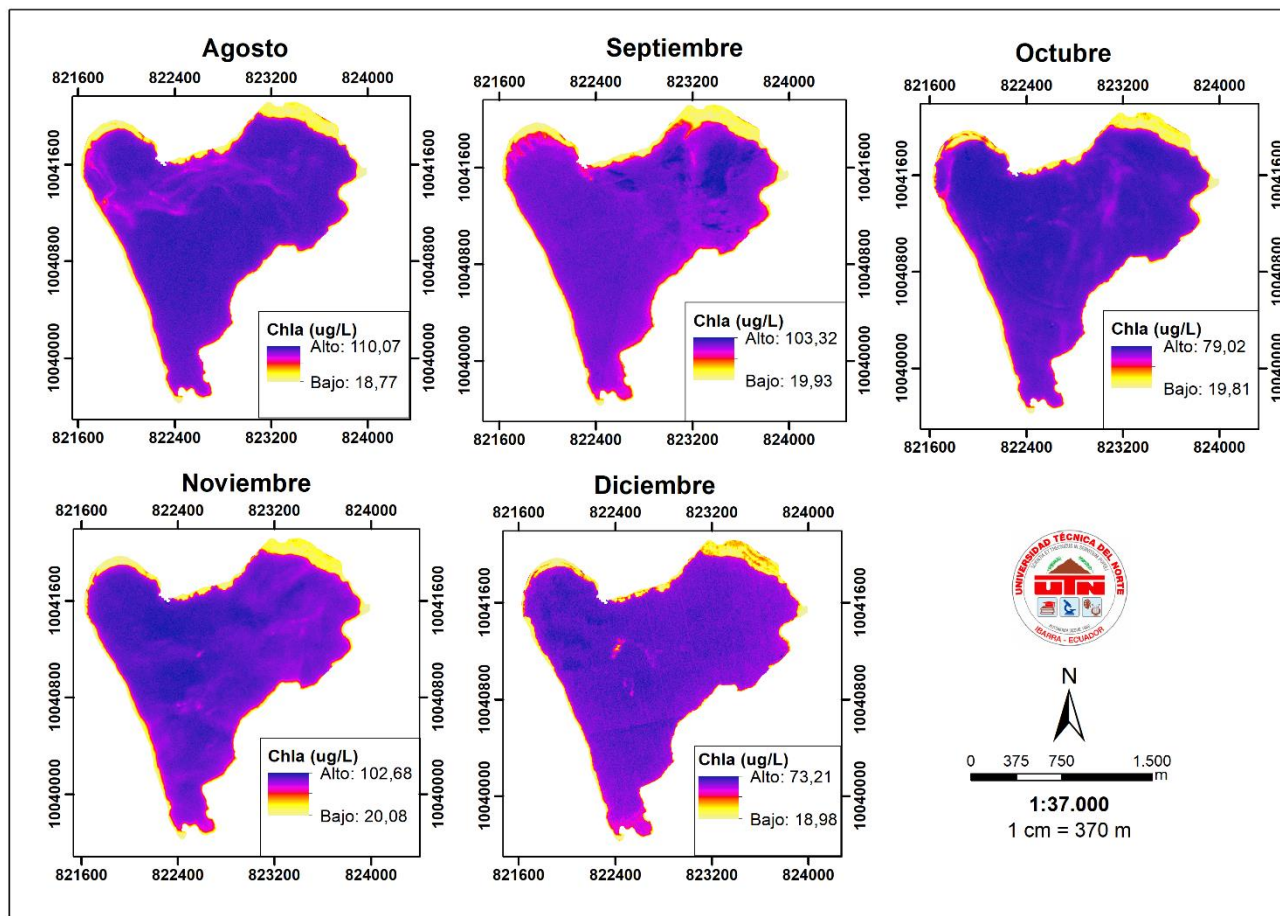
**Figura 13.** Distribución espacio temporal de la clorofila “a” del año 2017

*Nota:* El color amarillo indica el estado mesotrófico ( $5 - 25 \mu\text{g/L}$ ); el color rojo estado eutrófico ( $25 - 75 \mu\text{g/L}$ ); y el color morado indica el estado hipereutrófico ( $> 75 \mu\text{g/L}$ ). En el mes de diciembre la imagen se observa pixelada debido a que cada píxel tiene 30 m a diferencia de los demás meses que tienen 3 m por píxel.

Para el año 2021 (Figura 14) la distribución de la clorofila “a” muestra que para los meses de agosto, septiembre y noviembre los estados que sobresalen son el estado eutrófico e hipereutrófico (color morado). Las zonas eutróficas corresponden a la zona de la orilla, donde se encuentra vegetación y la zona con estado hipereutrófico se encuentra en el espejo de agua del lago. Las zonas de color amarillo corresponden a la vegetación arbustiva. Para los meses de octubre y diciembre el estado eutrófico es el que predomina en la superficie del lago.

Las imágenes presentaron baja nubosidad dentro de la zona de estudio, lo que permitió su mejor estudio. Por lo que en las imágenes se destaca las concentraciones de clorofila por lo que los valores tienen un rango de 18 a 110  $\mu\text{g/L}$  en general. En las orillas se presenta franjas amarillas mismas que corresponden a la vegetación media y alta. Según Briceño et al., (2018) las alteraciones en el estado trófico del agua se deben a diversos factores antrópicos, generalmente a los desechos producidos en las áreas recreativas, los nutrientes provenientes de distintos usos de suelo como uso agrícola, forestal, urbano y otros. Estos diversos usos aportan principalmente sedimentos, nitratos y fosfatos, los cuales son causantes de la eutrofización tanto en aguas continentales como en aguas oceánicas (Gomi et al., 2005).

El crecimiento demográfico, el desarrollo urbano y las actividades turísticas en el Lago Yahuarcocha han provocado la eutrofización del lago, debido a que se ocasiona afloración de cianobacterias, mismas que son letales para el ecosistema acuático. Así mismo, la presión urbanística ocasiona contaminación por vertidos hacia el lago, este factor aporta sedimentos al lago lo cual acelera el proceso de contaminación y afecta a la profundidad del lago. Verdezoto (2018) menciona que hace 10 años el lago tenía una profundidad de 10 metros y en el año 2016 se redujo a 6 metros. Además, existe un bajo tratamiento de los sistemas lacustres que hay en el cantón, por lo que el lago va disminuyendo su capacidad de acogida causando la eutrofización de las aguas (Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial [PDOT], 2021).



**Figura 14.** Distribución espacio temporal de la clorofila “a” del año 2021

*Nota:* El color amarillo indica el estado mesotrófico ( $5 - 25 \mu\text{g/L}$ ); el color rojo estado eutrófico ( $25 - 75 \mu\text{g/L}$ ); y el color morado indica el estado hipereutrófico ( $> 75 \mu\text{g/L}$ ).

Los mapas de distribución temporal del lago demostraron el potencial de integrar datos tomados en campo con información satelital, en el que se muestra que, mediante la relación generada, este método podría funcionar como una herramienta para complementar estudios y monitoreos en cuerpos de agua mediante la aplicación de métodos estadísticos, para generar modelos representativos para la variable clorofila “a”.

El estado trófico que se obtuvo mediante sensores remotos varía de los datos obtenidos en campo debido a que mediante imágenes satelitales se analiza toda la masa de agua y no un punto específico (Domínguez et al., 2017). Los colores en los mapas varían debido al aumento y disminución de las concentraciones de clorofila “a”. En cuanto a las concentraciones de clorofila obtenidas mediante las imágenes satelitales y en campo no muestran diferencias significativas por lo que estadísticamente son similares.

El estado trófico que se obtuvo mediante el uso de Teledetección no presentó diferencias significativas con los datos obtenidos *in-situ*. Así mismo, la localización de los cuerpos de agua contaminadas en la banda térmica de los sensores remotos se considera como un instrumento útil y de rápida ejecución. Sin embargo, hay que considerar que una vez localizada la masa de agua contaminada se debe analizar en base a la legislación vigente.

Tras aplicar la prueba de t para dos muestras independientes el p-valor dio como resultado 0.056 (Tabla 8) por lo que el p-valor supera el nivel de significancia ( $\alpha = 0.05$ ), por lo tanto, se acepta la hipótesis nula, en la que las concentraciones de clorofila “a” tomadas *in-situ* y mediante imágenes satelitales tienen una correlación positiva de mediana intensidad.



**Tabla 8.** Prueba t para dos muestras independientes

<b>Prueba t para dos muestras independientes</b>	
Diferencia	14.947
t (Valor observado)	1.991
t  (Valor crítico)	2.048
GL	28
valor-p (bilateral)	<b>0.056</b>
Alfa	0.05

#### 4.3.2. Evaluación de la calidad del agua

En cuanto a la evaluación del estado trófico del lago, se comparó los datos obtenidos en campo y mediante las imágenes satelitales (Tabla 9), en la que se determinó que estos valores según la OCDE (1892), muestran un estado trófico general hipereutrófico debido a que los rangos superan los 75  $\mu\text{g/L}$ .

**Tabla 9.** Concentraciones de clorofila “a” del año 2021 en  $\mu\text{g/L}$ 

Meses	Puntos	Chla <i>In-situ</i>	Chla imágenes satelital	Estado trófico
Agosto	Bomberos	75.06	75.81	Hipereutrófico
	Vuelta Paloma	79.47	86.78	Hipereutrófico
	Entrada	113.38	71.68	Hipereutrófico
Septiembre	Bomberos	70.89	78.62	Hipereutrófico
	Vuelta Paloma	150.30	84.66	Hipereutrófico
	Entrada	118.76	67.99	Hipereutrófico
Octubre	Bomberos	62.97	59.83	Eutrófico
	Vuelta Paloma	63.61	65.06	Eutrófico
	Entrada	75.99	61.25	Hipereutrófico
Noviembre	Bomberos	88.06	73.41	Hipereutrófico
	Vuelta Paloma	84.63	82.03	Hipereutrófico
	Entrada	102.51	78.68	Hipereutrófico
Diciembre	Bomberos	59.78	55.56	Eutrófico
	Vuelta Paloma	86.26	55.64	Eutrófico
	Entrada	44.62	55.05	Eutrófico

Para los meses de octubre y diciembre los datos obtenidos se encuentran en el rango de 25 a 75  $\mu\text{g/L}$  lo que da un estado eutrófico. La causa principal de la contaminación se debe a las actividades antrópicas que rodean el sistema lacustre (Fonseca, 2016), tales como el turismo, la gastronomía, actividades deportivas, recreación entre otras actividades que generan desechos ocasionando impactos negativos al ambiente, así como también el deterioro de la calidad de agua del lago (Yépez, 2016).

El lago Yahuarcocha presenta un alto grado de eutrofización, tanto en su condición ambiental como ecológica y su deterioro sigue progresivamente, dado a que el cuerpo de agua se ha convertido en el receptor de pequeños drenajes provenientes de la microcuenca (Yépez, 2016). Con el cálculo del índice de estado trófico realizado por Portilla (2015), el alto grado de eutrofización del lago se debe a las altas concentraciones de nutrientes (fósforo y nitrógeno), materia orgánica y la pérdida de profundidad a causa del arrastre y la acumulación de sedimentos.

#### 4.3.3. Índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO)

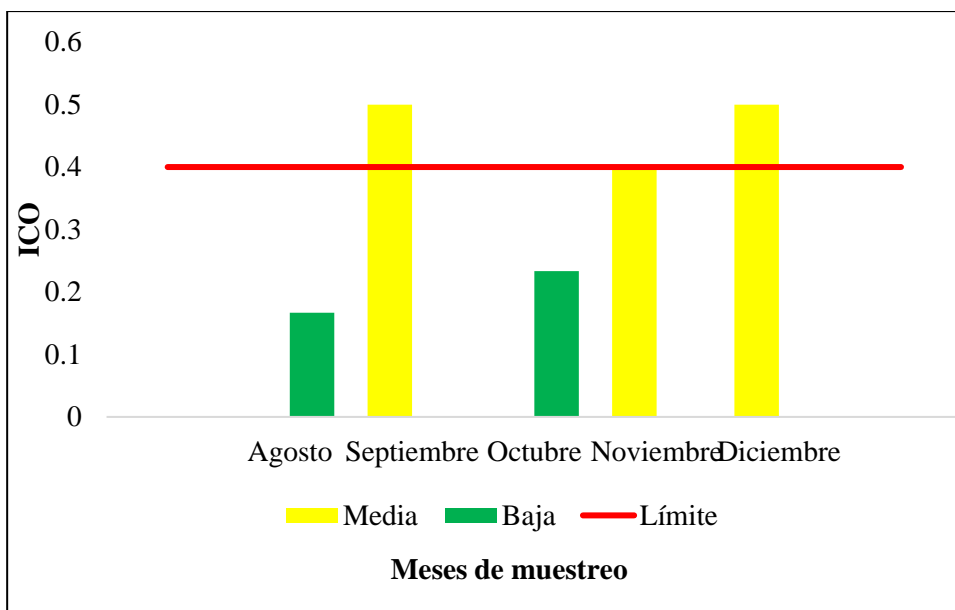
Teniendo en cuenta la expresión de las diferentes variables fisicoquímicas como la demanda bioquímica de oxígeno DBO<sub>5</sub>, coliformes totales y porcentaje de saturación de oxígeno, las cuales en conjunto recogen efectos distintos de la contaminación orgánica se obtiene la siguiente Tabla 10.

**Tabla 10.** Estimación del índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO)

Meses	Puntos	I DBO (mg/l)	I COL.TOT (UFC/100 ml)	I Oxígeno %	ICOMO
Agosto	Bomberos	0.8	-0.1	-0.1	0.2
	V. Paloma	0.6	0.0	0.0	0.2
	Entrada	0.6	-0.3	-0.1	0.1
Septiembre	Bomberos	1.1	0.0	0.1	0.4
	V. Paloma	0.7	0.4	0.8	0.6
	Entrada	0.6	0.3	0.5	0.5
Octubre	Bomberos	0.7	-0.2	0.0	0.2
	V. Paloma	0.7	0.0	0.1	0.3
	Entrada	0.5	-0.1	0.2	0.2
Noviembre	Bomberos	0.7	0.4	0.0	0.3
	V. Paloma	0.9	0.5	0.0	0.4
	Entrada	0.9	0.6	0.1	0.5
Diciembre	Bomberos	0.6	0.6	0.6	0.6
	V. Paloma	0.6	0.4	0.2	0.4
	Entrada	0.6	0.6	0.3	0.5

Los ICO a diferencia de los ICA reflejan una nula o baja contaminación cuando son próximos a cero y alta polución en la medida que se acerca a 1, siendo así que los meses de septiembre (0.5), noviembre (0.4), diciembre (0.5) presenta un rango

asociado al valor de contaminación media y una escala de color amarillo, y los meses de agosto (0.2), octubre (0.2) conllevan una contaminación baja y una escala verde (Figura 15), esto según la Tabla 4 de significancia de los índices de contaminación ICO permitiendo una rápida lectura de los resultados de los parámetros analizados.



**Figura 15.** Escala de contaminación ICOMO

*Nota:* La imagen muestra el promedio de los datos de los 5 meses de muestreo del Lago Yahuarcocha del 2021.

Ramírez et al. (1997) menciona que los índices ICO dentro del cual se encuentra ICOMO permite cuantificar el grado de contaminación de las aguas respecto a la condición general y no a contaminantes específicos, en el estudio se conjugo algunas de las propiedades más fundamentales de las aguas dado que son variables que regularmente son determinadas en cualquier estudio limnológico, tales como lo refleja Ochoa (2017) o Patiño (2020), entre otros.

En la cuenca del Río Bogotá se determinó el índice de contaminación por materia orgánica empleando la demanda biológica de oxígeno, coliformes totales y porcentaje de saturación de oxígeno obteniendo un ICOMO de 0.8260 lo que al ser cercano a 1 representa un alto grado de contaminación, el valor que se explica asociando el resultado de índice de contaminación por materia orgánica con un

índice de contaminación por materia orgánica (1026 mg/l) ya que en este se concluyó que en el cuerpo de agua se hace presente el fenómeno de hipertrofia debido a los altos contenidos de fósforo causa de la cantidad de materia orgánica en el agua (Cañas, 2010).

Basándose en lo anterior y en los resultados generales obtenidos es importante la atención a la cantidad de materia orgánica vertida en el lago ya que en los parámetros empleados para la determinación del índice se muestran valores altos, lo que respalda al resultado del ICOMO, el aumento de materia orgánica finalmente generaría una disminución de oxígeno en el cuerpo de agua, cosa que dificultaría altamente la existencia de vida tanto animal como vegetal (Cañas, 2010).

Otro de los índices usados para dar a conocer el estado de calidad del lago se presenta en un estudio realizado por Rivera (2021) el cual determina el ICA presentado en el Anexo 1, donde se obtiene un resultado de 50.63 concluyendo que la calidad de agua para el lago Yahuarcocha se encuentra entre mala y regular, además que también se menciona un índice de estado trófico de 78.54 lo que corresponde a un estado hipertrófico, dándonos a comprender que tanto ICOMO como ICA reflejan un mal estado para el lago.

Finalmente, las imágenes que se obtuvieron a través de las distintas imágenes satelitales ayudaron a identificar las zonas tróficas dentro del lago Yahuarcocha, identificándolo con un estado hipertrófico y los índices de calidad lo caracterizan con una contaminación media en ICOMO y mala en ICA. Los métodos convencionales requieren una inversión mayor debido a los costos para el análisis de parámetros fisicoquímicos o microbiológicos, además que van a depender de los parámetros a analizarse y de la cantidad de muestras, mientras que el uso de sensores remotos se adquiere una imagen por mes de estudio y se puede calcular el estado trófico de manera general y no por punto de muestreo.

## Capítulo V

### Conclusiones y recomendaciones

#### 5.1. Conclusiones

- El análisis de los parámetros desde los años 2017 al 2021 refleja que existe un deterioro en la calidad de Agua, según la Normativa de calidad Ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua del Libro VI Anexo 1 del TULSMA, ciertos parámetros superan el máximo permisible en agua para fines recreativos mediante contacto secundario, entre los que se encuentran; pH con rangos de 8.60-8.92, el OD para los años 2020 y 2021 con datos de 89-109% respectivamente.
- Las concentraciones de clorofila “a” presentaron variabilidad en cada uno de los meses muestreados, teniendo así que para el mes de septiembre del año 2021 se registró el máximo de clorofila “a” de 150.3 µg/l, por lo que de acuerdo con la clasificación de la OCDE el lago Yahuarcocha está en estado hipertrófico debido a que supera los 75 µg/l.
- Uno de los cambios más representativos en el índice de vegetación NDVI aplicado en el lago Yahuarcocha, es la presencia de vegetación ligera, debido al incremento o disminución de los nutrientes en el lago. Entre las especies más abundantes se encuentran la *Typha latifolia* (Totora), *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) y *Elodea canadensi* (Yana).
- El lago Yahuarcocha a observación directa evidencia una mala calidad de agua por su coloración verde turquesa, sin embargo el ICOMO calculado con el muestreo y el ICA presentado en el estudio de Rivera (2021), corroboran dicho estado, siendo que el índice de contaminación ICOMO se presenta como una alternativa para la valoración cuantitativa y de fácil entendimiento que involucra una serie de parámetros importantes y comunes en los estudios de calidad de agua dando la idea próxima de que el estado del agua en el agua del lago Yahuarcocha es de una contaminación media (ICOMO), contaminación mala (ICA).

- La calidad de agua obtenida por métodos convencionales dio como resultado que el lago presenta una variación en su estado trófico entre eutrófico e hipereutrófico, misma condición que refleja los datos obtenidos mediante las imágenes satelitales. Es decir, el lago presenta un algo grado de contaminación y que sigue aumentando su deterioro gradualmente.
- Mediante la aplicación de monitoreos con sensores remotos se puede obtener información satelital sobre cuerpos de agua de forma continua y cuya información pueden ser utilizada para la estimación de la calidad de agua de una manera rápida, a diferencia de los métodos convencionales que requieren mayor esfuerzo. No obstante, hay que recalcar que es necesario contar con una base de datos obtenidos *in-situ* con el fin de medir la relación entre la estimación de la calidad de agua con métodos convencionales y con datos obtenidos mediante imágenes satelitales. El uso de clorofila “a” reduce los costos con referencia a la aplicación de otros parámetros fisicoquímicos para conocer el estado del sistema acuático.
- Con las conclusiones citadas anteriormente se acepta la hipótesis nula, donde las concentraciones de clorofila “a” tomadas *in-situ* y mediante imágenes satelitales presentan una correlación positiva de mediana intensidad, es decir los datos son similares a los datos obtenidos por sensores remotos.

## 5.2. Recomendaciones

- Se recomienda que para los estudios de cuantificación de parámetros fisicoquímicos y clorofila “a”, se realice a mayor profundidad y se establezca más puntos de muestreo para obtener un mejor valor de coeficiente de determinación  $R^2$  disminuyendo la incertidumbre y error asociado a la estimación de los parámetros.
- Las imágenes satelitales constituyen una fuente de información para la cuantificación de los cambios en la vegetación, por lo que se recomienda que las imágenes multiespectrales presenten una mayor resolución, una

visibilidad libre de nubosidad, una mayor resolución temporal, de tal manera que mejoré el estudio del comportamiento espacio-temporal.

- Se deben realizar evaluaciones periódicas del estado tráfico para obtener datos del comportamiento de los parámetros, y realizar correlaciones para la interpretación de la condición de estado de la zona de estudio.

## Referencias

- Abac, J. (2015). *Propuesta de Aplicaciones de Sensores para la Industria y Características de Sensores*. (Tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/3309/1/Julio%20Alejandro%20Abac%20de%20Le%C3%B3n.pdf>
- Astudillo, J. (2018). *Pastoreo del Mesozooplankton Sobre el Fitoplancton en el Lago Yahuarcocha, Provincia Imbabura*. (Tesis de pregrado). Universidad Técnica del Norte. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/8287>
- Bautista-Díaz, M. L., Victoria-Rodríguez, E., Vargas-Estrella, L. B., y Hernández-Chamosa, C. C. (2020). *Pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas: su clasificación, objetivos y características*. Educación y Salud Boletín Científico. Instituto de Ciencias de La Salud. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 9(17), 78–81. <https://doi.org/10.29057/icsa.v9i17.6293>
- Bellido, J. (2019). *Análisis Espacio-Temporal del Comportamiento de la Clorofila "A" Mediante Imágenes Satelitales en la Represa Aguada Blanca Para El Año 2017*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10209>
- Benavides, F., y Méndez, J. (2020). *Determinación de las Concentraciones de Plomo y Cromo Asociados a Poblaciones De Typha latifolia en la Laguna de Yahuarcocha, Provincia De Imbabura*. (Tesis de pregrado). Universidad Técnica del Norte. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10337>
- Berdugo, A. y Reales, G. (2016). *Análisis Multiespectral De Imágenes Satelitales Para Evaluar Variaciones Espacio - Temporales en la Calidad del Agua del Embalse El Guájaro, Atlántico*. (Tesis de pregrado).
- Bragado, A. (25 de enero del 2017). *Eutrofización de Lagos*. Tiloom.
- Bravo-Morales, N. (2017). *Teledetección Espacial Landsat, Sentinel2, Aster L1t y Modis*. Geomática Ambiental, 1, 105. <https://sites.google.com/view/geomatica-ambiental-srl/>



- Briceño, I., Pérez, W., San-Miguel, D., Ramos, S. (2018). *Determinación de Calidad de Agua en el Lago Vichuquén, con Imágenes de Satélite Landsat 8, Sensor OLI, año 2016, Chile*. Asociación Española de Teledetección. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.10126>
- Caicedo, F. (2015). *Evaluación de la Dinámica Poblacional del Fitoplancton con Relación a las Características Físico-Químicas del Lago Altoandino Yahuarcocha*. [Tesis pregrado]. Universidad Técnica del Norte.
- Camacho, E. (2017). *Folleto Informativo pH –California State Water Resource Control*. [https://www.waterboards.ca.gov/water\\_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3140sp.pdf](https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3140sp.pdf)
- Cañas J. (2010). *Determinación y Evaluación de Índices de Contaminación (Icos) en el Cuerpo de Agua. Makro Construcciones LTDA, Bogotá, Colombia*. Obtenido de: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/10901/articulo%20final.pdf;jsessionid=AF4DD00751EFCD77551C8A6731DBD894?sequence=1>
- Cargua, F., Rodríguez, M., Romero, B., y Santillán, P. (2018). *Evaluación del Estado de Conservación del Bosque de Ceja Andina Sur Occidental del Parque Nacional Sangay (Ecuador), para una Mejor Gestión del Recurso Forestal*. Revista Espacios, 39, 45.
- Chamba, K., Guallasamin, C. (2015). *Estudio de la Disponibilidad y Calidad del Agua de Consumo Humano a través del Monitoreo de Caudales y Análisis de los Parámetros Físicos, Químicos y Microbiológicos en la zona Pesillo-Imbabura*. (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10082/6/UPS-ST001591.pdf>
- Chaves-Campos, A., Araya-Rodríguez, F., Chaves-Jiménez, A., & Yopez-García, V. (2005). *Desarrollo de una red de monitoreo por sensores remotos de la calidad de agua*. Revista Tecnología En Marcha, 18(2), pág. 4. [https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/202/200](https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/202/200)

- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental Approach*. Editorial Taylor y Francis Group, LLC. Recuperado de [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=-nCmCwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Chuvieco,+E.+\(2020\).+Fundamentals+of+Satellite+Remote+Sensing:+An+Environmental+Approach.&ots=H5cC7dpCGv&sig=gZEo0lMwnoA9XPgN5TL6GSS8v\\_c#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=-nCmCwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Chuvieco,+E.+(2020).+Fundamentals+of+Satellite+Remote+Sensing:+An+Environmental+Approach.&ots=H5cC7dpCGv&sig=gZEo0lMwnoA9XPgN5TL6GSS8v_c#v=onepage&q&f=false)
- Chuvieco, E. (2020). *Revisión histórica y perspectivas de futuro de la Teledetección: desde el ERTS hasta los Sentinels*. Revista Mapping. 29 (200). 30-32. ISSN:1131-9100
- Domínguez, A., Morán, J., Baena, R., Soria, X. y Caselles, V. (2017). *Investigar aprendiendo: Calidad de Agua mediante Teledetección*. [https://www.researchgate.net/publication/324862442\\_Investigiar\\_aprendiendo\\_Calidad\\_de\\_Agua\\_mediante\\_Teledeteccion](https://www.researchgate.net/publication/324862442_Investigiar_aprendiendo_Calidad_de_Agua_mediante_Teledeteccion)
- Escobar, S., Albuja, A., y Andueza, F. (2021). *Physicochemical Quality of Lagoon Colta Water. Chimborazo, Ecuador*. Revista FIGEMPA Investigación y Desarrollo. Volum 1. Núm 1. pp.76-81. Doi: 10.29166/revfig. v1i1.3135
- Espinosa R., Delfín I. y Hernández A. (2006). *Metodologías para Evaluar la Calidad de Agua*. Universidad Autónoma Metropolitana. Obtenido de: [http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/5085/Metodologias\\_para\\_evaluar\\_la\\_calidad\\_del\\_agua.pdf?sequence=1](http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/5085/Metodologias_para_evaluar_la_calidad_del_agua.pdf?sequence=1)
- Estruch, F. (2010). *Análisis de la Clorofila A en el Agua a Partir de una Imagen Multiespectral Quickbird en la Zona Costera De Gandia*. (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Valencia.
- European Space Agency [ESA] (2016). *PlanetScope*. Recuperado 18 de marzo 2022. <https://earth.esa.int/eogateway/missions/planetscope>
- Fonseca, L. (2 de octubre del 2016). *Yahuarcocha: un recurso que se agota*. Diario La Hora. <https://www.lahora.com.ec/noticias/yahuarcocha-un-recurso-que-se-agota/>
- Gaitán, M. (2015). *Determinación de Oxígeno Disuelto por el Método Yodométrico Modificado de Azida*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios

Ambientales.

<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Ox%C3%ADgeno+Disuelto+M%C3%A9todo+Winkler.pdf/e2c95674-b399-4f85-b19e-a3a19b801dbf>

García, F., y Miranda, V. (2018). *Eutrofización, una Amenaza para el Recurso Hídrico*. Volumen II de La Colección: Agenda Pública Para El Desarrollo Regional, La Metropolización y La Sostenibilidad, 35–367.

[http://ru.iiec.unam.mx/4269/1/2-Vol2\\_Parte1\\_Eje3\\_Cap5-177-García-Miranda.pdf](http://ru.iiec.unam.mx/4269/1/2-Vol2_Parte1_Eje3_Cap5-177-García-Miranda.pdf)

Gil-Marín, J. A., Vizcaino, C., y Montaña-Mata, N. J. (2018). *Evaluación de la calidad del agua superficial utilizando el índice de calidad del agua (ICA). Caso de estudio: Cuenca del Río Guarapiche, Monagas, Venezuela*. Anales Científicos, 79(1), 111. <https://doi.org/10.21704/ac.v79i1.1146>

Giri, C. (2016). *Observation and Monitoring of Mangrove Forest Using Remote Sensing: Opportunities and Challenges*. Remote Sensing, 8(9),783. <http://doi.org/103390/rs8090783>

Gómez, R. (2015). *Análisis Espectral del Lago de Guadalupe, Mediante Imágenes de Satélite y Datos In Situ*. Investigaciones Geográficas. Vol. 2015. Núm. 86, 15-24. <http://DOI:10.14350/rig.42338>

Gomi, T., Dan-Moore, R., y Hassan, M., (2005). *Suspended Sediment Dynamics in Small Forest Streams of the Pacific Northwest*. Journal of the American Water Resources Association, 41(4), 877-898. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03775.x>

Gonzaga, C. (2015). *Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales para Análisis de Coberturas Vegetales en la Provincia de Loja, Ecuador*. Cedamaz, 5(1), 30–41. <http://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz/article/view/43/41>

Gonzales, M., y Mendoza, E. (2018). *Sesión 2: Introducción a la Teledetección*.

Instituto de Toxicología de la Defensa. (2016). *Protocolo de muestras de agua residual*.

<https://www.defensa.gob.es/itoxdef/Galerias/documentacion/protocolos/fic>

[heros/PROTOCOLO DE TOMA DE MUESTRAS DE AGUA RESIDUAL ver 2.pdf](#)

- Gualdrón, L. (2016). *Evaluación de la calidad de agua de Ríos de Colombia Usando Parámetros Físicoquímicos y Biológicos*. Revista Dinámica Ambiental. (1), 88-89.  
<https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/ambiental/article/view/4593/3916>
- Guerrero, M. (2018). *Población Flotante: Análisis en la Microcuenca de la Laguna Yahuarcocha (Imbabura – Ecuador) UNIANDES Episteme*. Revista digital de Ciencia, Tecnología e Innovación; Vol. 5, No Especial (Año 2018).  
<http://45.238.216.13/ojs/index.php/EPISTEME/article/view/1546>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC]. (2010). *Información Censal*. INEC. Recuperado el 08 de febrero de 2023.  
<https://www.ecuadorencifras.gob.ec/search/POBLACION+POR+SEXO,+SEGUN+PROVINCIA,+PARROQUIA+Y+CANTON+DE+EMPADRONAMIENTO/>
- Jácome, G. (2015). *Propuesta de gestión de los conflictos socioambientales generados por el agua de consumo humano dentro de la microcuenca de la Laguna de Yahuarcocha* (Tesis de pregrado). Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador
- Jácome, G., Mejía, J., Guerra, N., Romero, A., Piedmag, V., Padilla, C., Tanaí, I., y Pupiales, N. (2020). *Los volcanes de Imbabura y su tiempo geológico*. Imbabura-Ecuador. FICAYA Emprende.
- Jácome, G., Valarezo, C. y Yoo, C. (2018). *Assessment of water quality monitoring for the optimal sensor placement in lake Yahuarcocha using pattern recognition techniques and geographical information systems*. Environmental Monitoring and Assessment, 190 (4).  
<https://doi.org/10.1007/s10661-018-6639-x>
- Kanaan, S., y Ventura, C. (2018). *Procesamiento de imágenes multiespectrales para el análisis del estado de la vegetación*. Universidad Oberta Catalunya.
- Lara, D. (2015). *Estudio de Impacto Ambiental. Ordenamiento de las Actividades Deportivas Recreativas y de Alimentación que se Realizan en la Laguna*

*Yahuarcocha del Cantón Ibarra*. Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal San Miguel de Ibarra.  
[https://www.ibarra.gob.ec/site/docs/anillovial/EIA\\_Yahuarcocha\\_Ibarra.pdf](https://www.ibarra.gob.ec/site/docs/anillovial/EIA_Yahuarcocha_Ibarra.pdf)

- López-Montecinos, C. (2019). *Fundamentos Básicos para la Teledetección Ambiental*. Geoscience. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.20684.44161>
- López, M. y Madroñero, S. (2015). *Estado Trófico de un Lago Tropical de Alta Montaña: Caso Laguna de la Cocha*. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 25 (2), pp. 21-42. <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.1430>
- Maridueña, A., Chalén, N., Coello, D., Cajas, J., Elías, E., Solís, P., Águila, F. (2011). *Mortandad de Peces en la Laguna de Yahuarcocha, Cantón Ibarra, Provincia de Imbabura. Febrero 2003*. Revista Boletín Especial.
- Marín-Galvín, R. (2020). *Fisicoquímica y microbiología de los medios acuáticos: tratamiento y control de calidad de aguas (2a. ed.)*. Ediciones Díaz de Santos. Recuperado de <https://elibro.net/es/ereader/utnorte/129297?page=370>.
- Massol, A. (2010). “*Parámetros Físico-químicos*” en *Curso Ecología Microbiana*. [En línea]. Mayagüez, disponible en: <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/> [Accedido el día 13 de agosto de 2020]
- Merchán, Z. (2018). *Identificación Espacio Temporal de la Clorofila A Mediante Imágenes de Satélite en Sistemas Acuáticos*. Escuela de Ingeniería Ambiental Tunja. [https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/3065/3/TGT\\_1669.pdf](https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/3065/3/TGT_1669.pdf)
- Merg, C., Petri, D., Bodoira, F., Nini, M., Fernández, M., Schmidt, F., Montalva, R., Guzmán, L., Rodríguez, K., Blanco, F., y Selzer, F. (2011). *Mapas digitales regionales de lluvias, índice estandarizado de precipitación e índice verde*. Revista Pilquen, Sección Agronomía.
- Minaya, R. (2016). *Parámetros, Físico, Químicos, Microbiológicos, para Determinar la Calidad del Agua en la Laguna Monacocha, Época de Transición Creciente-Vaciante. I Quito. Perú. 2016*. Universidad Nacional de la Amazonia Peruana Facultad de Agronomía

- Molden, D. (2007). *Evaluación exhaustiva del manejo del Agua en Agricultura. Agua para la Alimentación, Agua para la Vida*. Londres: Earthscan y Colombo: Instituto Internacional del Manejo del Agua.
- Montoya, C., Loaiza, D., Torres., Cruz, C., Escobar, J.C. (2017). *Efecto del Incremento en la Turbiedad del Agua Cruda Sobre la Eficiencia de Procesos Convencionales de Potabilización*. Revista EIA, núm. 16. 137-148. Escuela de Ingeniería de Antioquia Envigado. ISSN: 1794-1237
- Moreta, J. (2008). *La Eutrofización De Los Lagos y Sus Consecuencias*. Ibarra 2008. (Tesis de pregrado). Universidad Técnica del Norte.
- Norway's International Climate and Forests Initiative [NICFI]. (2022). *Programa de Datos Satelitales del NICFI: Recursos*. Recuperado el 24 de septiembre del 2022 de [https://assets.planet.com/docs/NICFI\\_User\\_Guide\\_v4\\_ES.pdf](https://assets.planet.com/docs/NICFI_User_Guide_v4_ES.pdf)
- Ochoa, M. (2017). *Evaluación del Crecimiento de Cianobacterias en Relación a los Parámetros Físico-Químicos del Agua en el Lago Yahuarcocha*. [Tesis de pregrado]
- Oquendo, J., 2016. *Evaluación de Thyra latifolia en la absorción de plomo y propuesta de fitorremediación de aguas residuales con metales pesados en la Laguna de Yahuarcocha*. MAGISTER en Gestión Ambiental en la Industria. Universidad Internacional SEK.
- Pabón, J. (2015). *Distribución y Evaluación de la Vegetación Macrófita en el Lago de Yahuarcocha*. Tesis de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables. Universidad Técnica del Norte. Ibarra. Ecuador.
- Patiño, K. (2020). *Evaluación de la Inhibición del Crecimiento de Fitoplancton por Paja de Cebada Hordeum vulgare en el Lago Yahuarcocha*. (Tesis pregrado) Universidad Técnica del Norte, Ecuador. <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/10483/2/03%20RNR%20357%20TRABAJO%20GRADO.pdf>
- Perea-Ardila, MA., Oviedo, F., y Leal, J. (2019). *Cartografía de manglar mediante imágenes de sensores remotos: estudio de caso Buenaventura, Colombia*. Revista de Teledetección. (53):73-86. <https://doi.org/10.4995/raet.2019.11684>

- Pérez, D. (2007). *Introducción a los sensores remotos- Aplicaciones en Geología*. Laboratorio de Tectónica Andina. Dpto. Cs, Geológicas, F.C.E.N., U.B.A. [http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso\\_SR/Guia\\_Curso\\_sr\\_2007.pdf](http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso_SR/Guia_Curso_sr_2007.pdf)
- Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial [PDOT]. (2021). *Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Ibarra*. Gobierno Autónomo descentralizado, Administración 2019-2023.
- Planet. (2016). *Planet Imagery Product Specification: Planetscope y Rapideye*. [https://www.planet.com/products/satellite-imagery/files/1610.06\\_Spec%20Sheet\\_Combined\\_Imagery\\_Product\\_Letter\\_ENGv1](https://www.planet.com/products/satellite-imagery/files/1610.06_Spec%20Sheet_Combined_Imagery_Product_Letter_ENGv1)
- PlanetScope, (13 de abril 2022). *PlanetScope Basic Scene*. Recuperado 18 de marzo 2022. <https://earth.esa.int/eogateway/missions/planetscope>
- Portilla, K. (2015). *Evaluación del Comportamiento de los Parámetros Físicos del Agua, para Determinar el Estado Trófico del Lago Yahuarcocha, Provincia Imbabura*. Ibarra.
- Preciado, N., y Silva, M., (2015). *Estimación de Concentración Clorofila-a, con Técnicas de Teledetección a Partir de un Derrame de Petróleo*. Ventana Informática No. 32 (ene-jun). Manizales (Colombia): Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Manizales. p. 199-215. ISSN: 0123-9678
- Quintana-Sotomayor, C., Lillo-Saavedra, M., Gonzalo-Martín, C., y Barrera-Berrocal, J. (2012). *Metodología para Estimación de la Turbidez de un Lago Mediante la Clasificación Orientada a Objetos de Imágenes Multiespectrales*. Tecnología y ciencias del agua, 3(4), 143-150. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222012000400009&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222012000400009&lng=es&tlng=es).
- Rabassa, J. (1955). *Análisis del espectro infrarrojo del agua mediante simulaciones de dinámica molecular*. Universidad de Barcelona. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=239774>
- Ramírez., Restrepo, R., y Cardeñosa, M. (1999). *Índices de Contaminación para Caracterización de Aguas Continentales y Vertimientos Formulaciones* - Ciencia, Tecnología y Futuro, 1(5), 89-99. Retrieved June 30, 2022, from

[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0122-53831999000100008&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53831999000100008&lng=en&tlng=es)

Ramírez, A., Restrepo, R. y Viña, G., (1997). "*Cuatro Índices de Contaminación para Caracterización de Aguas Continentales. Formulaciones y aplicación*". *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1 (3):135 – 153 Retrieved June 30. 2022, from [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0122-53831997000100009&script=sci\\_abstract&tlng=en](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0122-53831997000100009&script=sci_abstract&tlng=en)

Ramos, A. (2018). *Evaluación del riesgo de eutrofización del embalse El Quimbo, Huila (Colombia)*. *Revista Lagos, Ciencia y Tecnología*. <https://doi.org/10.22335/rlct.v10i2.461>

Revelo, J. (2017). *Evaluación del Balance Hidrológico y Establecimiento de Estrategias para la Conservación del Recurso Hídrico del Lago Yahuarcocha*. (Trabajo de Grado). Universidad Técnica del Norte.

Rivas, R. (2014). *Sensores Remotos: Resoluciones en Teledetección*. Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires UNCPBA. [http://cursosihlla.bdh.org.ar/SR\\_Exactas/](http://cursosihlla.bdh.org.ar/SR_Exactas/)

Rivera, D. (2020). *Estimación de Parámetros de Calidad de Agua en la Laguna Santa Elena Usando Imágenes Satelitales*. (Trabajo de Grado) Universidad de Concepción. <http://repositorio.udec.cl/jspui/bitstream/11594/928/5/Tesis%20Estimacion%20de%20parametros%20de%20calidad%20de%20agua%20en%20la%20Laguna%20de%20Santa%20Elena.Image.Marked.pdf>

Rivera, F. (2021). *Estudio Multidisciplinario para la Remediación y Conservación del Sistema Lacustre de Yahuarcocha*. Universidad Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Rodríguez, O., y Arredondo, H. (2005). *Manual para el Manejo y Procesamiento de Imágenes Satelitales Obtenidas del Sensor Remoto Modis de la Nasa, Aplicado en Estudios de Ingeniería Civil*. (Trabajo de Grado) Pontificia Universidad Javeriana. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7050/tesis123.pdf?sequence=3&isAllowed=y>



- Rodríguez, M., y Gutiérrez, S. (2017). *Guía Institucional Metodología para la elaboración de mapas de superficie de cultivos priorizados, a través de análisis geoespacial multicriterio.*
- Roldan, G. y Ramírez, J. (2008). *Fundamentos de Limnología Neotropical.* Medellín, Colombia: Universidad de Antioquía. <http://www.untumbes.edu.pe/vcs/biblioteca/document/varioslibros/0742.%20Fundamentos%20de%20limnolog%C3%ADa%20neotropical.pdf>
- Rosales, J. (11 de diciembre del 2020). *La laguna de Yahuarcocha Presenta un Deterioro de la Calidad del Agua; un Plan de Conservación de Lagos se Aplicará.* EL COMERCIO. <https://www.elcomercio.com/tendencias/ambiente/laguna-yahuarcocha-deterioro-calidad-agua.html>
- Rosero, T. (2020). *Aplicación De Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) para Determinar Estado Nutricional de Maíz (Zea mays L.) en Paján-Manabí.* Universidad Agraria del Ecuador
- Saelens, P. (2015). *Ecological Functioning of a Eutrophic, High-Altitude Shallow Lake in Ecuador, Laguna Yahuarcocha.* K.U. Leuven, Kulak, 85. [http://scriptiebank.be/sites/default/files/webform/scriptie/Pauline\\_Saelens\\_THESIS\\_0.pdf](http://scriptiebank.be/sites/default/files/webform/scriptie/Pauline_Saelens_THESIS_0.pdf)
- Salcedo, E. (2019). *Evaluación de Concentración de Plomo y Cromo en Poblaciones de Typha latifolia en la Laguna de Yahuarcocha.*
- Samboni-Ruiz, N., Carvajal, Y., y Escobar, J. (2007). *Revisión de Parámetros Físicoquímicos como Indicadores de Calidad y Contaminación del Agua.* Ingeniería e Investigación, 27(3),172-181. ISSN: 0120-5609. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64327320>
- Sánchez, A., y Arguijo, P. (2018). *Análisis de Imágenes Multiespectrales para la Detección de Cultivos y Detección de Plagas y Enfermedades en la Producción de Café.* Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Posgrado en Sistemas Computacionales, Veracruz, México. pp. 309–317. ISSN 1870-4069. Disponible en: [https://rcs.cic.ipn.mx/2018\\_147\\_7/Analisis%20de%20imagenes%20multie](https://rcs.cic.ipn.mx/2018_147_7/Analisis%20de%20imagenes%20multie)

[spectrales%20para%20la%20deteccion%20de%20cultivos%20y%20detection%20de%20plagas.pdf](#)

Sánchez, J. (2019.) *Recursos Naturales, Medio Ambiente y Sostenibilidad: 70 años de Pensamiento de la CEPAL*. Libros de la CEPAL, N° 158 (LC/PUB.2019/18-P), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2019.

Secretaría Nacional de Planificación. (2021). *Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025*. Obtenido de: [https://observatorioplanificacion.cepal.org/sites/default/files/plan/files/Plan-de-Creaci%C3%B3n-de-Oportunidades-2021-2025-Aprobado\\_compressed.pdf](https://observatorioplanificacion.cepal.org/sites/default/files/plan/files/Plan-de-Creaci%C3%B3n-de-Oportunidades-2021-2025-Aprobado_compressed.pdf)

Sierra-Ramírez, C. A. (2011). *Calidad del Agua: Evaluación y Diagnóstico*. Ediciones de la U. Recuperado de <https://elibro.net/es/ereader/utnorte/70981?page=48>.

Terneus, E. (2017). *Vegetación Acuática y Estado Trófico de las Lagunas Andinas de San Pablo y Yahuarcocha, Provincia de Imbabura, Ecuador*. Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas, 35(1–2), 121–131. <https://doi.org/10.26807/remcb.v35i1-2.255>

Torres, J. (septiembre, 2020). *Informe Determina Afectaciones a la Laguna de Yahuarcocha en Ibarra*. Prensa. Ec. <https://prensa.ec/2020/09/19/informe-determina-afectaciones-ala-laguna-de-yahuarcocha-en-ibarra/>

Torres, P., Cruz, C., y Patiño, P. (2009). *Índices de Calidad de Agua en Fuentes Superficiales Utilizadas en la Producción de Agua. Una Revisión Crítica*. Revista Ingenierías Universidad de Medellín. 8 (15).79-94. <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v8n15s1/v8n15s1a09.pdf>

Urrutia, R. (2014). *Eutrofización y Floraciones Algales*. Centro EULA, Chile.

Van-Colen, W., Portilla, K., Oña, T., Wyseure, G., Goethals, P., Velarde, E., y Muylaert, K.. (2017). *Limnology of the Neotropical High Elevation Shallow Lake Yahuarcocha (Ecuador) and Challenges for Managing Eutrophication Using Biomanipulation*. *Limnologica*, 67, 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2017.07.008>

- Vera, M., Hernández, P., Alcocer, J., Ardiles J. y Oseguera, L. (2021). *Concentración y distribución vertical de la clorofila-a fitoplanctónica en los lagos de Montebello, Chiapas*. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, A.P. 70-305, DF 04510
- Verdezoto, C. (2018). *Transformación del Paisaje de la Laguna de Yahuarcocha Mediante la Incorporación de Infraestructuras de Depuración de Aguas*. (Tesis pregrado). Universidad Central del Ecuador.
- Vitta, Y., Fernández, A., y Campíns, P. (2009). *Determinación Selectiva de Clorofila a Por Fluorescencia Molecular Bistua*: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas, vol. 7, núm. 1, 2009, pp. 1-11 Universidad de Pamplona Pamplona, Colombia.
- Yépez, L. (2016). *Evaluación de la Incidencia de las Actividades Turísticas que Alteran la Calidad del Agua del Sistema Lacustre Yahuarcocha, para Establecer Estrategias de Mitigación y Prevención*. [Tesis de Maestría]. Universidad Técnica del Norte. Ecuador
- Zarzosa-González, H. J. y Aragonese-López, S. (2020). *Fundamentos de Ingeniería Ambiental y del Agua*. Madrid, Dextra Editorial. Recuperado de <https://elibro.net/es/ereader/utnorte/148270?page=56>

## Anexo A

### Anexo A1. Prueba estadística de normalidad

Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk)			
	Estadístico	Gl	p-valor
Chl "a"	0.937	15	0.343
NDVI	0.833	15	0.010

### Anexo A2. Correlación Spearman

			NDVI	Chl "a"
Rho de Spearman	NDVI	Coefficiente de correlación	1.000	-0.568*
		Sig. (bilateral)		0.027
		N	15	15
Chl "a"	NDVI	Coefficiente de correlación	-0.568*	1.000
		Sig. (bilateral)	0.027	
		N	15	15

Nota: \* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).



### Anexo A3. Estimación del índice de calidad de agua

Parámetro	Valor	Unidades	Sub	W	Total
pH	8,82	adimensional	58	0.2	6.96
Temperatura	0.8	°C	89	0.10	8.9
Turbidez	54.9	NTU	31	0.08	2.48
Oxígeno Disuelto	114.8	% saturación	92	0.7	15.64
DBO5	127	mgO2/l	2	0.10	0.2
Fosfatos	8.1	mg/l	8	0.10	0.8
Nitratos	5	mg/l	43	0.10	0.8
Sólidos Totales	4.69	mg/l	80	0.08	6.4
Coliformes Fecales	MNPC	mg/l	3	0.15	0.45
Valor del ICA					50.63

Fuente: Rivera (2021)

## Anexo B

### Anexo B1. Respuesta al oficio de Solicitud de información de EMAPA-I

 **EMAPA-I** EMPRESA PÚBLICA MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE IBARRA 

**Oficio Nro. EMAPAI-GG-2021-1027-OF**  
**Ibarra, 29 de julio de 2021**

Señor  
Paúl Arias  
Coordinador Carrera (E)  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y  
AMBIENTALES UNIVERSIDAD TECNICA DEL NORTE**  
Presente:

De mi consideración:

En respuesta a Oficio No.UTN-FICAYA-CIRNR-2021-423-O, presentado por el Señor Paúl Arias en el que solicita información de los últimos 4 años del análisis de la calidad de agua del LAGO DE YAHUARCOCHA; al respecto de acuerdo a informe de la Dirección Técnica se adjuntan los informes solicitados.

Con sentimientos de distinguida consideración.

Atentamente,

*Documento firmado electrónicamente*  
Msc. Reinaldo Pablo Díaz Játiva  
**GERENTE GENERAL**

Referencias:  
- EMAPAI-A-2021-1249-EX

Copia:  
Ingeniera  
Lili Cazar  
**Secretaría General.**

bc

Casilla 754 / Ibarra Ecuador [www.emapaibarra.gob.ec](http://www.emapaibarra.gob.ec)  
Dirección: Sucre 7-77 y Pedro Moncayo Telf. 06) 2951 670 – 2957 965

\* Documento generado por Quijux

1/1

**Anexo B2. Reporte de análisis fisicoquímicos de EMAPA-I**



**LABORATORIO EMAPA-I**

<b>INFORME DE ENSAYO DE AGUA RESIDUAL</b>		<b>FMC2306-01</b>
Informe de Ensayo Nro: IECE17-044		Pág. 1 de 2
Cliente: Gobierno Autónomo Descentralizado de San Miguel de Ibarra		
Dirección: Sucre 7-77 y Pedro Moncayo		
Fecha de recepción: 30 de Mayo del 2017		
Identificación muestra: Muestra tomada en el punto de muestreo vuelta de la paloma - Laguna de Yahuarcocha		
Fecha de realización de ensayos: 30/05/2017 - 05/06/2017	Fecha de emisión de informe: 13 de Mayo del 2017	
Tipo de muestra: Cruda		
Cod. Lab: FS/N		

**REPORTE DE ANÁLISIS FÍSICOS**

PARÁMETROS	Unidades	RESULTADOS	Valores de Referencia <sup>1</sup>	Método del Ensayo
Color**	Pt-Co	> 50	N/A	SM 2120B
pH in situ**	upH	8,86	6,5 - 8,3	SM 4500-H <sup>+</sup> B
Temperatura in situ**	°C	21,3	< 40	SM 2550 B
Profundidad**	m	4,87	N/A	
Disco secchi **	m	0,4	2	
Conductividad**	uS/cm	566,0	N/A	SM 2510B
Sólidos disueltos totales (TDS)**	mg/l	300,00	N/A	SM 2510A
Turbiedad**	NTU	25,5	N/A	SM 2130B

**REPORTE DE ANÁLISIS QUÍMICOS**

PARÁMETROS	Unidades	RESULTADOS	Valores de Referencia <sup>1</sup>	Método del Ensayo
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	38,0	40	PEE-EMAPA-I-003 (Método HACH 8000)



Demanda Biológica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )**	mg/l	-	20	SM 5210
Nitratos**	mg/l	0,10	13	Método HACH 8039
Fosfatos**	mg/l	0,11	N/A	Método HACH 8048
Clorofila**	ug/l	55,74	N/A	SM 10200I
Índice de Estado Trófico (TSI)**	-	69,50	N/A	

Incertidumbre del Método (K=2)				Condiciones Ambientales	
Parámetro	Unidades	Nivel	Valor	Temperatura, °C	Humedad, %
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	25	EP	EP	EP
		50	EP		
		75	EP	EP	EP
		100	EP		

EP: En proceso de determinación

#### REPORTE DE ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS

PARÁMETROS	Unidades	RESULTADOS	Valores de Referencia <sup>1</sup>	Método del Ensayo
Coliformes totales**	ufc/100ml	380	2000 NMP/100 ml	SM 9222B
E. Coli**	ufc/100ml	0	200 NMP/100 ml	SM 9222B

N/A: No aplica

\*Observaciones:

\* Opiniones e interpretaciones están fuera del alcance de acreditación

Los ensayos marcados \*\* no están dentro del alcance de acreditación

Los resultados sólo se refieren a la muestra receptada y analizada. El Laboratorio EMAPA-I declina toda responsabilidad por el uso que se le de al presente documento.

Este informe no deberá reproducirse más que en su totalidad, previa autorización escrita del Laboratorio EMAPA-I.

<sup>1</sup> Valores de referencia tomados del TULSMA 2015. Tabla 6: Criterios de calidad de aguas para fines recreativos mediante contacto primario. Tabla 2: Criterios de calidad admisibles para la preservación de la vida acuática y silvestre en aguas dulces, marinas y estuarios.



Bq. Carla Valarezo  
JEFE DE LABORATORIO



Revisado R.T.:

f

## Anexo B3. Reporte de análisis fisicoquímicos de EMAPA\_I 2021



<b>INFORME DE ENSAYO</b>		FIR 7.8-01 Revisión 02
Informe de Ensayo Nro: IEPE21-303		Pág. 1 de 2
Cliente: Alexandra Sanchez Dirección: Quinta El Olivo		
Fecha de recepción: 26 de Julio del 2021	Toma de muestra realizada por: El Cliente	
Identificación muestra cliente: Punto 1		
Tipo de muestra: Agua Cruda		
Código de Laboratorio: MEC21-020	Lugar de análisis: Laboratorio EMAPA-I	
Fecha de realización de ensayos: 26/07/2021 - 02/08/2021	Fecha de emisión informe: 06 de Agosto del 2021	

### REPORTE DE ANÁLISIS FÍSICOS

PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS		Incertidumbre expandida con K=2	<sup>(1)</sup> CRITERIO DE CALIDAD
			MEC21-020			
pH / Temp. de medición	PEE-EMAPA-I-01 SM 4500-H+B	upH / °C	8,92	22,6	N/A	6,5 - 9
Turbiedad (*)	Standard Methods 2130B	NTU	68		N/A	-
Conductividad (*)	Standard Methods 2510B	uS/cm	567		N/A	-
Sólidos Totales (*)	Standard Methods 2540B	mg/l	415		N/A	-

### REPORTE DE ANÁLISIS QUÍMICOS

PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS		Incertidumbre expandida con K=2	<sup>(1)</sup> CRITERIO DE CALIDAD
			MEC21-020			
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> ) (*)	Standard Methods 5210 D	mg / l	17		N/A	20

### REPORTE DE ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS

PARÁMETROS ANALIZADOS	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS		Incertidumbre expandida con K=2	<sup>(1)</sup> CRITERIO DE CALIDAD
			MEC21-020			
Coliformes Totales (*)	Standard Methods 9222 J	UFC/100ml	228		N/A	-



**INFORME DE ENSAYO**

 FIR 7.8-01  
 Revisión 02

**Informe de Ensayo Nro:** IEPE21-303

Pág. 2 de 2

Condiciones Ambientales de Análisis				
Área	Temperatura (C°)		Humedad (%)	
	Inicial	Final	Inicial	Final
Físicos	24,0	24,0	48	48
Químicos	25,0	25,0	43	43
Microbiológicos	22,8	22,8	54	54

**INCERTIDUMBRE DE LOS RESULTADOS**

La incertidumbre expandida de los resultados se ha estimado con un factor de cobertura K=2 que corresponde a un nivel de confianza de aproximadamente 95%

**OBSERVACIONES:**

N/A. No aplica

**CONSIDERACIONES:**

Los ensayos marcados con (\*) están fuera del Sistema de Gestión del Laboratorio bajo la norma NTE-INEN ISO/IEC 17025:2018  
 El laboratorio no emite declaraciones de conformidad


Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo

Los resultados sólo se refieren a la muestra receptada y analizada. El Laboratorio EMAPA-I declina toda responsabilidad por el uso que se le de al presente documento.

Este informe no deberá reproducirse más que en su totalidad, previa autorización escrita del Laboratorio EMAPA-I.

La temperatura que se reporta con el valor de pH corresponde a la temperatura de la muestra al momento de la medición y no representa el resultado de un ensayo específico de temperatura

<sup>1</sup>Valores de referencia tomados del AM097A ANEXO 1 TULSMA 2015. Tabla No 2. "CRITERIOS DE CALIDAD ADMISIBLES PARA LA PRESERVACIÓN DE LA VIDA ACUÁTICA EN AGUAS DULCES, MARINAS Y DE ESTUARIOS

Revisado por:	
---------------	---



Bq. Carla Valarezo  
**JEFE DE LABORATORIO**



## Anexo B4. Reporte de análisis fisicoquímicos de LASA 2021



### INFORME DE RESULTADOS

INF.LASA-05-08-21-3411  
ORDEN DE TRABAJO No. 21-3636

INFORMACIÓN DEL CLIENTE		
<b>SOLICITADO POR:</b> QUIMBIAMBA MOPOSA NELLY PATRICIA		<b>DIRECCIÓN:</b> TABACUNDO
<b>TELÉFONO/FAX:</b> 062580741	<b>TIPO DE MUESTRA:</b> AGUA	<b>PROCEDENCIA:</b> PUNTO 1 BOMBEROS (LAGO YAGUARCOCHA)
<b>IDENTIFICACIÓN:</b> AGUA NATURAL 9:10		<b>CODIGO INICIAL:</b> M1 – <b>FECHA DE TOMA DE MUESTRA:</b> 26/07/2021 – <b>COORDENADAS:</b> 17+82270641665

*Información suministrada por el cliente*

INFORMACIÓN DEL LABORATORIO		
<b>MUESTREO POR:</b> SOLICITANTE	<b>FECHA DE MUESTREO:</b> -	<b>INGRESO AL LABORATORIO:</b> 27/07/2021
<b>FECHA DE ANÁLISIS:</b> 27/06-05/08/2021	<b>FECHA DE ENTREGA:</b> 05/08/2021	<b>NÚMERO DE MUESTRAS:</b> Una (1)
<b>CÓDIGO DE MUESTRA:</b> 21-9663	<b>REALIZACIÓN DE ENSAYOS:</b> LABORATORIO	

### ANÁLISIS FÍSICO - QUÍMICO

ITEM	PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	<sup>1</sup> VALORES DE REFERENCIA	INCERTIDUMBRE U (k=2)	MÉTODO DE ENSAYO
1	OXIGENO DISUELTO	%	90,7	>80	-	<sup>b</sup> Polarográfico - APHA 4500 O G *

Los ensayos marcados con \* NO están incluidos en el alcance de acreditación del SAE

Los ensayos marcados con (b) NO están incluidos en el alcance de acreditación de A2LA.

<sup>(1)</sup> Valores de referencia tomado de Acuerdo Ministerial N° 097, Libro VI de la Calidad Ambiental. Tabla 2: Criterios de calidad admisibles para la preservación de la vida acuática y silvestre en agua dulce.

QUÍM. PABLO SAAVEDRA  
JEFE DE DEPARTAMENTO

Prohibida la reproducción parcial por cualquier medio sin permiso por escrito del laboratorio.

LASA se responsabiliza exclusivamente del resultado correspondiente a los ensayos en la muestra recibida en el laboratorio

Los criterios de conformidad serán emitidos solamente si el cliente lo solicita por escrito.

El laboratorio se compromete con la Imparcialidad y Confidencialidad de la información y los resultados (la aceptación de este informe implica la aceptación de la política relativa al tema y declarada en [www.laboratoriolasa.com](http://www.laboratoriolasa.com))

Pág. 1 de 1

Juan Ignacio Pareja Oe5-97 y Simón Cárdenas | [clientes@laboratoriolasa.com](mailto:clientes@laboratoriolasa.com)  
(02) 2269012 | (02) 2468659 | 0995707705

## INFORME DE RESULTADOS

INF.LASA-05-08-21-3412  
ORDEN DE TRABAJO No. 21-3636

INFORMACIÓN DEL CLIENTE		
SOLICITADO POR: QUIMBIAMBA MOPOSA NELLY PATRICIA		DIRECCIÓN: TABACUNDO
TELÉFONO/FAX: 062580741	TIPO DE MUESTRA: AGUA	PROCEDENCIA: PUNTO 2 PALOMA (LAGO YAGUARCOCHA)
IDENTIFICACIÓN: AGUA NATURAL 9:30		CODIGO INICIAL: M2 – FECHA DE TOMA DE MUESTRA: 26/07/2021 – COORDENADAS: 17+82384041524

*Información suministrada por el cliente*

INFORMACIÓN DEL LABORATORIO		
MUESTREO POR: SOLICITANTE	FECHA DE MUESTREO: -	INGRESO AL LABORATORIO: 27/07/2021
FECHA DE ANÁLISIS: 27/06-05/08/2021	FECHA DE ENTREGA: 05/08/2021	NÚMERO DE MUESTRAS: Una (1)
CÓDIGO DE MUESTRA: 21-9664	REALIZACIÓN DE ENSAYOS: LABORATORIO	

### ANÁLISIS FÍSICO - QUÍMICO

ITEM	PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	<sup>1</sup> VALORES DE REFERENCIA	INCERTIDUMBRE U (k=2)	MÉTODO DE ENSAYO
1	OXIGENO DISUELTO	%	98,9	>80	-	<sup>b</sup> Polarográfico - APHA 4500 O G *

Los ensayos marcados con \* NO están incluidos en el alcance de acreditación del SAE

Los ensayos marcados con (b) NO están incluidos en el alcance de acreditación de A2LA.

<sup>(1)</sup> Valores de referencia tomado de Acuerdo Ministerial N° 097, Libro VI de la Calidad Ambiental. Tabla 2: Criterios de calidad admisibles para la preservación de la vida acuática y silvestre en agua dulce.



QUÍM. PABLO SAAVEDRA  
JEFE DE DEPARTAMENTO

Prohibida la reproducción parcial por cualquier medio sin permiso por escrito del laboratorio.

LASA se responsabiliza exclusivamente del resultado correspondiente a los ensayos en la muestra recibida en el laboratorio

Los criterios de conformidad serán emitidos solamente si el cliente lo solicita por escrito.

El laboratorio se compromete con la Imparcialidad y Confidencialidad de la información y los resultados (la aceptación de este informe implica la aceptación de la política relativa al tema y declarada en [www.laboratoriolasa.com](http://www.laboratoriolasa.com))

Pág. 1 de 1

## INFORME DE RESULTADOS

INF.LASA-05-08-21-3413  
ORDEN DE TRABAJO No. 21-3636

INFORMACIÓN DEL CLIENTE		
SOLICITADO POR: QUIMBIAMBA MOPOSA NELLY PATRICIA		DIRECCIÓN: TABACUNDO
TELÉFONO/FAX: 062580741	TIPO DE MUESTRA: AGUA	PROCEDENCIA: PUNTO 3 ENTRADA (LAGO YAGUARCOCHA)
IDENTIFICACIÓN: AGUA NATURAL 10:00		CODIGO INICIAL: M3 – FECHA DE TOMA DE MUESTRA: 26/07/2021 – COORDENADAS: 17+82175841595

*Información suministrada por el cliente*

INFORMACIÓN DEL LABORATORIO		
MUESTREO POR: SOLICITANTE	FECHA DE MUESTREO: -	INGRESO AL LABORATORIO: 27/07/2021
FECHA DE ANÁLISIS: 27/06-05/08/2021	FECHA DE ENTREGA: 05/08/2021	NÚMERO DE MUESTRAS: Una (1)
CÓDIGO DE MUESTRA: 21-9665	REALIZACIÓN DE ENSAYOS: LABORATORIO	

### ANÁLISIS FÍSICO - QUÍMICO

ITEM	PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	<sup>1</sup> VALORES DE REFERENCIA	INCERTIDUMBRE U (k=2)	MÉTODO DE ENSAYO
1	OXIGENO DISUELTO	%	107,0	>80	-	<sup>b</sup> Polarográfico - APHA 4500 O G *

Los ensayos marcados con \* NO están incluidos en el alcance de acreditación del SAE.

Los ensayos marcados con (b) NO están incluidos en el alcance de acreditación de A2LA.

<sup>(1)</sup> Valores de referencia tomado de Acuerdo Ministerial N° 097, Libro VI de la Calidad Ambiental. Tabla 2: Criterios de calidad admisibles para la preservación de la vida acuática y silvestre en agua dulce.



QUÍM. PABLO SAAVEDRA  
JEFE DE DEPARTAMENTO

Prohibida la reproducción parcial por cualquier medio sin permiso por escrito del laboratorio.

LASA se responsabiliza exclusivamente del resultado correspondiente a los ensayos en la muestra recibida en el laboratorio.

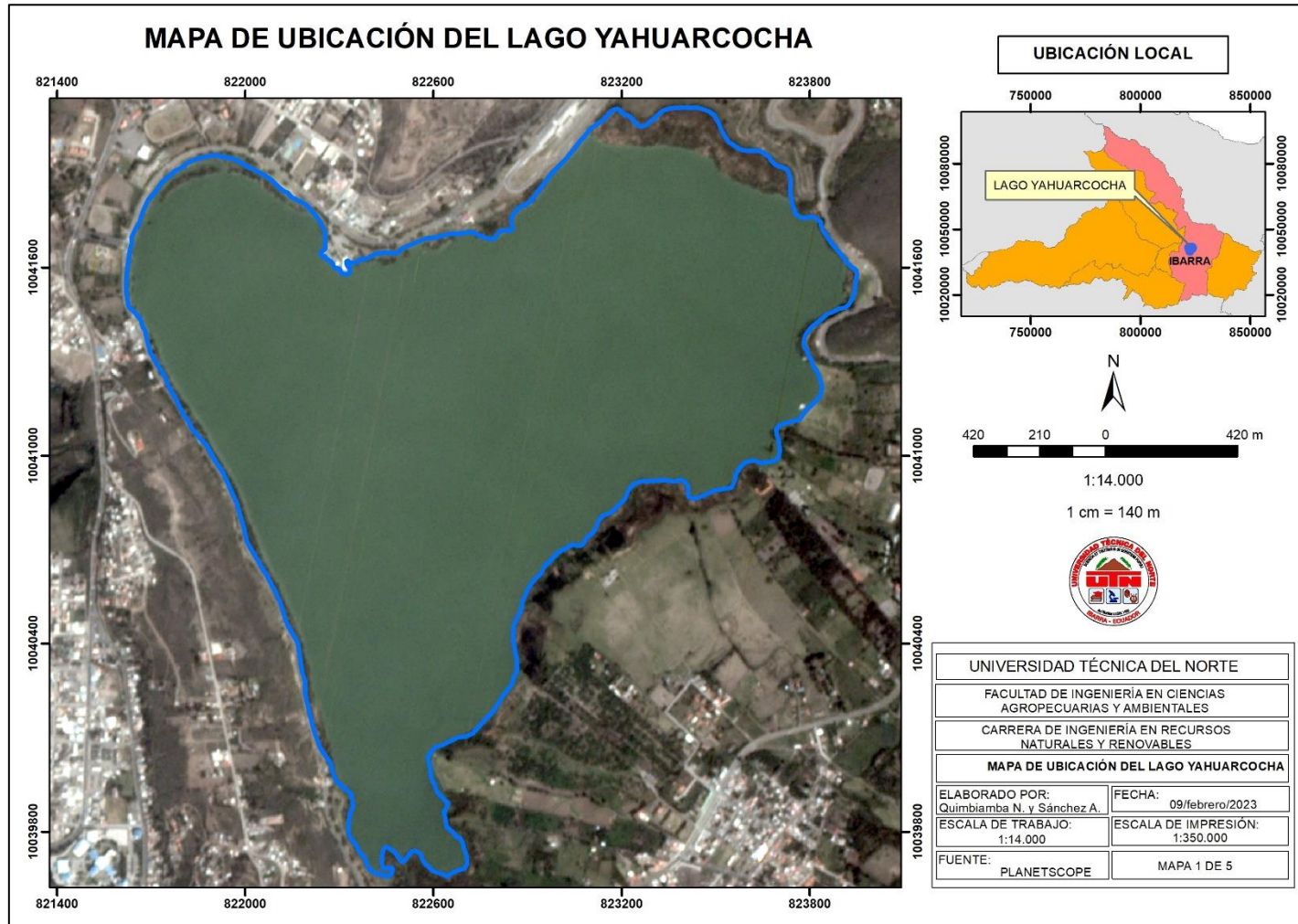
Los criterios de conformidad serán emitidos solamente si el cliente lo solicita por escrito.

El laboratorio se compromete con la Imparcialidad y Confidencialidad de la información y los resultados (la aceptación de este informe implica la aceptación de la política relativa al tema y declarada en [www.laboratoriolasa.com](http://www.laboratoriolasa.com))

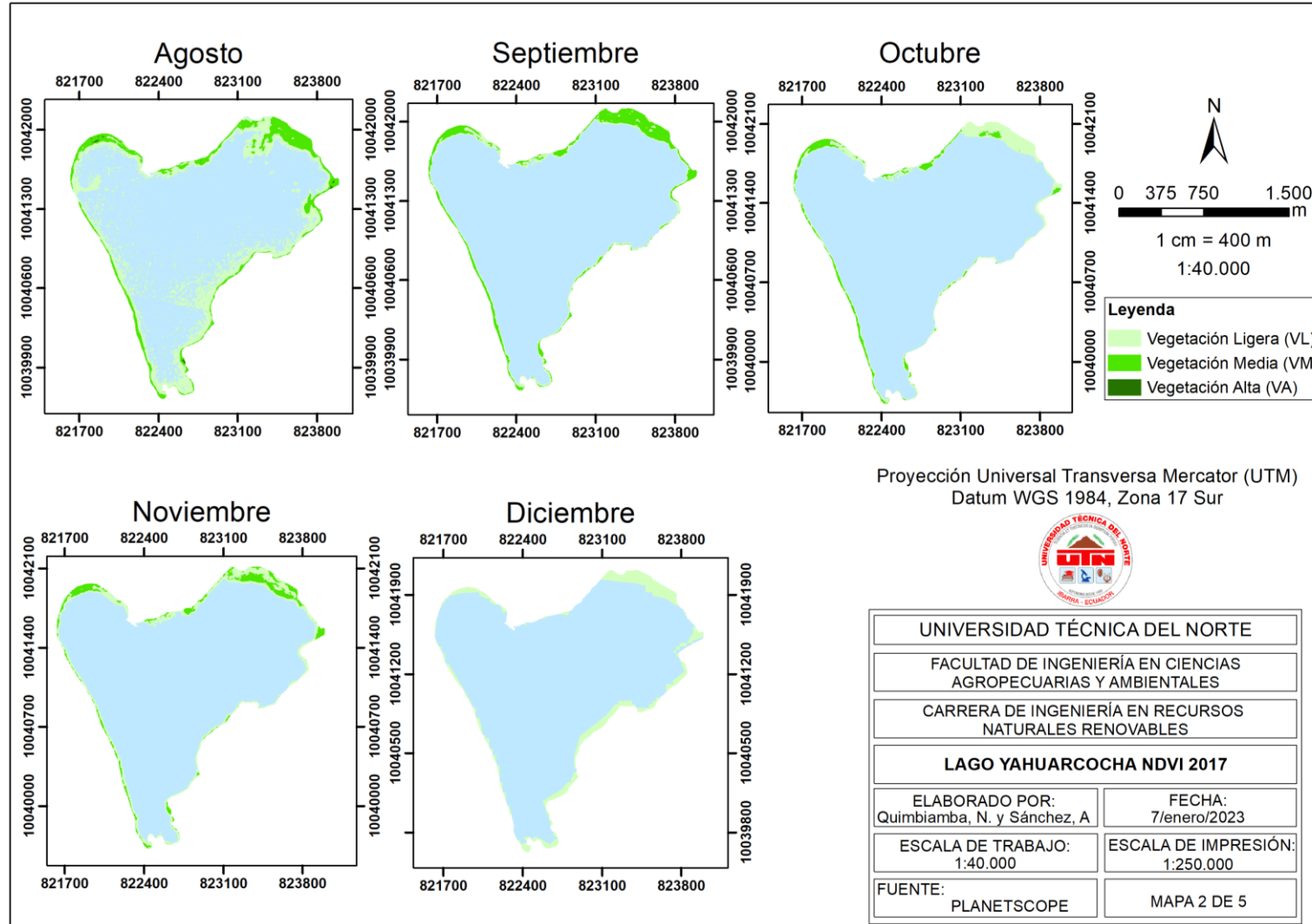
Pág. 1 de 1

## Anexo C

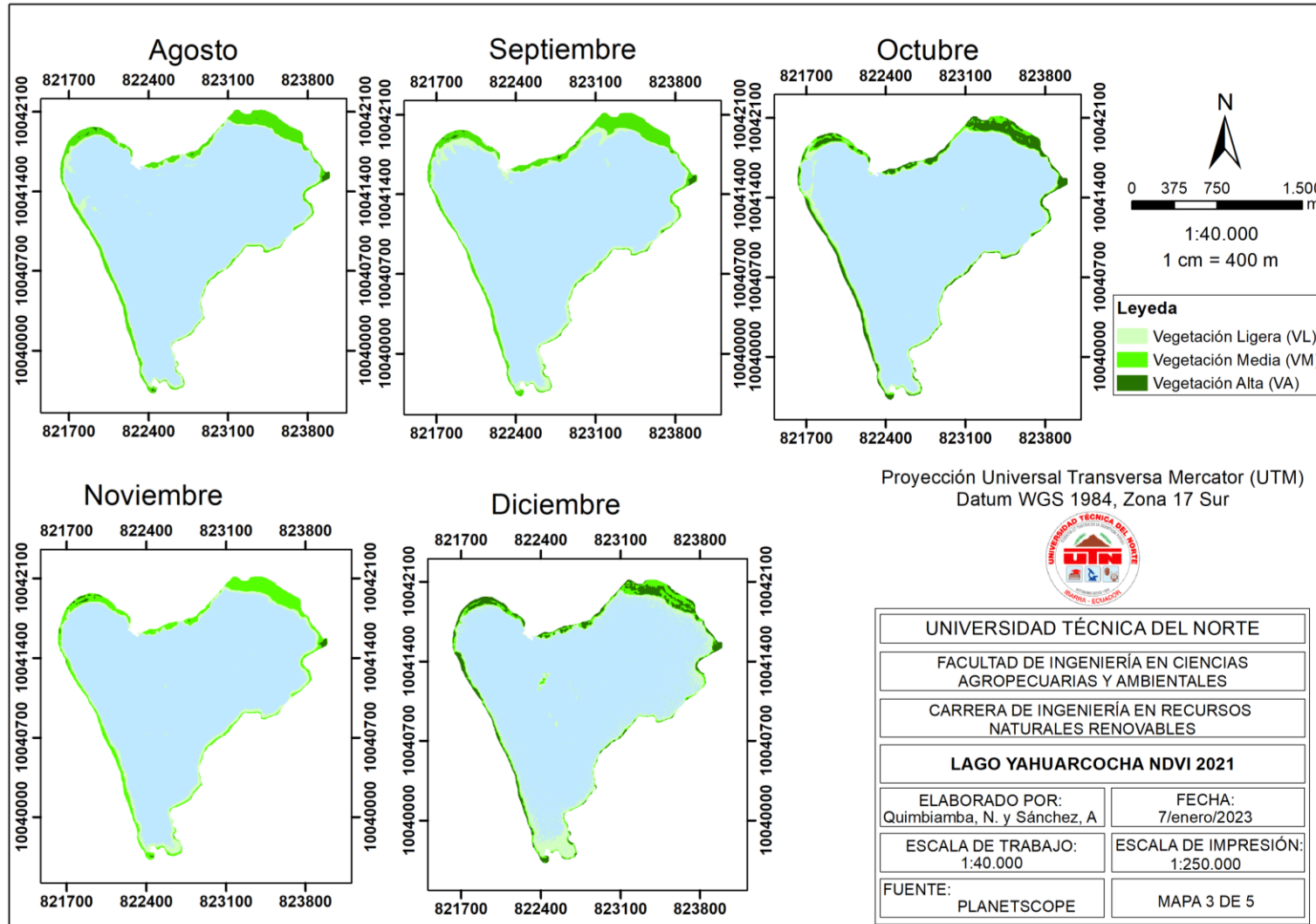
### Anexo C1. Mapa de Ubicación del lago Yahuarcocha



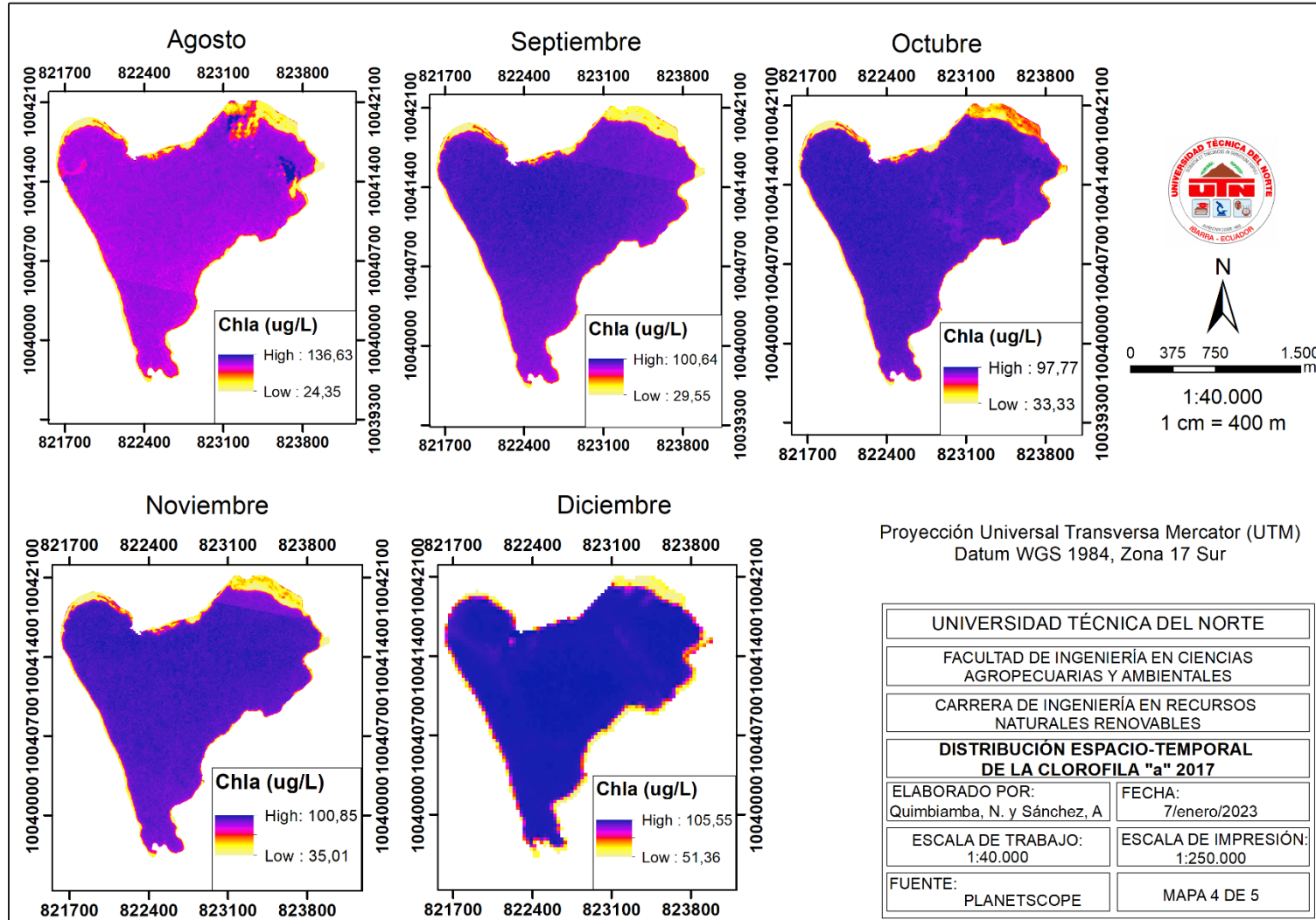
Anexo C2. Mapa del índice de vegetación del año 2017 del Lago Yahuarcocha



Anexo C3. Mapa del índice de vegetación del año 2021 del Lago Yahuarcocha



Anexo C4. Mapa de distribución espacio-temporal de la clorofila "a" del año 2017 del lago Yahuarcocha





Anexo C5. Mapa de distribución espacio-temporal de la clorofila "a" del año 2021 del lago Yahuarcocha

