



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**  
**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**  
**ESCUELA DE BIOLOGÍA**

**ESTADO TRÓFICO DE LAGUNAS DEL MACIZO DEL CAJAS, SUR DEL  
ECUADOR EN BASE A LA CLOROFILA A, B Y C**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:  
**BIÓLOGO CON MENCIÓN EN ECOLOGÍA Y GESTIÓN**

**Autora:**

Nicole Sánchez

**Director:**

Blgo. Edwin Zárate

**Cuenca – Ecuador**

**2024**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo va dedicado a absolutamente toda mi familia, en especial a mi mamá y mis dos papás que se encargaron de forjar un camino correcto para mi vida, por nunca soltarme en la adversidad y convertirme en la persona que soy hoy. A ellos les estaré eternamente agradecida.

También quiero dedicar este trabajo a todas las personas que han sido parte de mi vida y de todo este largo proceso. Mis compañeros de clase, hicieron que la carrera fuera un poco más sencilla y amena. Gracias por convertirse en grandes amigos. A mi pareja que siempre me motivó a llegar hasta el final y me dio su apoyo total. Y, por último, al doctor Ivan Pinzón que me mantuvo cuerda y mi mano nunca soltó. A todos ellos un espacio en mi corazón.

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero empezar expresando toda mi gratitud a todas las personas que aportaron de cualquier manera en la elaboración del trabajo.

A la Universidad del Azuay y Escuela de biología por contribuir en mi educación y ser un sitio seguro para mí durante todos estos años.

A mi tutor, Edwin Zarate, por darme un gran proyecto de titulación, confiar en mi capacidad para realizarlo y el compromiso que mantuvo conmigo. Gracias a su apoyo logré superar obstáculos dentro del trabajo.

A aquellos profesores de la escuela de Biología, siendo otra parte esencial de mi formación como bióloga, y a Andrés Perez por la retroalimentación dada como parte del tribunal de mi trabajo de titulación.

Por último, al laboratorio de Limnología de la UDA que aportó con información y datos necesarios y útiles en la etapa de elaboración experimental del proyecto. Al laboratorio de química de la UDA por ayudarnos en el análisis de los resultados, y al IRSE por colaborar en la elaboración de la cartografía.

## ÍNDICE

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO	3
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
Objetivos	10
METODOLOGÍA	11
1.1. Área de estudio	11
1.2. Procedimiento	13
1.3. Análisis de datos	14
RESULTADOS	16
2.1. Identificación de cuerpos lagunares	16
2.2. Niveles de producción de clorofilas a, b y c	18
2.3. Correlación de niveles de clorofilas con Nutrientes	21
DISCUSIÓN	23
3.1. Niveles de producción de clorofilas a, b y c	23
3.2. Correlación de niveles de clorofilas con factores físico-químicos	27
CONCLUSIONES	29
RECOMENDACIONES	30
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31
ANEXOS	36
Anexo 1. Resultados parciales por muestreo o réplica	36

## Índice de tablas

Tabla 1. Ubicación de las lagunas estudiadas.	12
Tabla 2. Fechas correspondientes a las réplicas	13
Tabla 3. Dimensiones superficiales de cuerpos lagunares	16
Tabla 4. Factores físico-químicos de las lagunas estudiadas. Nitratos( $NO_3^-$ ), Fosfatos ( $PO_4^{3-}$ ), Temperatura (T), Conductividad Eléctrica (CE), pH, Sólidos Disueltos Totales (SDT) y Oxígeno Disuelto (OD)	16
Tabla 5. Descriptivos de la concentración ( $\mu g/l$ ) de clorofilas a, b y c según réplicas	18
Tabla 6. Significancia de la presencia de Nitratos y Fosfatos en el agua de las diferentes lagunas del Macizo del Cajas.	21
Tabla 7. Resultados parciales del primer muestreo	36
Tabla 8. Resultados parciales del segundo muestreo	37

## Índice de figuras

Figura 1. Mapa del área de estudio referido a la Reserva de Biosfera del Macizo del Cajas y provincias que lo contienen	12
Figura 2. Comparación de niveles de Clorofila a por laguna	19
Figura 3. Comparación de niveles de Clorofila b por laguna	20
Figura 4. Comparación de niveles de Clorofila c por laguna	21

## **Estado trófico según variación de clorofilas a, b y c en 10 lagunas del Macizo del Cajas, Sur del Ecuador.**

### **RESUMEN**

Los cuerpos de agua dulce son fuentes importantes de recursos hídricos, sin embargo, están sujetos a eutrofización, un proceso causado por el aumento excesivo de nutrientes y la consecuente proliferación de algas. El presente estudio investigó los niveles de clorofila a, b y c, en diez lagunas del Macizo del Cajas, la cual fue medida a través de espectrofotometría UV visible, mediante el método monocromático y tricromático. Se observaron variaciones en los factores físico-químicos y niveles de clorofila. La mayor presencia de clorofilas se encontró en la laguna Verdecocha. Se encontró correlación significativa entre nitratos y clorofila a en las lagunas Dublas, Jigeno y Verdecocha; mientras que, la correlación entre fosfatos y clorofila fue significativa en Dublas, Estrellascocha, Jigeno, Taitachugo y Verdecocha. En conclusión, la variabilidad en los niveles de clorofila y factores físico-químicos en las lagunas del Macizo del Cajas subraya la heterogeneidad del estado trófico y ecológico de estos ecosistemas acuáticos.

**Palabras clave:** Estado trófico, Lagunas, Clorofila, Factores físico-químicos, Macizo del Cajas.



Edwin Zarate  
Director de tesis



Danilo Minga, MSc  
Director de Escuela



Nicole Sánchez  
Autora

**Trophic status according to variation of chlorophylls a, b and c in 10 lagoons in the Cajas Massif, southern Ecuador.**

**ABSTRACT**

Freshwater bodies are important water resources, however, they are subject to eutrophication, a process caused by the excessive increase of nutrients and the consequent proliferation of algae. The present study investigated the levels of chlorophyll a, b and c, in ten lagoons of the Cajas Massif, which were measured by UV visible spectrophotometry, using the monochromatic and trichromatic method. Variations in physicochemical factors and chlorophyll levels were observed. The highest presence of chlorophyll was found in the Verdecocha lagoon. Significant correlation between nitrates and chlorophyll a was found in Dublas, Jigeno and Verdecocha lagoons; while, the correlation between phosphates and chlorophyll was significant in Dublas, Estrellascocha, Jigeno, Taitachugo and Verdecocha. In conclusion, the variability in chlorophyll levels and physicochemical factors in the lagoons of the Cajas Massif underlines the heterogeneity of the trophic and ecological status of these aquatic ecosystems.

**Keywords:** Trophic state, Lagoons, Chlorophyll, Physical-chemical factors, Cajas Massif.



Edwin Zarate  
Thesis director



Danilo Minga, MSc  
School director



Nicole Sánchez  
Author

## INTRODUCCIÓN

La calidad del agua es un tema de gran importancia para el bienestar humano y el medio ambiente. Los cuerpos de agua dulce, como los lagos y las lagunas, son fuentes importantes de recursos hídricos y sustentan diversos ecosistemas acuáticos. Sin embargo, estos cuerpos de agua están sujetos a la eutrofización, un proceso natural o antropogénico causado por el aumento excesivo de nutrientes y la consecuente proliferación de algas y otras plantas acuáticas (Kasavan et al., 2021). La eutrofización puede provocar cambios significativos en la calidad del agua y en la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos, así como generar problemas para la salud humana y el uso recreativo del agua (Alexander et al., 2017).

De acuerdo con Mineeva (2022), el problema del agua dulce y la evaluación del estado ecológico de los ríos, lagos y embalses son agudos para la humanidad en la era del estrés antropogénico y el cambio climático global. El aumento de la temperatura se considera un factor de eutrofización que modifica la disponibilidad de nutrientes, promueve un aumento de la carga interna de fósforo y también estimula la abundante y prolongada vegetación de cianoprocariotas (algas verdeazuladas) y otros productores primarios en cuerpos de agua.

El estado trófico de un cuerpo de agua se relaciona con la cantidad de nutrientes presentes en el agua y su influencia en la productividad biológica del ecosistema acuático. Es importante evaluar el estado trófico de los cuerpos de agua mediante indicadores como la concentración de clorofila (Chl), el nivel de oxígeno disuelto y la transparencia del agua (Bennett et al., 2021). Un alto estado trófico o de eutrofización, indica niveles elevados de nutrientes como nitrógeno y fósforo, lo que puede llevar a un crecimiento excesivo de fitoplancton, afectando la calidad del agua y la vida acuática. La eutrofización, causada por actividades humanas y factores naturales, es un importante factor de estrés ambiental en los ecosistemas de agua dulce. Por otro lado, los cuerpos de agua con un bajo estado trófico tienen pocos nutrientes y una menor productividad biológica, lo que se asocia con ambientes acuáticos más claros y menos poblados por plantas y organismos acuáticos. Estos cuerpos de agua oligotróficos suelen tener mejor calidad del agua y una vida acuática más diversa y saludable (Pereira-Ibarra y López-Monroy, 2021). Mantener un equilibrio adecuado en el estado trófico de los cuerpos de



agua es esencial para preservar su salud y sostenibilidad a largo plazo (Chaurasia y Gupta, 2016; Custodio y Chávez, 2019).

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) establece valores referenciales de clorofila para determinar el estado trófico de los cuerpos de agua. Según la OCDE, valores de *clorofila a* (Chl a) entre 8 y 25 µg/L generalmente corresponden a lagos eutróficos, caracterizados por una alta concentración de nutrientes y una abundante presencia de fitoplancton, en tanto que los cuerpos de agua hipertróficos superan los 25 µg/L. En contraste, los lagos mesotróficos, que presentan un nivel intermedio de productividad, generalmente muestran valores de clorofila a de 2,5 µg/L a 7,9 µg/L; los lagos oligotróficos, conocidos por su baja productividad y claridad del agua, suelen contener niveles de clorofila de 1–2,5 µg/L, mientras que los ultraoligotróficos son aquellos con niveles de clorofila a inferiores a 1 µg/L (Janus y Vollenwelder, 1981).

La Chl a es un indicador crucial para evaluar la cantidad de biomasa fitoplanctónica y el estado trófico de los cuerpos de agua (Muciño-Márquez et al., 2017). Su medición representa la biomasa de algas en lagos de agua dulce y es utilizada por responsables institucionales para monitorear la calidad del agua y la productividad del lago. Sin embargo, las concentraciones de clorofila a en los lagos dependen de múltiples factores, como los aportes de nutrientes, el régimen de mezcla, la profundidad, el clima y las actividades antropogénicas (Filazzola et al., 2020).

La abundancia de fitoplancton y zooplancton son el resultado de un equilibrio del crecimiento *in situ*, influenciado por la temperatura, la luz y la disponibilidad de nutrientes, y los procesos de pérdida, como: hundimiento, pastoreo, parasitismo o lavado (Morales-Baquero et al., 2019). El lavado hidráulico juega un papel importante en la regulación de las poblaciones de plancton. Además, la biomasa, que representa la cantidad de materia orgánica en un ecosistema, es un indicador fundamental del estado trófico de un cuerpo de agua (Jachniak y Jagús, 2023).

Evaluar los impulsores clave de la eutrofización en lagos y embalses ha sido un desafío, y diversos estudios han desarrollado modelos empíricos para predecir la importancia relativa de estos factores, que pueden variar espacial y temporalmente (Liu et al., 2019; Wu et al., 2022). Por otro lado, las diferentes clorofilas, como Chl b y Chl c, son pigmentos fotosintéticos presentes en microorganismos y algas que absorben luz en

diferentes longitudes de onda, lo que también influye en el ecosistema acuático (Doddavarapu et al., 2021).

El análisis de las clorofilas a, b y c se ha convertido en una herramienta importante para la evaluación del estado trófico de los cuerpos de agua. Las clorofilas son pigmentos verdes presentes en las plantas y algas, que son esenciales para la fotosíntesis y la producción primaria en los cuerpos de agua. La concentración de clorofilas en el agua está relacionada con la cantidad de nutrientes disponibles, como nitrógeno y fósforo, que son esenciales para el crecimiento de las plantas y algas acuáticas. Por lo tanto, el análisis de las clorofilas puede ser utilizado como un indicador del estado trófico de un cuerpo de agua (Opiyo et al., 2019).

En los ambientes acuáticos, los organismos que realizan la fotosíntesis, denominados productores primarios, son cruciales para transformar la energía del sol en sustancias orgánicas. La cantidad de clorofilas en algas y plantas acuáticas sirve como un reflejo directo de su actividad fotosintética y, por ende, de su productividad. Las fluctuaciones en las concentraciones de clorofila a y b pueden indicar cómo estos productores primarios se adaptan y reaccionan ante variaciones en condiciones ambientales y disponibilidad de nutrientes. Estas adaptaciones y respuestas tienen implicaciones directas en la configuración y evolución de las redes tróficas de dichos ecosistemas acuáticos (Sarkar et al., 2021).

En este estudio se evalúan 10 lagunas altoandinas ubicadas en el Macizo del Cajas, Sur del Ecuador, mediante la medición de las clorofilas a, b y c. Con esta información y otras físico-químicas (FQ) registradas *in-situ* se realizan las interpretaciones del estado trófico de éstas.

## **Objetivos**

### ***Objetivo general***

Determinar el estado trófico de lagunas altoandinas a través de la medición de la clorofila en los páramos del Macizo del Cajas.

### ***Objetivos específicos***

- Determinar y clasificar los niveles de producción de clorofilas a, b y c en 10 lagunas seleccionadas del Macizo del Cajas.
- Determinar la correlación de los resultados de los niveles de clorofilas con factores físico-químicos del agua.

# CAPÍTULO I

## METODOLOGÍA

### 1.1. Área de estudio

El trabajo de investigación se realizó en 10 lagunas ubicadas en el Macizo del Cajas (MC), que se encuentra en la Cordillera Occidental del Sur del Ecuador, durante el período octubre de 2022 a marzo de 2023. El Macizo del Cajas se refiere a la unidad fisiográfica donde éste se ubica, caracterizado por ser una región montañosa extendida desde la depresión que se forma por el río Cañar ubicado al Norte, hasta el río Jubones en el Sur; es considerado como la quinta reserva de biósfera del Ecuador. La extensión territorial del MC abarca un total de 976.600,92 ha, de las cuales 892.161,52 ha corresponden a territorio continental y 88.439,40 ha a territorio marino; además, incluye en su extensión un total de 64 parroquias pertenecientes a las provincias de El Oro, Azuay, Cañar y Guayas (Ministerio del Ambiente, 2022).

El MC en el sur de Ecuador alberga una serie de lagunas que son fuentes vitales de agua para las comunidades locales y la vida silvestre. Estos cuerpos de agua, formados hace miles de años debido a procesos geológicos y glaciares, son ecosistemas frágiles y diversos, con especies de flora y fauna endémicas en peligro de extinción (Tenesaca, 2022). Además de su importancia para el suministro de agua, el Macizo del Cajas es reconocido a nivel mundial como una reserva de biosfera debido a su amplio rango altitudinal, que permite la existencia de diversos ecosistemas que brindan servicios ambientales cruciales para las comunidades del sur de Ecuador (Caldas, 2019).

El MC presenta una transición altitudinal, la cual parte desde 0 msnm en el Golfo de Guayaquil y llega hasta los 4.500 msnm en el Parque Nacional Cajas. Asimismo, tiene diversos tipos de ecosistemas desde los marino-costeros hasta los de montaña. Este estudio se centró en el ecosistema de páramo en donde se estima que el MC tiene más de 600 cuerpos de agua, por lo que el trabajo de investigación se enfocó en aquellos que se encuentran por encima de los 3.100 msnm. La temperatura en las zonas altas oscila entre -2°C y 18°C, y con precipitaciones anuales de 1.200 milímetros (mm) (Caldas, 2019). Respecto a la vegetación, existe predominancia de páramo herbáceo, páramo de almohadillas, herbazales lacustres y parches de bosques de Polylepis (Cárdenas y Macías, 2022).

El estudio recopila información de las siguientes lagunas del Macizo del Cajas:

Tabla 1. Ubicación de las lagunas estudiadas.

Laguna	Elevación	Longitud	Latitud
Chusalongo	3986 m	695.025,71	9.675.977,51
Dos Chorreras	3913 m	704.538,80	9.693.616,17
Dublas	3884 m	689.125,97	9.682.502,50
Estrellas Cocha	3813 m	694.256,18	9.677.003,55
Jigeno	3967 m	689.783,27	9.678.077,69
Luspa	3772 m	693.546,07	9.689.232,75
Patos	3966 m	691.402,50	9.678.975,48
Taita Chugo	3548 m	701.344,75	9.686.818,03
Toreadora	3917 m	697.426,16	9.692.618,70
Verdecocha	4037 m	704.581,96	9.688.587,70

**Zona 17 M**

En la Figura 1 se presenta la ubicación de cada una de las lagunas:

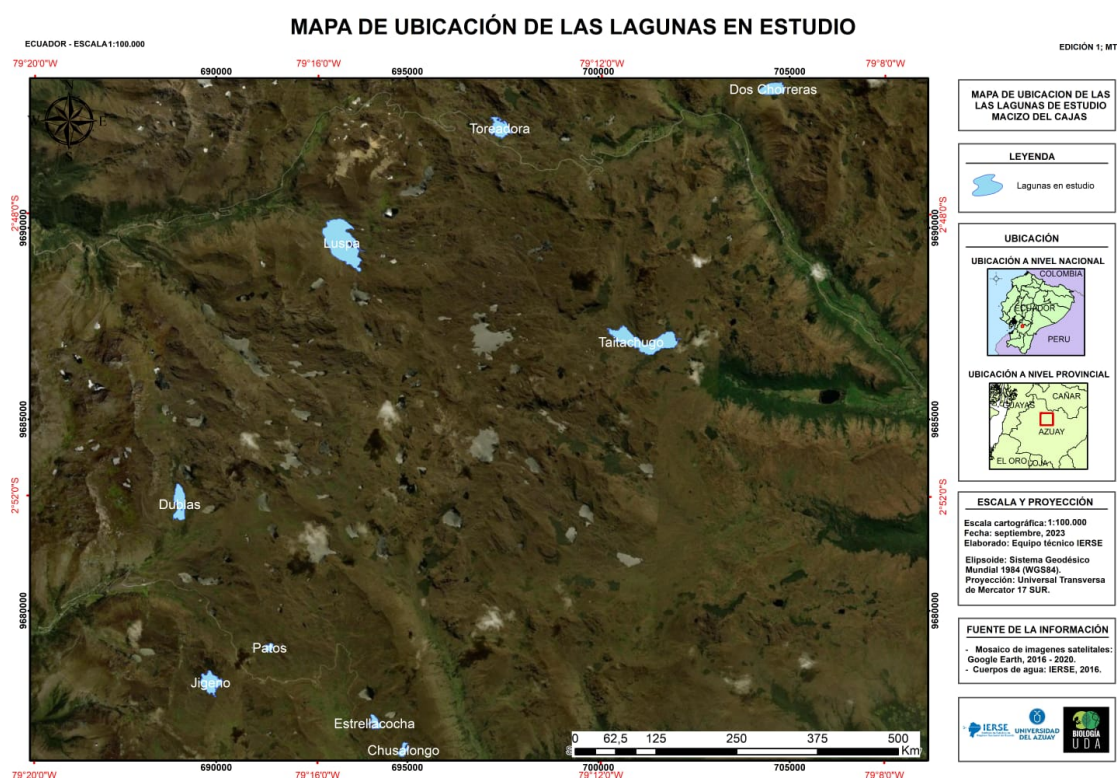


Figura 1. Mapa del área de estudio referido a la Reserva de Biosfera del Macizo del Cajas.

Fuente: Proyecto Ecosistemas Acuáticos Andinos del IERSE y el Laboratorio de Limnología de la Universidad del Azuay.

## 1.2. Procedimiento

El trabajo de investigación se llevó a cabo mediante la implementación del siguiente procedimiento:

- ***Toma de muestras de agua***

Se seleccionaron 10 lagunas ubicadas en el páramo del Macizo del Cajas, donde se realizaron muestreos de agua en diferentes puntos. Tres puntos de muestreo superficial se establecieron en las orillas de cada laguna (área litoral): uno próximo a la entrada de agua (afluente), otro en la región central (zona media) y, el último, cerca de la salida de agua (efluente) de cada una. Se realizaron 2 réplicas temporales, es decir, se repitió la recolección de muestras en los mismos puntos con el fin de determinar la variabilidad. Las réplicas se obtuvieron en las siguientes fechas:

*Tabla 2. Fechas correspondientes a las réplicas*

<b>Nombre de laguna</b>	<b>Réplica 1</b>	<b>Réplica 2</b>
Chuzalongo	22/10/2022	15/12/2022
Dos Chorreras	10/11/2022	21/02/2023
Dublas	20/10/2022	15/12/2022
Estrellas Cocha	22/10/2022	15/12/2022
Jigeno	22/10/2022	15/12/2022
Luspa	29/10/2022	28/01/2023
Patos	22/10/2022	15/12/2022
Taita Chugo	17/11/2022	02/03/2023
Toreadora	29/10/2022	28/01/2023
Verdecocha	27/05/2021	19/07/2021

Nota. Los datos de la laguna Verdecocha fueron otorgados por el proyecto EAA (IERSE-Lab. de Limnología), debido a que no fue posible en este trabajo por problemas de accesibilidad. Por lo que las fechas son anteriores.

- ***Determinación de los parámetros físico-químicos***

En las 10 lagunas del Macizo del Cajas seleccionadas se registraron las respectivas coordenadas y elevación. En cada una de las lagunas se midieron los siguientes parámetros:

- pH, conductividad ( $\mu\text{s}$ ) y sólidos disueltos (ppm) con la ayuda de un potenciómetro (HANNA HI 991300);
- el oxígeno disuelto (mg/l), porcentaje de saturación de oxígeno (%) y temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), medido con la ayuda de un oxímetro óptico (ProDO YSI).

Los cálculos para determinar los pigmentos de clorofila se realizaron mediante la aplicación de dos métodos: el monocromático y el tricromático, propuestos por Wetzel y Likens (2000). Estos cálculos se llevaron a cabo utilizando las siguientes ecuaciones:

- Método monocromático

$$Chl_a \left( \frac{\mu g}{l} \text{ o } \frac{mg}{m^3} \right) = \frac{(k)(f)(E_{6650} - E_{665a})(v)}{(V)(Z)}$$

$$Phaeopigments \left( \frac{\mu g}{l} \text{ o } \frac{mg}{m^3} \right) = \frac{(k)(f)[R(E_{6650} - E_{665a})](v)}{(V)(Z)}$$

- Método tricromático

$$\text{☐ } Chl_a \left( \frac{\mu g}{l} \text{ o } \frac{mg}{m^3} \right) = \frac{(Ca)(v)}{(V)(Z)}$$

$$Chl_a \left( \frac{\mu g}{l} \right) = \frac{[11,85(A_{664} - A_{750}) - 1,54(A_{647} - A_{750}) - 0,08(A_{630} - A_{750})xv]}{(V)}$$

$$\text{☐ } Chl_b \left( \frac{\mu g}{l} \text{ o } \frac{mg}{m^3} \right) = \frac{(Cb)(v)}{(V)(Z)}$$

$$Chl_b \left( \frac{\mu g}{l} \right) = \frac{[21,3(A_{664} - A_{750}) - 5,43(A_{647} - A_{750}) - 2,66(A_{630} - A_{750})xv]}{(V)}$$

$$\text{☐ } Chl_c \left( \frac{\mu g}{l} \text{ o } \frac{mg}{m^3} \right) = \frac{(Cc)(v)}{(V)(Z)}$$

$$Chl_c \left( \frac{\mu g}{l} \right) = \frac{[24,52(A_{664} - A_{750}) - 1,67(A_{647} - A_{750}) - 7,60(A_{630} - A_{750})xv]}{(V)}$$

$$\text{☐ } Car \left( \frac{\mu SPU}{l} \text{ o } \frac{mSPU}{m^3} \right) = \frac{[(10,0)(E_{4800})](v)}{(V)(Z)}$$

$$\text{☐ } E_{4800} = A_{480} - [(3)(A_{750})]$$

Donde:

A480, A630, A647, A663, A664 y A750: corresponden a densidades ópticas registradas en las longitudes establecidas;

v: es el volumen en ml del extracto (5 ml del extracto); y,

V: es el volumen del agua filtrada en litros (100 ml para la filtración).

### 1.3. Análisis de datos

Los datos fueron analizados mediante el software estadístico R versión 4.1.0 a través de la interfaz R-Studio (R Core Team, 2022).

Se elaboraron diagramas de caja (BoxPlot), los cuales permitieron la comparación de la distribución de las variables cuantitativas respecto a diferentes categorías o grupos; esto facilitó el cotejo entre las concentraciones de clorofila en todas las lagunas de la muestra; para ello se utilizó el paquete 'stats' en R-Studio (Jiménez, 2019).

La relación de los valores promedio de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) con los valores de clorofila en cada laguna se llevó a cabo mediante el análisis t-Student, considerando una significancia de 0,05, debido a que es apropiado para muestras pequeñas; para esto utilizamos la función t-test el paquete 'stats' en R-Studio (R Core Team, 2022).

## CAPÍTULO II

### RESULTADOS

#### 2.1. Identificación de cuerpos lagunares

Después del análisis del área de estudio, se seleccionaron 10 cuerpos lagunares pertenecientes al Macizo El Cajas. A continuación, se presentan las dimensiones superficiales de cada una.:

*Tabla 3. Dimensiones superficiales de cuerpos lagunares*

Nombre de laguna	Área (ha)	Perímetro (m)	Ancho máximo (km)	Índice de desarrollo de la costa	Longitud máxima (km)
Chusalongo	5,68	1.462,13	0,0809	3,45	0,70
Dos Chorreras	16,66	1.806,91	0,2333	3,04	0,74
Dublas	21,66	3.745,17	0,0751	4,53	2,22
Estrellas Cocha	6,45	1.817,91	0,1146	4,03	0,56
Jigeno	20,94	3.461,45	0,2156	4,26	0,96
Luspa	77,39	7.002,71	0,1187	4,49	1,55
Patos	3,49	965,36	0,0958	2,91	0,36
Taita Chugo	56,72	6.755,15	0,2551	5,06	2,88
Toreadora	18,47	3.394,64	0,4652	7,90	0,39
Verdecocha	2,06	777,27	0,0972	4,454	0,21

Fuente: Tenesaca (2022)

La laguna con mayor extensión superficial y perímetro fue Luspa con 77,39 ha y 7.002,71 m de perímetro; el mayor índice de desarrollo de la costa lo presentó la laguna Toreadora y la longitud máxima fue Taita Chugo con 2,88 km.

*Tabla 4. Factores físico-químicos de las lagunas estudiadas. Nitratos( $NO_3^-$ ), Fosfatos ( $PO_4^{-3}$ ), Temperatura (T), Conductividad Eléctrica (CE), pH, Sólidos Disueltos Totales (SDT) y Oxígeno Disuelto (OD)*

Lagunas	$NO_3^-$ (mg/l)	$PO_4^{-3}$ (mg/l)	T (°C)	CE ( $\mu$ S/cm)	pH	SDT (ppm)	OD (mg/l)
Chusalongo	0,020	0,009	10,90	84,0	7,37	42,5	8,115
Dos Chorreras	0,021	0,006	11,00	115,5	7,24	59,0	7,460
Dublas	0,014	0,000	10,70	60,0	8,72	30,5	7,570
Estrellas Cocha	0,027	0,010	10,80	65,5	6,70	33,0	8,125
Jigeno	0,008	0,000	9,90	64,5	7,33	31,5	7,555
Luspa	0,027	0,002	10,40	65,0	8,28	33,0	7,590
Patos	0,008	0,008	9,550	66,0	7,05	33,0	7,080
Taita Chugo	0,113	0,000	10,65	89,0	7,47	44,5	7,730
Toreadora	0,046	0,008	12,00	80,5	7,44	40,0	8,395
Verdecocha	0,056	0,001	9,550	105,0	7,05	54,0	8,080

Fuente: Proyecto Ecosistemas Acuáticos Andinos (IERSE, Lab. de Limnología).



El análisis de los resultados de la tabla 4, obtenidos y suministrados por el Laboratorio de Limnología del IERSE correspondientes a un único muestreo, revela variaciones relevantes en las características de las diferentes lagunas estudiadas en la región. La concentración de nitratos varía entre los diferentes cuerpos de agua, observándose el mínimo en Jigeno y Patos con 0,008 mg/l en cada una, mientras que el máximo se observó en Taita Chugo con 0,113 mg/l; asimismo, la concentración de fosfatos estuvo en el mínimo de 0,000 mg/l en las lagunas de Taita Chugo, Jigeno y Dublas (considerando el límite mínimo de detección de 0,050 mg/l), por lo que se considera ausente la carga de fosfatos en dichas lagunas; mientras que, la mayor presencia de fosfatos se observó en Estrellas Cocha con 0,010 mg/l. La temperatura se encontró más uniforme, aunque Toreadora tuvo el valor más alto (12,0°C) y en las lagunas Patos y Verdecocha el más bajo (9,55°C).

La conductividad varía entre 60,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en Dublas hasta picos de 105,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en Verdecocha y de 115,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en Dos Chorreras. El pH también muestra una variabilidad notable, con el valor más bajo en Estrellas Cocha (6,70) y el más alto en Dos Chorreras (8,72). Respecto a los sólidos disueltos totales (SDT), se pudo apreciar que estos se ubican entre 30,5 ppm en Dublas y 59,0 ppm en Dos Chorreras, lo que puede indicar una mayor salinidad en esta última. Finalmente, la concentración de oxígeno disuelto varía, con el valor más alto en Toreadora (8,395 mg/l) y el más bajo en Patos (7,08 mg/l). Estos datos resaltan la diversidad de las condiciones ambientales en estas lagunas y la importancia de un monitoreo continuo para comprender mejor su salud ecológica.

## 2.2. Niveles de producción de clorofilas a, b y c

El análisis de los resultados de las mediciones de concentración de clorofila ( $\mu\text{g/l}$ ) en cada laguna del Macizo del Cajas proporciona información sobre el estado trófico de estos cuerpos de agua. A continuación, se presentan algunos hallazgos y observaciones basadas en los datos obtenidos:

Tabla 5. Descriptivos de la concentración ( $\mu\text{g/l}$ ) de clorofilas a, b y c según réplicas

Laguna	Chl a ( $\mu\text{g/l}$ )		Chl b ( $\mu\text{g/l}$ )		Chl c ( $\mu\text{g/l}$ )	
	R1	R2	R1	R2	R1	R2
Chusalongo	0.3332	0.2621	0.0174	0.1459	0.0242	0.1811
Dos Chorreras	0.4266	0.2033	0.0000	0.0635	0.1272	0.0953
Dublas	0,0179	0.2179	0.0000	0.1076	0.0572	0.1712
Estrellas Cocha	0.1802	0.3647	0.0000	0.1582	0.0322	0.2120
Jigeno	0.1160	0.2907	0.0021	0.0996	0.0116	0.1429
Luspa	0.2395	0.3889	0.0095	0.0986	0.1386	0.1450
Patos	0.1096	0.1694	0.0000	0.0655	0.0360	0.0548
Taita Chugo	0.1326	0.2656	0.0000	0.2490	0.0659	0.3704
Toreadora	0.1048	0.1429	0.1436	0.0633	0.1369	0.0923
Verdecocha	2.9002	2.5821	1.2216	1.2762	0.000001	0.2745
Media	0.4561	0.4888	0.1394	0.2327	0.0630	0.1740
Desv. Est.	0.7844	0.6691	0.3463	0.3356	0.0478	0.0848
Coefficiente de Variación	172%	137%	248%	144%	76%	49%

Fuente: Datos recopilados en muestreos; Sánchez (2023). Valores de Verdecocha otorgados por el proyecto EAA (IERSE-Lab. de Limnología)

Nota: Réplica 1 (R1) y Réplica 2 (R2)

- **Comparación de los niveles de clorofila a, b y c**

Se observa que las concentraciones de Chl-a varían entre  $0.0179 \mu\text{g/l}$  y  $2.9002 \mu\text{g/l}$ , mientras que las concentraciones de Chl-b oscilan entre  $0 \mu\text{g/l}$  y  $0.2490 \mu\text{g/l}$ ; por su parte, las concentraciones de Chl-c se encuentran en el rango de  $0.000001 \mu\text{g/l}$  a  $0.27452 \mu\text{g/l}$ . Estos valores indican una variabilidad significativa en los niveles de estos pigmentos fotosintéticos entre las lagunas estudiadas; no obstante, la laguna Verdecocha muestra la mayor concentración de clorofilas a y b.

- **Identificación de lagunas con altos niveles de clorofila**

Al observar las concentraciones de Chl-a en las 10 lagunas estudiadas, se tiene que los valores más altos entre los datos recopilados incluyen las lagunas: Verdecocha (R1: 2.9002; R2: 2.5821), Dos Chorreras (R1: 0.4266; R2: 4.266), Chusalongo (R1: 0.3332; R2: 0,2621) y Luspa (R1: 0.2395; R2: 0.3889). En cuanto a la Chl-b, las lagunas con

concentraciones más elevadas son: Verdecocha (R1: 1.2216; R2: 1.2762), Toreadora (R1: 0.1436; R2: 0.063), Chusalongo (R1: 0.0174; R2: 0.1459), Luspa (R1: 0.0095; R2: 0.0986) y Jigeno (R1: 0.0021; R2: 0.0996). La mayor presencia de Chl-c se observó en Toreadora (R1: 0.1369; R2: 0.0923), Taita Chugo (R1: 0.0659; R2: 0.3704), Luspa (R1: 0.1386; R2: 0.1450) y Verdecocha (R1: 0.000001; R2: 0.2745).

- **Variabilidad entre las réplicas**

Al comparar las mediciones (R1 y R2) en cada laguna, se observan variaciones en los resultados, puesto que en general se aprecian aumentos y disminuciones de los valores en cada laguna; además, se constató que las segundas réplicas fueron más consistentes que las primeras, en las cuales se observaron las mayores dispersiones, fundamentado en coeficientes de variación menores en las segundas réplicas. Las lagunas Verdecocha, Dublas y Jigeno presentan una variabilidad influyente en el análisis. Esta variabilidad puede deberse a factores naturales, así como a posibles errores en las mediciones y es importante tenerla en cuenta al interpretar los resultados y considerar la necesidad de repeticiones adicionales para obtener una imagen más precisa.

- **Variabilidad de clorofilas entre lagunas**

A continuación, se presentan las distribuciones de las observaciones de clorofila a en las lagunas estudiadas:

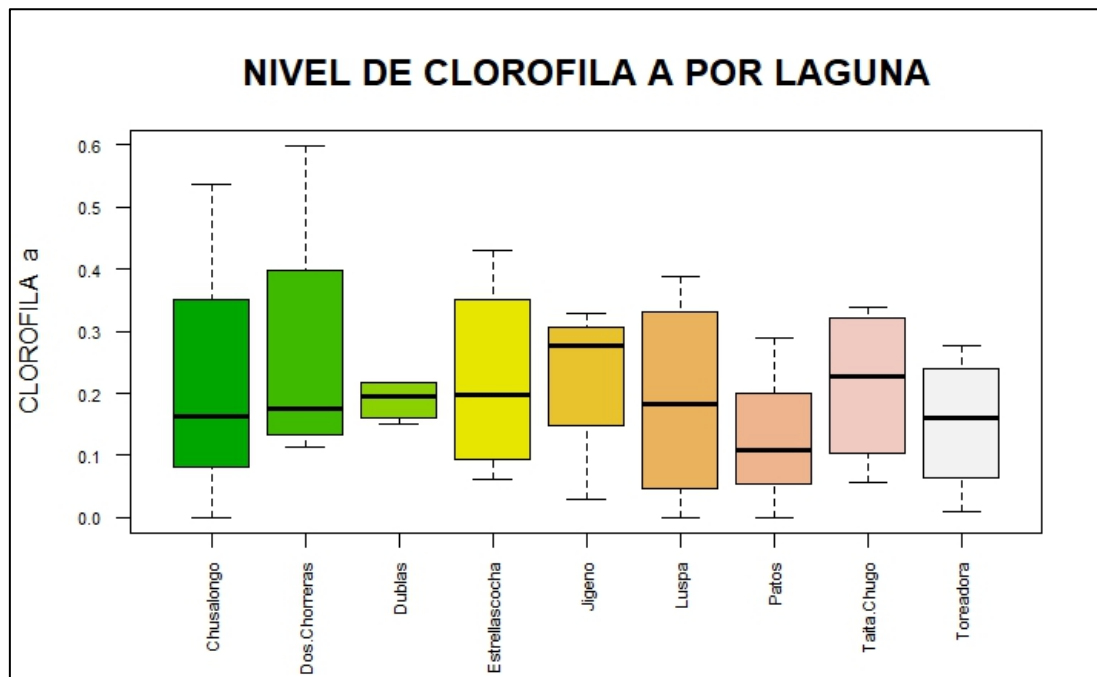
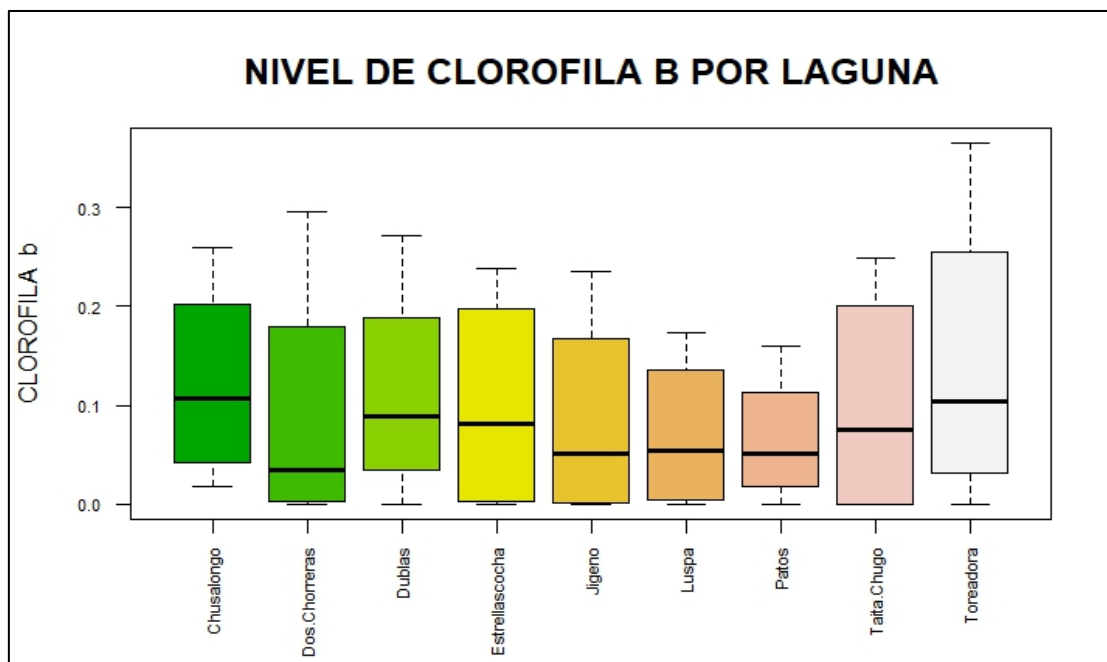


Figura 2. Comparación de niveles de Clorofila a por laguna

Fuente: Datos recopilados en muestreos; Sánchez (2023)

Según la figura 2, los niveles de Chl-a presentan variaciones entre lagunas y dentro de las mismas. El conjunto de datos presentado ilustra la variabilidad en las concentraciones de clorofila a entre diferentes lagunas. Se observa que la laguna Dos Chorreras tiene el valor máximo más alto de clorofila a ( $0.59875 \mu\text{g/l}$ ), lo que sugiere una mayor disponibilidad de nutrientes o una mayor actividad fotosintética en comparación con las demás lagunas. Por otro lado, Dublas muestra la menor variabilidad en los niveles de clorofila a, con el valor máximo más bajo ( $0.21871 \mu\text{g/l}$ ) y una mediana relativamente alta ( $0.19438 \mu\text{g/l}$ ), lo que indica una distribución de concentraciones más uniforme.

La mediana sirve como un indicador robusto de la tendencia central, y en este caso, Jigeno destaca con la mediana más alta ( $0.277323 \mu\text{g/l}$ ), lo que podría reflejar una concentración de nutrientes más consistente a lo largo del tiempo. Las lagunas Chusalongo y Taita Chugo también presentan medianas relativamente altas ( $0.1628795 \mu\text{g/l}$  y  $0.2263375 \mu\text{g/l}$ , respectivamente), lo que puede señalar condiciones similares.



*Figura 3. Comparación de niveles de Clorofila b por laguna*

Fuente: Datos recopilados en muestreos; Sánchez (2023)

De acuerdo con la figura 3, el mayor valor medio de Chl-b lo presentó la laguna Toreadora; no obstante, también fue la que mayor variabilidad interna presentó.

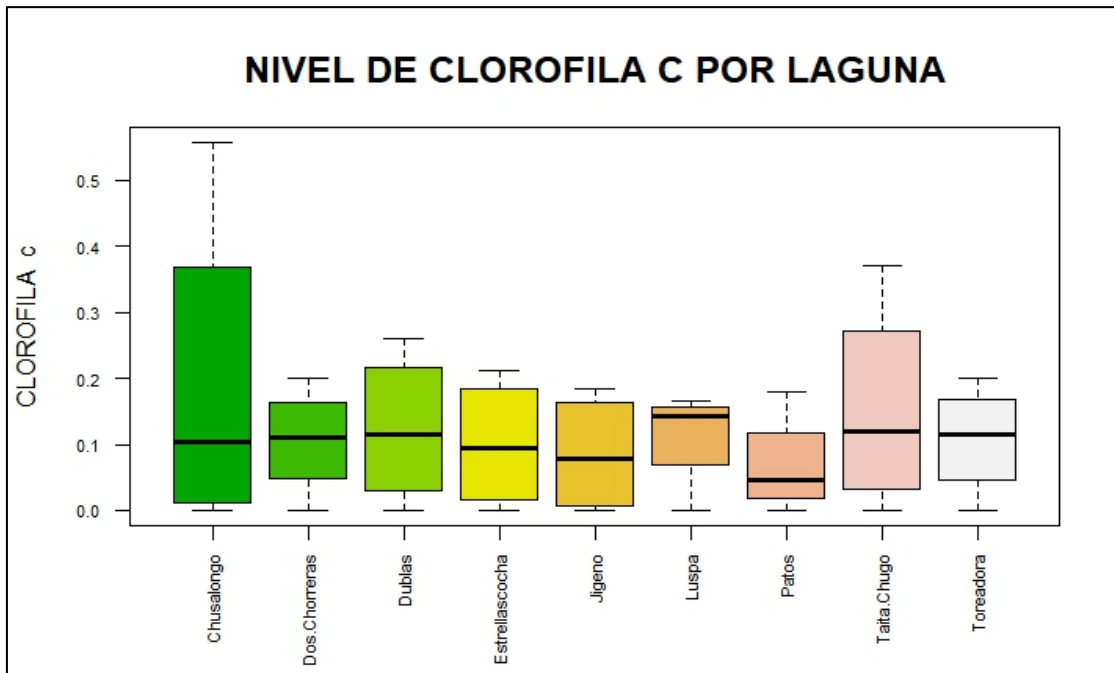


Figura 4. Comparación de niveles de Clorofila c por laguna

Fuente: Datos recopilados en muestreos; Sánchez (2023)

Según los resultados de la figura 4, Luspa muestra el valor medio más alto de Chl-*c*, seguido de la laguna Taita Chugo. Por otra parte, en Chusalongo se apreció la mayor variabilidad interna.

### 2.3. Correlación de niveles de clorofilas con Nutrientes

Por medio de un análisis t-Student ( $p < 0.05$ ), se pudo determinar la relación de la presencia de nutrientes con los valores de clorofila en cada una de las lagunas estudiadas.

Tabla 6. Significancia de la presencia de Nitratos y Fosfatos en el agua de las diferentes lagunas del Macizo del Cajás.

Lagunas	NO <sup>-3</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>
	<i>p-value</i>	<i>p-value</i>
Chusalongo	0.184	0.167
Dos Chorreras	0.1175	0.1038
Dublas	0.001847*	0.001474*
Estrellas Cocha	0.09768	0.08134*
Jigeno	0.04755*	0.04353*
Luspa	0.1623	0.1229
Patos	0.141	0.141
Taita Chugo	0.2309	0.04914*
Toreadora	0.1643	0.08851
Verdecocha	0.03792*	0.03716*

\* Significante para  $\alpha=0,05$ ; \*\* significativo para  $\alpha=0,01$ ; \*\*\* significativo para  $\alpha=0,001$ .

Fuente: Datos recopilados en muestreos; Sánchez (2023) Datos de Verdecocha analizados de Cárdenas y Macías (2022)

La variación de los valores promedio de nitratos ( $\text{NO}^{-3}$ ) en relación a los valores de clorofila a es significativa en las lagunas Dublas ( $p=0.001847$ ), Jigeno ( $p=0.04755$ ) y Verdecocha ( $p=0.03792$ ); mientras que, la variación de fosfatos ( $\text{PO}_4^{-3}$ ) en relación a los valores promedio de clorofila a es significativa en Dublas ( $p=0.001474$ ), Estrellas Cocha ( $p=0.08134$ ), Jigeno ( $p=0.04353$ ), Taita Chugo ( $p=0.04914$ ) y Verdecocha ( $p=0.03716$ ).

## **CAPÍTULO III**

### **DISCUSIÓN**

Al llevar a cabo la investigación sobre las lagunas del Macizo del Cajas, se realizó un exhaustivo análisis de los niveles de clorofila a, b y c en un total de diez lagunas seleccionadas. Esto brindó la oportunidad de identificar y examinar detalladamente las variaciones en los factores físico-químicos presentes en estos cuerpos acuáticos. Se observaron variaciones especialmente destacadas en aspectos como la concentración de nitratos y fosfatos, los valores de pH, las fluctuaciones de temperatura y la cantidad de sólidos disueltos totales en el agua. Estos hallazgos sientan las bases para una discusión profunda sobre las implicaciones y significados de estos resultados en el contexto del ecosistema de las lagunas estudiadas.

#### **3.1. Estado trófico**

Los resultados obtenidos en este estudio sugieren que las lagunas examinadas presentan valores de clorofila bajos (por debajo de 3  $\mu\text{g/l}$ ), observándose que la chl-a se encuentra entre 0,0179  $\mu\text{g/l}$  y 2.9002  $\mu\text{g/l}$ , la chl-b entre 0  $\mu\text{g/l}$  y 1.2762  $\mu\text{g/l}$ , y la chl-c entre 0.000001  $\mu\text{g/l}$  y 0.3704  $\mu\text{g/l}$ , lo cual las clasifica en general dentro de la categoría de oligotróficas y ultraoligotróficas, con excepción de la laguna Verdecocha que se puede catalogar como mesotrófica por tener una concentración máxima de 2.9002  $\mu\text{g/l}$ .

Lo anteriormente expuesto implica que estos ecosistemas acuáticos poseen una concentración limitada de nutrientes, conduciendo a una productividad primaria reducida (Pereira-Ibarra y López-Monroy, 2021). Curiosamente, estas observaciones son coherentes con hallazgos previos documentados en investigaciones realizadas en otras lagunas situadas en el Macizo del Cajas, como lo indican Colen et al. (2017) y Tenesaca (2022).

La manifestación de este carácter oligotrófico se evidencia claramente a través de los bajos niveles de nitratos y fosfatos detectados en las muestras del presente estudio. De hecho, la OCDE (1982) ha señalado que este tipo de valores es un indicador directo del estado trófico en el que se encuentran diversos cuerpos de agua, reafirmando la importancia de estos hallazgos en el contexto de la ecología acuática y la conservación.

Las lagunas situadas en los Andes tropicales, específicamente en zonas de páramo de alta altitud (3500–4500 m), como las estudiadas por Colen et al. (2017) en el Parque Nacional Cajas, son cruciales para diversas actividades humanas como fuente de agua

potable, riego y generación eléctrica. A pesar de su relevancia, hay una carencia notable de información ecológica sobre estos cuerpos de agua.

### 3.2. Niveles de producción de clorofilas a, b y c

La comparación de los niveles de clorofila a, b y c en las lagunas del Macizo del Cajas revela una variabilidad significativa entre las lagunas estudiadas. Estos pigmentos fotosintéticos son indicadores clave de la productividad primaria y la presencia de organismos fotosintéticos en los ecosistemas acuáticos. Las concentraciones de *Chl a* se encuentran en un rango amplio, desde valores mínimos de 0.0179 hasta un máximo de 2.9002, lo cual indica diferencias importantes en la productividad primaria y la abundancia de algas en las diferentes lagunas. Por otro lado, las concentraciones de clorofila b también varían ampliamente, desde valores mínimos de cero hasta un máximo de 0.2490; mientras que, la presencia de *Chl-c* se encuentra en el rango de 0.000001 a 0.27452.

El estudio de la relación entre las concentraciones de *Chl-a*, *Chl-b* y *Chl-c* en las lagunas del Macizo del Cajas arroja hallazgos intrigantes. Es evidente que algunas lagunas muestran una prevalencia de *Chl-a*, mientras que otras exhiben mayores concentraciones de clorofila b o incluso de clorofila c. Estas diferencias en los patrones de predominancia pueden ser reflejo de variaciones en la composición de las comunidades fitoplanctónicas y, en consecuencia, en la estructura trófica de las lagunas (Dashkova et al., 2022). Una mayor concentración de *Chl-a* podría indicar la presencia dominante de cianobacterias, las cuales son fotosintéticamente activas y pueden influir significativamente en la calidad del agua y en la dinámica de nutrientes.

Las lagunas con los niveles más altos de *Chl a*, como Verdecocha, Dos Chorreras, Chusalongo y Luspa, sugieren una mayor productividad primaria y una mayor abundancia de organismos fotosintéticos; estas lagunas también mostraron concentraciones comparativamente más elevadas de nutrientes como nitratos y fosfatos, lo que podría estar contribuyendo a la productividad. En diversos estudios, las cianobacterias han mostrado tener una afinidad predominante por la clorofila a (Filazzola et al., 2020). Esta relación entre altos niveles de *Chl a* y la disponibilidad de nutrientes refuerza la idea de que las lagunas con mayores concentraciones de *Chl a* pueden tener una mayor cantidad de nutrientes disponibles y condiciones ambientales más favorables para la fotosíntesis (Salcedo-Garduño et al., 2019).



En contraste, una elevada concentración de clorofila b podría señalar una diversidad más amplia de algas y otros organismos fotosintéticos (Kühl et al., 2020). En cuanto a la clorofila c, su presencia podría estar asociada con un grupo diferente de fitoplancton, que tiene requisitos nutricionales y adaptaciones específicas al ambiente en el que se encuentra (Dashkova et al., 2022). Sin embargo, es fundamental tener precaución al interpretar estos resultados, y se requiere de investigaciones adicionales para establecer con certeza estas relaciones.

Por otro lado, en aquellas lagunas donde clorofila b está menos presente, es posible que ciertas condiciones ambientales favorezcan la prosperidad de especies con un perfil de pigmentación diferente, como cianobacterias. Según Li et al. (2018), estas variaciones podrían estar relacionadas con la disponibilidad de nutrientes, factores de competencia y la interacción compleja entre las especies fitoplanctónicas (Wang et al., 2021).

La notable concentración de Chl-c en las lagunas Toreadora, Taita Chugo, Luspa y Verdecocha sugiere una presencia significativa de grupos específicos de algas, como diatomeas y algas pardas. Esta predominancia podría estar relacionada con características particulares de estos ecosistemas, como la salinidad, la disponibilidad de nutrientes o factores físicos, y subraya la diversidad y especificidad ecológica de cada laguna (Bennett et al., 2021).

El estudio de Tenesaca (2022) proporciona información relevante sobre los índices de vegetación en lagunas del Macizo del Cajas, lo cual puede estar relacionado con los niveles de clorofila en estas áreas. El NDVI y EVI, que son índices de vegetación utilizados para medir la presencia y vigor de la vegetación, están estrechamente vinculados con los niveles de clorofila, ya que la clorofila es responsable de la fotosíntesis en las plantas. Al comparar los hallazgos de ambos estudios, podemos notar que las lagunas con niveles más altos de Chl a, como Dos Chorreras, Chuzalongo y Luzpa, también muestran valores más altos de NDVI y EVI en el estudio de Tenesaca. Esto sugiere que estas lagunas tienen una mayor actividad fotosintética y una mayor cantidad de vegetación, lo que está en línea con la idea de que pueden tener una mayor cantidad de nutrientes disponibles y condiciones ambientales más favorables para la fotosíntesis.

Al comparar nuestros resultados con estudios previos en lagunas del Cajas o en regiones altoandinas (Colen et al., 2017), se encuentra una similitud en los valores bajos de clorofila y nutrientes. Estos valores consistentemente bajos podrían estar influenciados

por factores como el clima y las características geográficas propias de las regiones altoandinas.

Por otra parte, se observó una notable variabilidad en los resultados entre réplicas de cada laguna, que podría atribuirse a factores climáticos, como la precipitación, que condicionaría a las variaciones en la concentración de clorofila (Matute, 2019). Bucheli et al. (2021) señalan que los fenómenos climáticos pueden impactar las mediciones de clorofilas y otros parámetros físico-químicos, como la temperatura y el pH. Dada esta variabilidad, es esencial considerar ciclos de muestreo más prolongados y repeticiones adicionales para comprender mejor las fluctuaciones estacionales y obtener una visión más precisa del estado trófico de las lagunas.

El estudio de Adams et al. (2021) sugiere que los lagos con un estado trófico más elevado son más sensibles a la radiación solar, especialmente durante la primavera y bajo condiciones de irradiancia moderada. Esto pone de relieve la relación entre la disponibilidad de nutrientes y cómo los cuerpos de agua responden a la radiación solar. No obstante, es importante destacar que este estudio se centra en regiones con estaciones climáticas bien definidas, que no son directamente comparables con las condiciones en Ecuador, donde las variaciones estacionales son distintas, con periodos más marcados por lluvias o sequías en lugar de las cuatro estaciones tradicionales. Por lo tanto, la aplicación de estos hallazgos al contexto ecuatoriano y, en particular, a las lagunas del Macizo del Cajas, debe hacerse con precaución.

En el caso de los lagos oligotróficos, Adams et al. (2021) observaron una menor sensibilidad en el crecimiento de la clorofila a frente a la radiación solar, lo que sugiere una limitación de nutrientes predominante en su ecología. Sin embargo, dadas las diferencias climáticas en Ecuador, los patrones de radiación solar y su impacto en las concentraciones de clorofila pueden variar significativamente. Por ende, se requiere una evaluación más detallada que considere las peculiaridades climáticas de Ecuador, como los patrones de lluvia y neblina, para comprender completamente su influencia en el estado trófico de las lagunas estudiadas.

Adicionalmente, como indican Matute (2019) y Bucheli et al. (2021), los fenómenos climáticos pueden afectar las mediciones de clorofila y otros parámetros físico-químicos. Esto subraya la necesidad de realizar ciclos de muestreo más extensos y repeticiones adicionales para capturar adecuadamente las fluctuaciones estacionales y

obtener una imagen más precisa del estado trófico de las lagunas del Macizo del Cajas, considerando las condiciones climáticas únicas de la región.

### **3.3. Correlación de niveles de clorofilas con factores físico-químicos**

A través del análisis T-Student, se evidenció que los valores promedio de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) es estadísticamente significativa de los valores promedio de Chl-a en las lagunas Dublas, Jigeno y Verdecocha, lo que sugiere que la Chl- a está influenciada por las variaciones de las concentraciones de nutrientes en estos cuerpos de agua que podrían estar recibiendo influencias externas debido a actividades que podrían estar dabo en las cuencas de aporte. En relación a los fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), otro nutriente esencial para la actividad fotosintética, mostró una diferencia significativa entra las medias en cinco de las lagunas estudiadas, incluyendo Dublas, Estrellas Cocha, Jigeno, Taita Chugo y Verdecocha. Es especialmente notorio que las lagunas Dublas y Jigeno presentan niveles significativos tanto de nitratos como de fosfatos, lo que podría indicar una mayor productividad o incluso un potencial riesgo de eutrofización. Estos hallazgos resaltan la necesidad de monitorear y gestionar la entrada de nutrientes en estos ecosistemas, para preservar su salud y equilibrio.

La posibilidad de eutrofización en lagunas oligotróficas, a pesar de su aparente contradicción, es una realidad en ciertos contextos y merece atención en la discusión de la salud de estos ecosistemas. Las lagunas oligotróficas, caracterizadas por bajos niveles de nutrientes como nitratos y fosfatos y una productividad biológica generalmente baja, no están inmunes a los riesgos de eutrofización. Estudios han mostrado que la acumulación gradual de nutrientes, incluso en pequeñas cantidades, puede alterar el equilibrio ecológico y conducir a un estado eutrófico en cuerpos de agua originalmente oligotróficos (Godoy et al., 2019). Esta transición puede ser acelerada por influencias antropogénicas como la agricultura y la urbanización, que aumentan el aporte de nutrientes a estos sistemas (Hobbie et al., 2017). Además, la capacidad limitada de estas lagunas para asimilar nutrientes adicionales sin cambiar su estado trófico hace que incluso aportes modestos de nitratos y fosfatos sean una preocupación significativa. Por lo tanto, la vigilancia y el manejo sostenible de las entradas de nutrientes en las lagunas oligotróficas son cruciales para prevenir su eutrofización y preservar su integridad ecológica (Godoy et al., 2017; Hobbie et al., 2017).

Los hallazgos del presente estudio resaltan la interacción entre los factores físico-químicos del agua, en la determinación de los niveles de clorofila en las lagunas del Macizo del Cajas. Aunque los valores de pH y temperatura se alinean con lo esperado para estas lagunas, no parecen ser factores limitantes para la fotosíntesis y la productividad. En las lagunas donde se encontró una relación significativa, basada en la prueba de t-Student, se evidencia la influencia directa de los nutrientes en los valores de clorofila. Esta relación es coherente con la premisa de que los nutrientes potencian la productividad y la actividad fotosintética.

El monitoreo estacional en dos lagunas del estudio de Colen et al. (2017) mostró una estratificación térmica del agua entre octubre y junio, con una mínima diferencia de temperatura entre el epi- y el hipolimnion (2-3 °C). Es interesante notar que, a pesar de la estratificación, no se observó una depleción completa de oxígeno en el hipolimnion ni una acumulación notable de nutrientes en este, lo que sugiere que no hubo una mezcla completa de la columna de agua durante este período. Además, la concentración de clorofila a y la composición de la comunidad de fitoplancton permanecieron relativamente estables.

Los valores p significativos de la prueba t-Student obtenidos en nuestro estudio evidencian relaciones claras entre los nutrientes y los niveles de clorofilas en las lagunas del Macizo del Cajas. Al cotejar con hallazgos de Bensafia et al. (2020), se subraya la influencia directa que estos factores tienen en la productividad primaria y la presencia de organismos fotosintéticos. En el contexto del Macizo del Cajas, estas relaciones sugieren que variaciones en factores como el pH, la temperatura, y la concentración de nutrientes pueden tener consecuencias directas en la dinámica y salud de los ecosistemas acuáticos.

## CONCLUSIONES

Este estudio ha brindado hallazgos interesantes detallados sobre el estado trófico de las lagunas del Macizo del Cajas en el sur de Ecuador. La variabilidad en los niveles de clorofilas a, b y c refleja diferencias en la productividad y en la composición de las comunidades fitoplanctónicas de las lagunas estudiadas, siendo la laguna Verdecocha donde se encontró la mayor producción de clorofilas. Se evidenció una correlación entre los niveles de clorofilas y con los nutrientes en algunas lagunas, subrayando especialmente el papel de los nitratos y fosfatos en la productividad primaria y la presencia de organismos fotosintéticos.

Se comprueba nuevamente que el análisis de las clorofilas son una herramienta valiosa para la evaluación del estado trófico en cuerpos de agua de montaña. Estos pigmentos reflejan la disponibilidad de nutrientes en el agua, fundamentales para la producción primaria y bienestar del ecosistema. Si bien la relación entre la concentración de clorofilas y el estado trófico puede presentar variaciones, los factores físico-químicos del agua, en conjunto con las clorofilas, ofrecen una panorámica integral para entender la salud de estos ecosistemas acuáticos.

Es relevante mencionar que las variaciones climáticas entre las réplicas en la toma de muestras podrían influir en las concentraciones detectadas, por lo que este factor también debería ser considerado en futuros análisis. La comprensión y análisis de las clorofilas, junto con otros indicadores, es esencial para garantizar la integridad y sostenibilidad de estos valiosos ecosistemas acuáticos.

## RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos, se plantean las siguientes recomendaciones:

1. Establecer programas de monitoreo continuo de los niveles de clorofila y factores físico-químicos del agua en las lagunas del Macizo del Cajas.
2. Realizar estudios de campo complementarios para obtener una comprensión más completa del estado trófico y la calidad del agua en estas lagunas.
3. Evaluar y monitorear los posibles impactos antropogénicos en las lagunas, implementando medidas de mitigación y conservación.
4. Promover la educación ambiental y la concientización sobre la importancia de las lagunas y fomentar prácticas de conservación entre la comunidad local.
5. Desarrollar estrategias de conservación y manejo adecuado de las lagunas, incluyendo la delimitación de áreas protegidas y la implementación de regulaciones ambientales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, H., Ye, J., Persaud, B., Slowinski, S., Pour, H., y Van Cappellen, P. (2021). Chlorophyll-a growth rates and related environmental variables in global temperate and cold-temperate lakes. *Earth System Science Data*, 329, 1-30. <https://doi.org/10.5194/essd-2021-329>
- Alexander, T. J., Vonlanthen, P., y Seehausen, O. (2017). Does eutrophication-driven evolution change aquatic ecosystems? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1712:20160041), 1-10. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0041>
- Al-Thani, J. A., Soliman, Y., Al-Maslamani, I. A., Yigiterhan, O., y Al-Ansari, E. M. A. S. (2023). Physical drivers of chlorophyll and nutrients variability in the Southern-Central Arabian Gulf. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 283(108260). <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108260>
- Bennett, M. G., Lee, S. S., Schofield, K. A., Ridley, C. E., Washington, B. J., y Gibbs, D. A. (2021). Response of chlorophyll a to total nitrogen and total phosphorus concentrations in lotic ecosystems: A systematic review. *Environmental Evidence*, 10(1), 1-25. <https://doi.org/10.1186/s13750-021-00238-8>
- Bensafia, N., Djabourabi, A., Touati, H., Rachedi, M., y Belhaoues, S. (2020). Evolution of physicochemical parameters and trophic state of three Park National of El-Kala water bodies (North-east Algeria). *Egyptian Journal of Aquatic Biology & Fisheries*, 24(2), 249-263. [https://ejabf.journals.ekb.eg/article\\_80312\\_71e9c129c8eff51ff95974ee20a9ac0d.pdf](https://ejabf.journals.ekb.eg/article_80312_71e9c129c8eff51ff95974ee20a9ac0d.pdf)
- Bucheli, L., Rojas, B., y Mafla, F. (2021). Monitoreo de la calidad del agua mediante clorofila-a aplicando imágenes satelitales en el Humedal Ramsar, lago Guamués. *INGENIARE*, 17(31), 21-31. <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.31.8935>
- Caldas, A. (2019). *Caracterización SIG del uso de la tierra y geomorfología del Macizo del Cajas—Ecuador* [Tesis de Maestría, Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/33575>
- Cárdenas, D. G., y Macías, J. J. (2022). *Determinación de factores físico químicos en cuerpos lénticos en el páramo del Macizo del Cajas* [Tesis]. Universidad del Azuay.

- Chaurasia, S., y Gupta, R. (2016). Study on Trophic State Index of River Mandakini at Chitrakoot, India. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Applied Sciences*, 5(8), 34-43. <https://garph.co.uk/IJAREAS/Aug2016/3.pdf>
- Colen, W. R., Mosquera, P., Vanderstukken, M., Goiris, K., Carrasco, M.-C., Decaestecker, E., Alonso, M., León-Tamariz, F., y Muylaert, K. (2017). Limnology and trophic status of glacial lakes in the tropical Andes (Cajas National Park, Ecuador). *Freshwater Biology*, 62(3), 458-473. <https://doi.org/10.1111/fwb.12878>
- Custodio, M., y Chávez, E. (2019). Quality of the aquatic environment of high Andean rivers evaluated through environmental indicators: A case of the Cunas River, Peru. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 27(3), 396-409. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052019000300396>
- Dashkova, V., Malashenkov, D. V., Baishulakova, A., Davidson, T. A., Vorobjev, I. A., Jeppesen, E., y Barteneva, N. S. (2022). Changes in Phytoplankton Community Composition and Phytoplankton Cell Size in Response to Nitrogen Availability Depend on Temperature. *Microorganisms*, 10(7:1322), Article 7. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10071322>
- Davidson, T. A., Sayer, C. D., Jeppesen, E., Søndergaard, M., Lauridsen, T. L., Johansson, L. S., Baker, A., y Graeber, D. (2023). Bimodality and alternative equilibria do not help explain long-term patterns in shallow lake chlorophyll-a. *Nature Communications*, 14(398), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36043-9>
- Doddavarapu, B., Crasta, G. L., y Shankar, M. (2021). Comparative studies on chlorophyll concentration in some important plant families. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 10(3), 214-220. <https://doi.org/10.22271/phyto.2021.v10.i3c.14074>
- Filazzola, A., Mahdian, O., Shuvo, A., Ewins, C., Moslenko, L., Sadid, T., Blaggrave, K., Imrit, M. A., Gray, D. K., Quinlan, R., O'Reilly, C. M., y Sharma, S. (2020). A database of chlorophyll and water chemistry in freshwater lakes. *Scientific Data*, 7(310), 1-10. <https://www.nature.com/articles/s41597-020-00648-2>
- Godoy, R. F. B., Radomski, F. A. D., Guerra, B. D. L. C., y Kuroda, C. Y. (2019). Eutrophication: A threat to freshwater reservoirs and human health. *Multidisciplinary Reviews*, 2(e2019007), 1-7. <https://doi.org/10.29327/multi.2019007>
- Hobbie, S. E., Finlay, J. C., Janke, B. D., Nidzgorski, D. A., Millet, D. B., y Baker, L. A. (2017). Contrasting nitrogen and phosphorus budgets in urban watersheds and implications for managing urban water pollution. *Proceedings of the National*



*Academy of Sciences*, 114(16), 4177-4182.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1618536114>

- Jachniak, E., y Jaguś, A. (2023). Assessment of the trophic state of the Soła River dam cascade, Polish Carpathians: A comparison of the methodology. *Scientific Reports*, 13(1:5896), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33040-2>
- Janus, L. L., y Vollenwelder, R. A. (1981). *The OECD Cooperative Programme on Eutrophication. Canadian Contribution* (Summary Report 131; Scientific Series). Environment Canada. [https://publications.gc.ca/collections/collection\\_2018/eccc/En36-502-131-eng.pdf](https://publications.gc.ca/collections/collection_2018/eccc/En36-502-131-eng.pdf)
- Jiménez, J. U. (2019). *Introducción a R y RStudio*. Universidad Tecnológica de Panamá. <https://ridda2.utp.ac.pa/bitstream/handle/123456789/9428/manual-introduccion-R.pdf?sequence=1>.
- Kasavan, S., Yusoff, S., Rahmat Fakri, M. F., y Siron, R. (2021). Plastic pollution in water ecosystems: A bibliometric analysis from 2000 to 2020. *Journal of Cleaner Production*, 313(127946). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127946>
- Kühl, M., Trampe, E., Mosshammer, M., Johnson, M., Larkum, A. W., Frigaard, N.-U., y Koren, K. (2020). Substantial near-infrared radiation-driven photosynthesis of chlorophyll f-containing cyanobacteria in a natural habitat. *eLife*, 9(e50871), 1-15. <https://doi.org/10.7554/eLife.50871>
- Li, Y., He, N., Hou, J., Xu, L., Liu, C., Zhang, J., Wang, Q., Zhang, X., y Wu, X. (2018). Factors Influencing Leaf Chlorophyll Content in Natural Forests at the Biome Scale. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 6(64), 1-10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fevo.2018.00064>
- Liu, X., Feng, J., y Wang, Y. (2019). Chlorophyll a predictability and relative importance of factors governing lake phytoplankton at different timescales. *Science of The Total Environment*, 648, 472-480. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.146>
- Matute, E. A. (2019). *Variación de clorofila del perifiton en riachuelos de los páramos en el Macizo del Cajas, Sur del Ecuador* [Tesis, Universidad del Azuay]. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/9473/1/15109.pdf>
- Mineeva, N. (2022). Chlorophyll and Its Role in Freshwater Ecosystem on the Example of the Volga River Reservoirs. En *Chlorophylls*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.105424>

- Ministerio del Ambiente. (2022). *El Macizo del Cajas es la quinta Reserva de Biósfera del Ecuador* [Institucional]. <https://www.ambiente.gob.ec/el-macizo-del-cajas-es-la-quinta-reserva-de-biosfera-del-ecuador/>
- Morales-Baquero, R., Pérez-Martínez, C., Ramos-Rodríguez, E., Sánchez-Castillo, P., Villar-Argaiz, M., y Conde-Porcuna, J. M. (2019). Zooplankton advective losses may affect chlorophyll-a concentrations in fishless high-mountain lakes. *Limnetica*, 38(1), 55-65. <https://doi.org/10.23818/limn.38.12>
- Muciño-Márquez, R. E., Aguirre-León, A., y Figueroa-Torres, M. G. (2017). Evaluación del estado trófico en los sistemas fluvio-lagunares Pom-Atasta y Palizada del Este, Campeche, México. *Hidrobiológica*, 27(3), 281-291. <https://www.scielo.org.mx/pdf/hbio/v27n3/0188-8897-hbio-27-03-281.pdf>
- OCDE. (1982). *Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control. Cooperative Programmers on Monitoring of Inland Waters (Eutrophication Control)* (Final Report; Environment Directorate). Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.
- Onyema, I., y Akanmu, R. T. (2018). Algal Pigments Variations and Water Chemistry Variables from a Mangrove Swamp and Creek in Lagos, Nigeria. *Nigerian Journal of Fisheries and Aquaculture*, 6(2), 31-38.
- Opiyo, S., Getabu, A., Sitoki, L., Shitandi, A., y Ogendi, G. (2019). Application of the Carlson's Trophic State Index for the Assessment of Trophic Status of Lake Simbi Ecosystem, a Deep Alkaline-Saline Lake in Kenya. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 7(4), 327-333. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3451145>
- Pereira-Ibarra, C., y López-Monroy, F. (2021). Trophic Status of a Tropical Coastal Lagoon in Margarita Island, Venezuela. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 37(54083), 611-622. <https://doi.org/10.20937/RICA.54083>
- R Core Team. (2022). *The R Project for Statistical Computing*. <https://www.r-project.org/>
- Salcedo-Garduño, M., Castañeda-Chávez, M., Lango-Reynoso, F., Sosa-Villalobos, C., Landeros Sánchez, C., y Galaviz-Villa, I. (2019). Influence of physicochemical parameters on phytoplankton distribution in the lagoon system of Mandinga, Mexico. *Revista Bio Ciencias*, 6(e427), 1-25. <https://doi.org/10.15741/revbio.06.e427>
- Sarkar, S., Sarkar, U., Naskar, M., Roy, K., Bose, A., Nag, S., Karnatak, G., y Das, B. (2021). Effect of climato-environmental parameters on chlorophyll a concentration in the lower Ganga basin, India. *Revista de Biología Tropical*, 69(1), 60-76. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v69i1.42731>

- Tenesaca, K. (2022). *Caracterización geo ambiental de lagunas del Macizo del Cajas mediante técnicas de teledetección* [Tesis, Universidad del Azuay]. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/11784/1/17312.pdf>
- Veazie, P., Cockson, P., Henry, J., Perkins-Veazie, P., y Whipker, B. (2020). Characterization of Nutrient Disorders and Impacts on Chlorophyll and Anthocyanin Concentration of Brassica rapa var. Chinensis. *Agriculture*, 10(10:461), Article 10. <https://doi.org/10.3390/agriculture10100461>
- Wang, Y.-T., Yang, C.-H., Huang, K.-S., y Shaw, J.-F. (2021). Chlorophyllides: Preparation, Purification, and Application. *Biomolecules*, 11(8:1115), Article 8. <https://doi.org/10.3390/biom11081115>
- Wetzel, R. G., y Likens, G. (2000). *Limnological Analyses* (3rd ed.). Springer Science & Business Media.
- Wu, B., Dai, S., Wen, X., Qian, C., Luo, F., Xu, J., Wang, X., Li, Y., y Xi, Y. (2022). Chlorophyll-nutrient relationship changes with lake type, season and small-bodied zooplankton in a set of subtropical shallow lakes. *Ecological Indicators*, 135(108571), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108571>

## ANEXOS

### Anexo 1. Resultados parciales por muestreo o réplica

*Tabla 7. Resultados parciales del primer muestreo*

<b>Primer muestreo</b>	<b>480nm</b>	<b>630nm</b>	<b>647nm</b>	<b>663nm</b>	<b>664nm</b>	<b>665nm</b>	<b>750nm</b>	<b>restas</b>	<b>Monocromático</b>
Jigeno	0,022	0,006	0,008	0,013	0,121	0,012	0,000	0,012	3,261
Jigeno A	0,015	0,003	0,006	0,009	0,009	0,009	0,003	0,006	
Dos Chorreras	0,021	0,005	0,007	0,021	0,020	0,022	0,000	0,022	4,330
Dos Chorreras A	0,011	0,001	0,004	0,012	0,012	0,014	0,000	0,014	
Napale	0,602	0,275	0,329	0,669	0,670	0,665	0,207	0,458	117,612
Napala A	0,262	0,038	0,071	0,238	0,243	0,248	0,010	0,238	
Toreadora	0,100	0,089	0,092	0,097	0,097	0,101	0,096	0,005	1,871
Toreadora A	0,013	0,010	0,012	0,015	0,014	0,015	0,013	0,001	
Patos	0,166	0,147	0,153	0,161	0,164	0,168	0,152	0,016	3,903
Patos A	0,039	0,029	0,033	0,038	0,038	0,040	0,032	0,008	
Dublas	0,019	0,006	0,010	0,021	0,021	0,022	0,002	0,020	4,437
Dublas A	0,012	0,001	0,004	0,011	0,010	0,012	0,001	0,012	
Estrellas Cocha	0,090	0,076	0,082	0,088	0,087	0,089	0,079	0,010	3,261
Estrellas Cocha A	0,004	0,000	0,002	0,005	0,005	0,006	0,002	0,004	
Taita Chugo	0,044	0,037	0,040	0,044	0,043	0,046	0,039	0,007	3,796
Taita Chugo A	0,004	-0,003	-0,002	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,000	
Luspa	0,055	0,050	0,052	0,056	0,056	0,057	0,052	0,005	2,192
Luspa A	0,005	0,007	0,009	0,010	0,010	0,011	0,010	0,001	
Chuzalongo	0,017	0,003	0,007	0,013	0,014	0,014	0,001	0,013	3,154
Chuzalongo A	0,010	0,000	0,003	0,008	0,007	0,007	0,000	0,007	

*Tabla 8. Resultados parciales del segundo muestreo*

<b>Segundo muestreo</b>	<b>480nm</b>	<b>630nm</b>	<b>647nm</b>	<b>663nm</b>	<b>664nm</b>	<b>665nm</b>	<b>750nm</b>	<b>restas</b>	<b>Monocromático</b>
Jigeno	0,011	-0,004	-0,004	0,007	0,004	0,006	-0,016	0,022	1,604
Jigeno A	-0,004	-0,004	-0,004	0,005	0,002	0,003	-0,016	0,019	
Dos Chorreras	0,015	-0,001	0,000	-0,017	0,014	0,014	-0,018	0,032	2,138
Dos Chorreras A	0,010	-0,004	-0,003	0,012	0,007	0,010	-0,018	0,028	
Napale	0,200	0,033	0,055	0,224	0,226	0,217	-0,015	0,232	13,900
Napala A	0,178	0,029	0,047	0,194	0,196	0,191	-0,015	0,206	
Toreadora	0,032	-0,001	0,003	0,037	0,034	0,032	-0,018	0,050	2,673
Toreadora A	0,026	-0,001	0,001	0,029	0,026	0,028	-0,017	0,045	
Patos	0,003	-0,006	-0,007	0,002	-0,002	-0,001	-0,017	0,016	0,535
Patos A	0,001	-0,006	-0,008	0,000	-0,004	-0,002	-0,017	0,015	
Dublas	0,030	-0,001	0,001	0,022	0,018	0,019	-0,015	0,034	3,742
Dublas A	0,025	0,002	0,000	0,014	0,012	0,013	-0,014	0,027	
Estrellas Cocha	0,002	-0,006	-0,004	0,006	0,003	0,002	-0,017	0,019	0,535
Estrellas Cocha A	0,000	-0,007	-0,006	0,003	0,000	0,001	-0,017	0,018	
Taita Chugo	0,003	-0,006	-0,007	0,001	-0,003	-0,002	-0,018	0,016	1,604
Taita Chugo A	0,000	-0,006	-0,008	-0,002	-0,004	-0,003	-0,016	0,013	
Luspa	-0,002	-0,008	-0,009	-0,002	-0,003	-0,003	-0,017	0,014	0,000
Luspa A	-0,003	-0,008	-0,009	-0,002	-0,006	-0,004	-0,018	0,014	
Chuzalongo	0,009	0,010	-0,001	0,005	0,002	0,002	-0,015	0,017	0,000
Chuzalongo A	0,002	0,012	-0,001	0,006	0,002	0,004	-0,017	0,021	