



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

Universidad del Azuay

Facultad de Ciencia y Tecnología

Escuela de Biología. Ecología y Gestión

**Caracterización físico química en sistemas lacustres del Macizo del
Cajas**

Título del trabajo de titulación: Biólogo con mención en Ecología y
Gestión

Autor:

Daniela Katherine Auquilla Cabrera

Director:

Blgo. Edwin Zárate Hugo MSc.

Cuenca – Ecuador

2024

DEDICATORIA

A mis padres por creer en mis capacidades al depositar su confianza durante todas las etapas de mi vida y a mis hermanos por su apoyo infinito

AGRADECIMIENTO

A los docentes de la Escuela de Biología por transmitir sus valores y conocimientos durante toda esta etapa académica. A María Paz por su amistad al estar a mi lado desde los inicios de la carrera y el trabajo conjunto en la fase de campo. A mi tutor Mgt. Edwin Zárate por representar un apoyo fundamental en el desarrollo del proyecto y por la confianza depositada. A la Ing. Laura Enríquez por la asesoría técnica, su paciencia ante los contratiempos y predisposición durante toda la fase de laboratorio. Al Ing. Andrés Pérez por su guía técnica y facilidades en el laboratorio de Química Analítica. Al Ecol. David Siddons por contribuir con sugerencias y retroalimentación, principalmente en la fase estadística.

RESUMEN

El estudio se llevó a cabo en lagunas del Macizo del Cajas para generar una caracterización fisicoquímica mediante la determinación de concentraciones de clorofila y la composición química de aniones. Cuatro réplicas de muestreos de agua distribuidos dos en veranos y dos en inviernos fueron tomadas y analizadas a través de métodos de espectrofotométrica de clorofila y cromatografía iónica. La concentración de los parámetros registró valores bajos, que permitieron establecer que las lagunas presentan un estado oligotrófico. La estacionalidad influyó significativamente en la variabilidad de los parámetros fisicoquímicos, indicando una tendencia positiva para gran parte de los compuestos aniónicos en la época seca del monitoreo, salvo compuestos particulares que son acumulados en los sistemas lénticos por acción de la esorrentía debido a altas precipitaciones o relacionado posiblemente a factores que involucran la cercanía de la carretera a las lagunas. Los análisis de similaridad agruparon a las lagunas en dos grandes grupos que se ramifican en base a los rasgos comunes de ecosistemas característicos de los sistemas lacustres altoandinos, a la influencia humana como la presencia de la carretera en Toreadora y Dos Chorreras, y temas relacionados a la influencia de la ganadería en Napale.

Palabras clave: clorofila-a, aniones, estado trófico, temporalidad, estacionalidad, sistemas lacustres altoandinos

ABSTRACT

The study was carried out in lakes of the Cajas Massif to generate a physicochemical characterization by determining chlorophyll concentrations and the chemical composition of anions. Four replicates of water samples distributed, two in summers and two in winters, were taken and analyzed through chlorophyll spectrophotometric and ion chromatography methods. The concentration of the parameters registered low values, which allowed us to establish that the lakes present an oligotrophic state. Seasonality significantly influenced the variability of the physicochemical parameters, indicating a positive trend for a large part of the anionic compounds in the dry season of monitoring, except for particular compounds that are accumulated in lentic systems by the action of runoff due to high rainfall or possibly related to factors involving the proximity of the road to the lakes. The similarity analyzes grouped the lakes into two large groups that branch out based on the common features of ecosystems characteristic of high-Andean lake systems, human influence such as the presence of the highway in Toreadora and Dos Chorreras, and issues related to the influence of livestock farming in Napale.

Keywords: chlorophyll-a, anions, trophic state, temporality, seasonality, high-Andean lakes

ÍNDICES

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTO	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
ÍNDICES	V
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
INDICE DE ANEXOS	IX
Caracterización físico química en sistemas lacustres del Macizo del Cajas	1
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	4
Objetivo general	4
Objetivos específicos	4
CAPÍTULO 1	5
METODOLOGÍA	5
1. Área de estudio	5
2. Fase de Campo	6
2.1. Recolección de muestras	6
2.2. Medición de pH, Temperatura y Oxígeno disuelto	6
3. Fase de Laboratorio	6
3.1. Extracción de clorofila	6
3.2. Análisis Cromatográfico	6
4. Análisis de datos	8
4.1. Iones inorgánicos.....	8
4.2. Clorofila	9
4.3. Análisis Estadístico	10
CAPÍTULO 2	11
RESULTADOS	11
5. Análisis de aniones	11
6. Clorofila	13
7. Correlaciones	13
8. Análisis de Componentes Principales (PCA)	14
9. Análisis de Cluster Jerárquico	15

CAPÍTULO 3	16
DISCUSIÓN	16
CAPÍTULO 4	19
CONCLUSIÓN	19
ANEXOS	26

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Puntos de muestreo en las lagunas de la Reserva Macizo del Cajas.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2. Patrón 2pp. Identificación de aniones para cada uno de los picos generados según los tiempos de retención</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3. Concentración de aniones en temporadas estacionales.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 4. Concentración de aniones en lagunas del Macizo del Cajas.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 5. Concentración de clorofila alfa, beta y c en temporadas estacionales para lagunas del Macizo del Cajas.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 6. Concentración de clorofila alfa, beta y c en lagunas del Macizo del Cajas.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 7. Análisis de Componentes Principales entre los parámetros fisicoquímicos evaluados en las lagunas del Macizo del Cajas</i>	<i>14</i>
<i>Figura 8. Dendrograma que agrupa los cuerpos lénticos del Macizo del Cajas en diferentes niveles de similitud a partir de los parámetros fisicoquímicos.....</i>	<i>15</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Dionex™ Combined Seven Anion Standard II.....</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 2. Volúmenes obtenidos para cada concentración de los patrones.....</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 3. Coeficientes de correlación entre las variables fisicoquímicas analizadas en lagunas del Macizo del Cajas.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 5. Valores promedio de Clorofila a.b y c obtenido a partir del método tricromático.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 6. Concentraciones de aniones en diferentes estaciones.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 7. Categorías tróficas OCDE.....</i>	<i>30</i>

INDICE DE ANEXOS

<i>Anexo 1. Filtración de las muestras de agua</i>	<i>26</i>
<i>Anexo 2. Generación de cromatogramas</i>	<i>26</i>
<i>Anexo 3. Elaboración del eluyente.....</i>	<i>26</i>
<i>Anexo 4. Equipos especializados para pH, Temperatura y Oxígeno Disuelto</i>	<i>27</i>
<i>Anexo 5. Laguna Napale</i>	<i>27</i>
<i>Anexo 6. Laguna de Patos.....</i>	<i>27</i>
<i>Anexo 7. Laguna Estrellascocha.....</i>	<i>28</i>
<i>Anexo 8. Laguna Chusalongo</i>	<i>28</i>

Aquilla Cabrera Daniela Katherine

Trabajo de Titulación

Zarate Hugo Edwin Javier MSc.

2024

Caracterización físico química en sistemas lacustres del Macizo del Cajas

INTRODUCCIÓN

La limnología de los sistemas lacustres altoandinos tropicales se ha convertido en un importante campo de la investigación contemporánea para afrontar las problemáticas ecológicas vinculadas a los factores inductores de perturbación que suscitan amenazas significativas a los ecosistemas. En este ámbito, el proceso de eutrofización destaca como uno de los problemas ambientales más eminentes dentro de estos ecosistemas. La eutrofización es un fenómeno natural que se produce cuando ocurre un enriquecimiento de nutrientes, tales como nitrógeno y fósforo, que ingresan a partir de materiales que son transportados principalmente por precipitación (Miranda & Rosales, 2018), éste fenómeno suele desencadenar en la proliferación de fitoplancton y ocasiona condiciones adversas, como el agotamiento de oxígeno disuelto y la toxicidad del agua, lo que en última instancia altera el funcionamiento normal del ecosistema acuático (Doering et al., 2006).

Los lagos altoandinos posicionados cerca del ecuador están sujetos a variaciones estacionales limitadas de temperatura y, por lo tanto, generan una estratificación térmica débil (Altundağ et al., 2019), aquellos que se encuentran en regiones montañosas y de gran altitud, se caracterizan por su vulnerabilidad a los cambios ambientales, lo que los convierte en ecosistemas frágiles y sensibles a la perturbación. Debido a la complejidad en el control y manejo del recurso hídrico, la eutrofización se ha tornado en un problema de calidad de agua que amerita una gestión adecuada de los cuerpos lacustres y requiere monitoreos frecuentes a través de la obtención de series temporales de datos que permitan evaluar la evolución del sistema léntico, así como las tendencias de su variación (Miranda & Rosales, 2018). Se han descubierto diversos enfoques de modelización para predecir los cambios en la calidad del agua relacionados con la eutrofización; en este campo el Programa de Estudios sobre Eutrofización de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD) diseñó un informe que aborda los factores para cuantificar las relaciones entre la carga de nutrientes y la respuesta a la eutrofización (Lee & Jones, 1981). Con relación al monitoreo, el informe describe métodos para recopilar datos

relevantes con el fin de ejecutar los análisis correspondientes; entre las variables limnológicas que fueron consideradas como esenciales, se describen: 1) físicas: temperatura, conductividad eléctrica, penetración de luz y radiación solar; 2) químicas: pH, O₂ disuelto, fósforo, nitrógeno, SiO₂, alcalinidad, acidez y cationes; 3) biológicas: Fitoplancton (clorofila alfa), producción de oxígeno (producción primaria) y carbón orgánico (OECD, 1982).

La evaluación de la calidad del agua de un lago altoandino se presenta utilizando diferentes enfoques cuantitativos. Siguiendo las directrices del informe descrito por la OECD (1982), las variables fisicoquímicas que se tuvieron en consideración para evaluar la condición trófica fueron las concentraciones de clorofila alfa (Chl-a) e iones inorgánicos, con un enfoque particular en aquellos derivados del fósforo y nitrógeno. La determinación de la clorofila alfa ha considerado múltiples métodos, aunque el enfoque común se centra en el uso de técnicas espectrofotométricas para medir la absorbancia de la solución de extracto a longitudes de onda específicas (Li et al., 2017). Las lecturas de absorbancia se toman a longitudes de onda, comúnmente alrededor de 630 nm y 664 nm, y la cuantificación se efectúa utilizando ecuaciones de calibración que se describen en fórmulas protocolarias.

La composición química del cuerpo lacustre está relacionada principalmente con características morfológicas del lago y la cuenca, el lecho de roca, las formaciones geológicas volcánicas y la cobertura del suelo (Van Colen et al., 2017). Usualmente se utilizan técnicas analíticas, tales como la cromatografía iónica para determinar la concentración de aniones en unidades de partes por billón. (ppb) (Bravo-Inclán & Cecilia, 2017). La técnica se basa en la separación de iones en función de su afinidad utilizando un soporte sólido que se empaqueta dentro de una columna, produciendo la fase estacionaria (Díaz, 2018). Una fase móvil se bombea a través de la columna en la cromatografía de intercambio iónico utilizando agua como disolvente, y a medida que un eluyente corre a través de la columna, los iones absorbidos comienzan a separarse, de forma que las concentraciones de los compuestos se pueden medir con precisión mediante gráficos denominados "cromatogramas", que representan la intensidad de la señal del ión con respecto al tiempo (Muntean et al., 2009).

En la evaluación de la calidad del agua de cuerpos lacustres, la interpretación de los datos recopilados para evaluar el grado de eutrofización implica la generación de análisis de correlación para identificar relaciones estadísticas entre estos factores, en donde la atención recae en el fósforo como factor clave. En este sentido, el informe de Vollenweider & Kerekes (1982) sostienen que la clorofila está muy correlacionada tanto con la incorporación de nitrógeno como con la concentración de fósforo, aunque la asociación de clorofila con el fósforo es evidentemente más significativa (OECD. 1982). En principio, si la integridad del ecosistema está amenazada, se

esperaría una correlación positiva, ya que los incrementos en la concentración de nutrientes en cuerpos de agua pueden conducir a concentraciones de clorofila más elevadas, indicando que hay una alta biomasa de fitoplancton (Bolaños et al., 2017). Sin embargo, existen antecedentes con respecto a estudios que analizan características fisicoquímicas dentro del Macizo del Cajas, que registran concentraciones bajas de nutrientes y clorofila, lo cual supone un fenómeno común que ocurre en los lagos altoandinos, ya que suelen presentar una baja mineralización y procesos vinculados a la geomorfología de las zonas del estudio (Andrade & Larriva, 2015)

Aunque el proceso de eutrofización de los lagos todavía no ha provocado un deterioro significativo en la calidad del agua en los cuerpos lénticos de estudio, el equilibrio ecológico dentro de los lagos es extremadamente frágil y sensible al sobre-enriquecimiento de nutrientes y a la eutrofización acelerada (García-Avila et al., 2023). En este sentido, es importante el análisis de tales parámetros, no solo para certificar las condiciones del recurso que es utilizado para el abastecimiento a la población de sus necesidades intrínsecas, sino también para interpretar la dinámica ecológica detrás de las interacciones entre los procesos biológicos, químicos y físicos a lo largo del tiempo. Lamentablemente, son escasas las líneas de investigación e informes científicos que reporten resultados relevantes con respecto a los análisis de agua dentro de los sistemas lénticos en Ecuador, a pesar de la necesidad de generar información referencial para fomentar un manejo y gestión adecuada a través de la toma de decisiones externas.

Dentro de este contexto, la motivación para este estudio surge de la oportunidad para difundir los alcances más relevantes con relación al estado trófico y la calidad de agua de lagos altoandinos ubicados en el Macizo del Cajas en diferentes periodos estacionales, empleando análisis de similitud y correlaciones estadísticas que exhiban una relación lineal entre las variables fisicoquímicas analizadas para estimar la evolución relacionada a la calidad de agua y el proceso de eutrofización en los sistemas lacustres.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Determinar la calidad de agua en lagunas del Macizo del Cajas mediante un análisis de factores fisicoquímicos a partir de muestras de diferentes periodos estacionales

Objetivos específicos

- Conocer la composición química de los sistemas lénticos del Macizo del Cajas mediante las concentraciones de iones inorgánicos utilizando técnicas de cromatografía iónica
- Determinar las concentraciones de clorofila mediante métodos protocolarios estandarizados
- Definir la calidad de los ecosistemas lénticos del Macizo del Cajas en diferentes estaciones temporales mediante correlaciones entre los parámetros fisicoquímicos y análisis de similaridad

CAPÍTULO 1

METODOLOGÍA

1. Área de estudio

El Macizo del Cajas ($2^{\circ}50'S$. $79^{\circ}14'W$. 285 km^2) está situado en la Cordillera de los Andes ecuatorianos entre 3.100 y 4.450 m de altitud (Aguilera & Coronel, 2013), es rodeado por vegetación que se compone principalmente de pastizales de páramo con arbustos dispersos de *Polylepis*. La geomorfología está determinada en gran medida por eventos glaciares que ocurrieron durante los dramáticos cambios climáticos hasta finales del Pleistoceno (Navarrete, 2003), donde parte de la huella glaciaria es una gran densidad de lagos pequeños de la zona. Los principales tipos de suelos en la región son Andosoles e Histosoles no alofánicos de origen volcánico que se caracterizan por un alto contenido de materia orgánica, alta porosidad, y una alta capacidad de retención de agua (Vintimilla, 2023).

En el corazón de El Macizo se encuentra el Parque Nacional Cajas, que posee la mayor densidad de lagos del Ecuador, con alrededor de 15 cuerpos de agua/km² o 244 lagos permanentes en total. Los lagos y ríos de la zona abastecen de agua potable a la ciudad de Cuenca (400.000 habitantes). El área fue declarada parque nacional en 1996, siendo posteriormente administrada por ETAPA EP (Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable y Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca), una empresa local de servicios públicos encargada del suministro de agua potable para la ciudad de Cuenca (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2018).

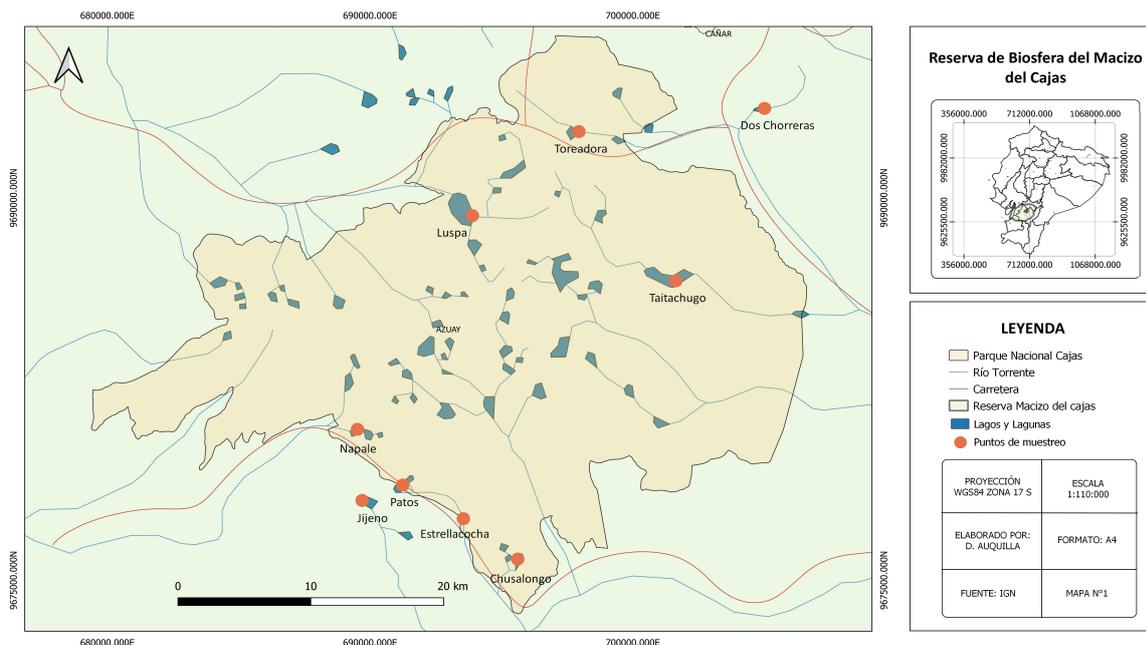


Figura 1. Puntos de muestreo en las lagunas de la Reserva Macizo del Cajas
Fuente: Autora

2. Fase de Campo

2.1. Recolección de muestras

Las muestras de agua fueron recolectadas en la zona limnética de nueve lagunas (Toreadora, Estrellascocha, Luspa, Patos, Dos Chorreras, Napale y Taitachugo) ubicadas en el Macizo del Cajas, en donde se realizaron 4 réplicas (2 en cada periodo estacional) para obtener los datos de las características fisicoquímicas de los cuerpos de agua.

2.2. Medición de pH, temperatura y oxígeno disuelto

Se determinaron los valores de pH, temperatura (C°) y oxígeno disuelto directamente en el campo, mediante el uso de sondas portátiles en el punto de muestreo

3. Fase de Laboratorio

3.1. Extracción de clorofila

Las muestras de clorofila se obtuvieron colectando muestras de agua directamente de la laguna, precautelando el contacto con la luz solar para evitar la reacción con la clorofila o alteración en las propiedades fisicoquímicas. Las muestras fueron almacenadas en hieleras y se transportaron hacia el Laboratorio de Limnología de la Universidad del Azuay para ser filtradas en condiciones de semioscuridad con la finalidad de evitar la degradación de la clorofila.

Una vez filtrada toda la muestra, los filtros fueron colocados, con la ayuda de pinzas, en tubos de ensayo previamente cubiertos con papel aluminio, agregando 10 ml de acetona al 90% y se dejó en refrigeración a 4 C° durante veinticuatro horas. Una vez completada la extracción, se procedió a centrifugar los tubos de ensayo a 5000 rpm durante 10 minutos para clarificar la muestra. Se extrajo 3 ml del extracto de clorofila para cada uno de los tubos y se colocó en la cubeta de paso óptico de 1 cm para estimar la densidad óptica mediante espectrofotómetro UV visible. La estimación de la clorofila se llevó a cabo a partir de dos lecturas: Sin Acidificar y Acidificado. La primera lectura se realizó a través de la colocación del extracto en la cubeta de manera inmediata, mientras que la segunda lectura se realizó tras añadir de HCl 0.1N en el extracto y dejando en reposo durante cinco minutos (Wetzel & Likens, 1991).

3.2. Análisis Cromatográfico

La estimación de aniones se llevó a cabo mediante la técnica de cromatografía iónica. Se empleó el método de calibración a través del uso de cinco patrones obtenidos mediante la dilución de una

concentración inicial para la generación de cromatogramas estándar utilizando el equipo Thermo Scientific™ Dionex™.

3.2.1. Preparación del eluyente

Se preparó un concentrado disolviendo completamente 0.3710 gr de Carbonato de sodio (Na₂CO₃) y 0.0840 gr de Bicarbonato de sodio (NaHCO₃) en 1000 ml de agua desionizada. Subsecuentemente, la solución fue aforada en un balón de 1000 ml y se procedió a desgasificar el eluyente.

3.2.2. Preparación de patrones

Se preparó 1000 ml de solución patrón utilizando 10 ml del producto “Dionex™ Combined Seven Anion Standard II”, una solución preparada en base a una disolución de sales de alta pureza en agua desionizada, cuyas concentraciones se enlistan en la siguiente tabla:

Tabla 1. Dionex™ Combined Seven Anion Standard II

Dionex Seven Anion Standard II		
Components	Concentration	
	Labeled	Measured
Fluoride	20 mg/L	19.8 mg/L
Bromide	100 mg/L	100 mg/L
Chloride	100 mg/L	99.1 mg/L
Nitrite	100 mg/L	100 mg/L
Nitrate	100 mg/L	98.2 mg/L
Sulfate	100 mg/L	99.4 mg/L
Phosphate	200 mg/L	200 mg/L

Fuente: Thermo Fisher. (2013).

Luego de preparar la solución estándar, ésta se diluyó en balones de aforo para obtener soluciones de 2ppm, 1pp, 0.5 ppm, 0.25 ppm y 0.1 ppm, agregando las cantidades calculadas que se describen en la *Tabla 2*.

Tabla 2. Volúmenes obtenidos para cada concentración de los patrones

Concentración	Volumen
0.1 ppm	10/100 ml
0.25 ppm	25/100 ml
0.5 ppm	50/100 ml
1 ppm	10/1000 ml
2ppm	100/100 ml

Fuente: Elaboración propia (2024).

Una vez obtenidos los patrones, se procedió a inyectar las soluciones preparadas para obtener las curvas de calibración. Durante periodos de tiempo de 25 min, se inyectó un blanco (agua desionizada) y luego los cinco patrones para generar todas las curvas de calibración referenciales (*Figura 3*).

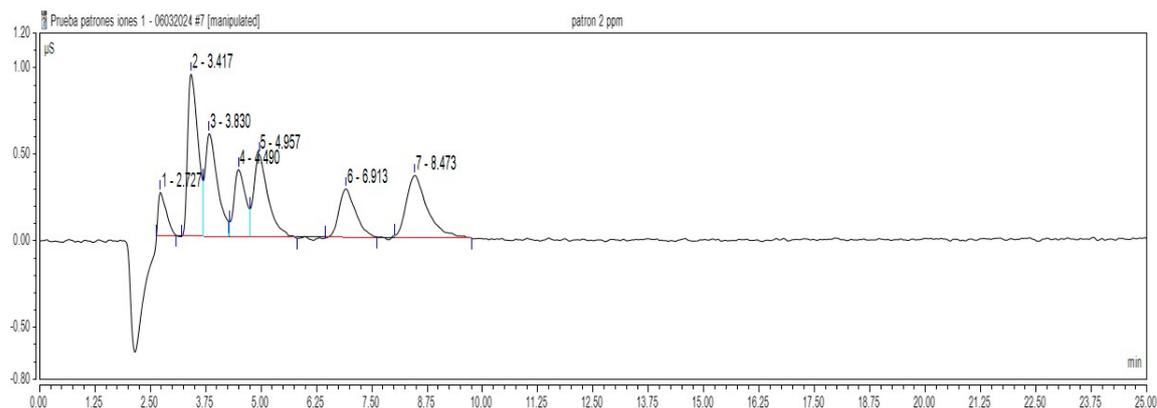


Figura 2. Patrón 2pp. Identificación de aniones para cada uno de los picos generados según los tiempos de retención

3.2.3. Inyección de la muestra

Se procedió a realizar concentraciones de las muestras de agua, agregando 100 ml dentro de un vaso de precipitación para introducir en un horno a 63°C, con el fin de reducir su volumen a la cuarta parte. Una vez que el volumen es concentrado, se procede a aforar con agua desionizada en un balón de 50 ml para proceder a inyectar 50 µl de muestra filtrada en el equipo utilizando filtros Agilent de 0.2 µm.

4. Análisis de datos

4.1. Iones inorgánicos

El sistema de recolección de datos ejecuta el software de cromatografía (Chromeleon™ 7) para producir los cromatogramas de las soluciones estándar, así como de las muestras inyectadas. Este sistema identifica los iones según el tiempo de retención y cuantifica el área del pico; de manera que se pueda comparar los tiempos de retención de la muestra con los producidos a partir de los patrones para la identificación de los analitos. Subsecuentemente, se obtiene el área de las curvas patrón que representa cada analito para generar curvas de calibración y determinar los modelos lineales, con el fin de extraer los valores de las variables necesarias para cuantificar la concentración, integrando el área de los aniones presentes en las muestras de las lagunas a partir de las siguientes fórmulas.

$$y = mx + b$$

$$\text{Área } a = m(\text{Concentración}) + b$$

$$\text{Concentración} = \frac{\text{Área } a - b}{m}$$

Donde:

Área _a → Área del anión presente en las muestras de las lagunas

4.2. Clorofila

Una vez se obtuvieron las mediciones de concentración de los pigmentos, se miden a longitudes de onda específicas y se calculan usando las fórmulas sugeridas por Wetzel & Likens (1991).

4.2.1. Método monocromático

$$\text{Chl - a } (\mu\text{g/l}) = \frac{(k)(F)(E6650 - E665a)(v)}{(V)(Z)}$$

Donde:

Chl-a → Clorofila alfa

E6650 → Densidades ópticas registradas en la longitud de onda a 665 nm

E665a → Densidades ópticas registradas en la longitud de onda a 665 nm (acidificado)

k → Coeficiente de absorción de la clorofila α , = 11.0

F → Factor para equiparar la reducción de la absorbancia a la concentración inicial de clorofila, 1,7:0.7, o = 2.43

V → Volumen del agua filtrada en litros, = 500 ml

v → Volumen del extracto en ml, = 3 ml

Z → Longitud del camino de la luz a través de la cubeta o celda en cm

4.2.2. Método tricromático:

$$* \text{ Chl - a } (\mu\text{g/l}) = \frac{(Ca)(v)}{(V)(Z)}$$

$$\text{Chl - } \alpha (\mu\text{g/l}) = \frac{[11.85(A664 - A750) - 1.54(A647 - A750) - 0.08(A630 - A750)xy]}{(V)}$$

$$* \text{ Chl - b } (\mu\text{g/l}) = \frac{(Cb)(v)}{(V)(Z)}$$

$$\text{Chl - b } (\mu\text{g/l o mg/m}^3) = \frac{[21.3(A664 - A750) - 5.43(A647 - A750) - 2.66(A630 - A750)xy]}{(V)}$$

$$* \text{ Chl - c } (\mu\text{g/l}) = \frac{(Cc)(v)}{(V)(Z)}$$

$$\text{Chl - c } (\mu\text{g/l}) = \frac{[24.52(A664 - A750) - 1.67(A647 - A750) - 7.60(A630 - A750)xy]}{(V)}$$

Donde:

Chl-b → Clorofila b

Chl-c → Clorofila c

A480, A630, A647, A663, A664, A665, A750 → Densidades ópticas registradas en las longitudes establecidas

v → Volumen del extracto en ml, = 3 ml

V → Volumen del agua filtrada en litros, 500 ml

4.3. Análisis Estadístico

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos fueron tratados estadísticamente utilizando los supuestos de distribución normal para cada punto de muestreo y cada período temporal. Los supuestos de distribución normal fueron verificados aplicando la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk en R version 4.2.3 (2023).

4.4. Correlación de Pearson

Se utilizó un análisis de correlación para determinar la relación lineal entre dos variables cuantitativas. Los coeficientes de correlación pueden variar entre -1 y 1, cuya interpretación se basa en la magnitud y signo: valores cercanos a 1 o -1 representan relaciones fuertes, mientras que valores cercanos a 0 indican relaciones débiles. Es importante destacar que una correlación positiva significa que a medida que una variable aumenta, la otra tiende a aumentar también, mientras que una correlación negativa indica que cuando una variable aumenta, la otra tiende a disminuir.

4.5. Análisis de Componentes Principales (PCA)

Con el fin de facilitar la visualización del análisis de datos de manera simplificada, se utilizó el Análisis de Componentes Principales (PCA) para reducir la dimensionalidad del conjunto de datos mediante la transformación de las variables iniciales hacia un conjunto nuevo de variables denominados “componentes principales” que retienen la mayor parte de la variación total del sistema, para lo cual se utilizó el Software R version 4.2.3 (2023) mediante las funciones *fviz_pca()* del paquete “ggplot2” (v3.3.5; Wickham, 2016).

4.6. Análisis de Cluster Jerárquico

Se utilizó el análisis cluster jerárquico para generar agrupamientos que organizan el conjunto de lagunas en base en la similitud de los parámetros fisicoquímicos a través del método aglomerativo. Se empleó el Software R version 4.2.3 (2023) para la construcción de dendrogramas aplicando la distancia euclidiana con el paquete “maps” (v3.4.0; Becker & Wilks, 2021), a través del método = "euclidean"

CAPÍTULO 2

RESULTADOS

5. Análisis de aniones

La evaluación de aniones se llevó a cabo analizando las concentraciones de los compuestos para cada una de las lagunas en estudio y según los periodos estacionales monitoreados. En la temporada seca que conforman los meses entre junio y septiembre se han registrado elevadas concentraciones (entre 0.5 mg/l – 2 mg/l) para gran parte de los compuestos aniónicos. Los fosfatos (PO_4) manifestaron esta tendencia, aunque sus valores máximos se presentaron en la época húmeda en la laguna de Napale. Por el contrario, la evaluación de sulfatos y cloruros no exhibieron un patrón estacional definido relacionado a las cantidades presentes de los nutrientes mencionados; sin embargo, éste último fue la excepción en las lagunas de Patos y Taitachugo, en donde se observaron las entradas constantes de cloruros en la estación seca (*Figura 4*).

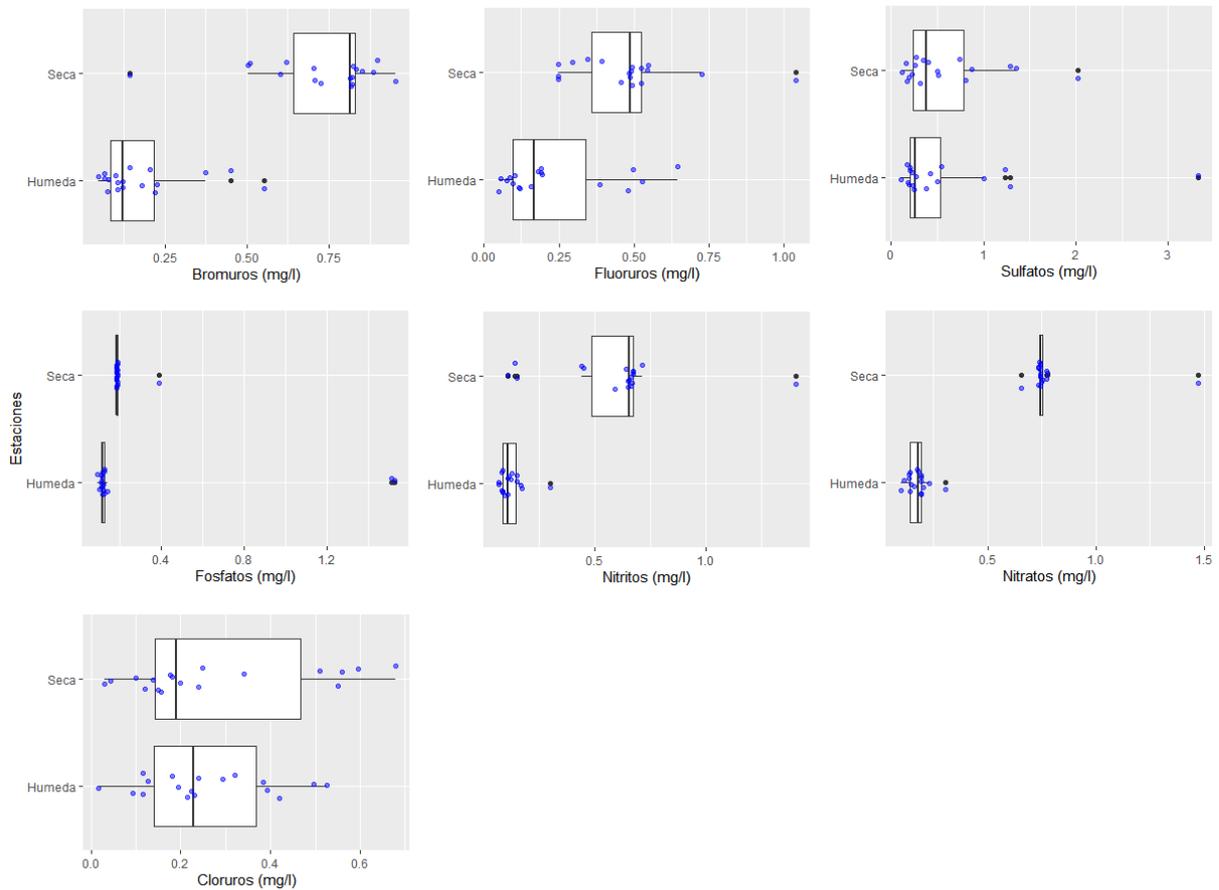


Figura 3. Concentración de aniones en temporadas estacionales

Aunque la gran mayoría de los cuerpos lénticos en estudio registraron altos valores de concentración de fluoruros en la estación seca, también existieron varias lagunas como Taitachugo (0.49 mg/l) y Toreadora (0.645 mg/l) que presentaron concentraciones elevadas en la

temporada húmeda. Algo similar a lo que sucedió con los cloruros en la laguna Chusalongo y Napale en concentraciones parcialmente inferiores.

La concentración de los aniones también presentó diferentes distribuciones en los cuerpos lacustres de estudio (*Figura 5*). Los fosfatos en la laguna Napale presentó una gran diferencia del resto de lagunas registrando un grupo de valores altos; mientras que para los nitritos se observó la entrada constante que se explica en un rango amplio de concentraciones para gran mayoría de los cuerpos lacustres. Con relación a los nitritos, las lagunas de Luspa y Toreadora presentaron menores concentraciones, aunque para el resto de lagunas se observó un rango de valores similares con límites que suelen sobrepasar los 0.5 mg/l. Los sulfatos presentaron cantidades moderadas en la gran mayoría de los lagos, destacando a Luspa, Dos Chorreras y Napale, como aquellas que exhibieron valores elevados en varias de las muestras.

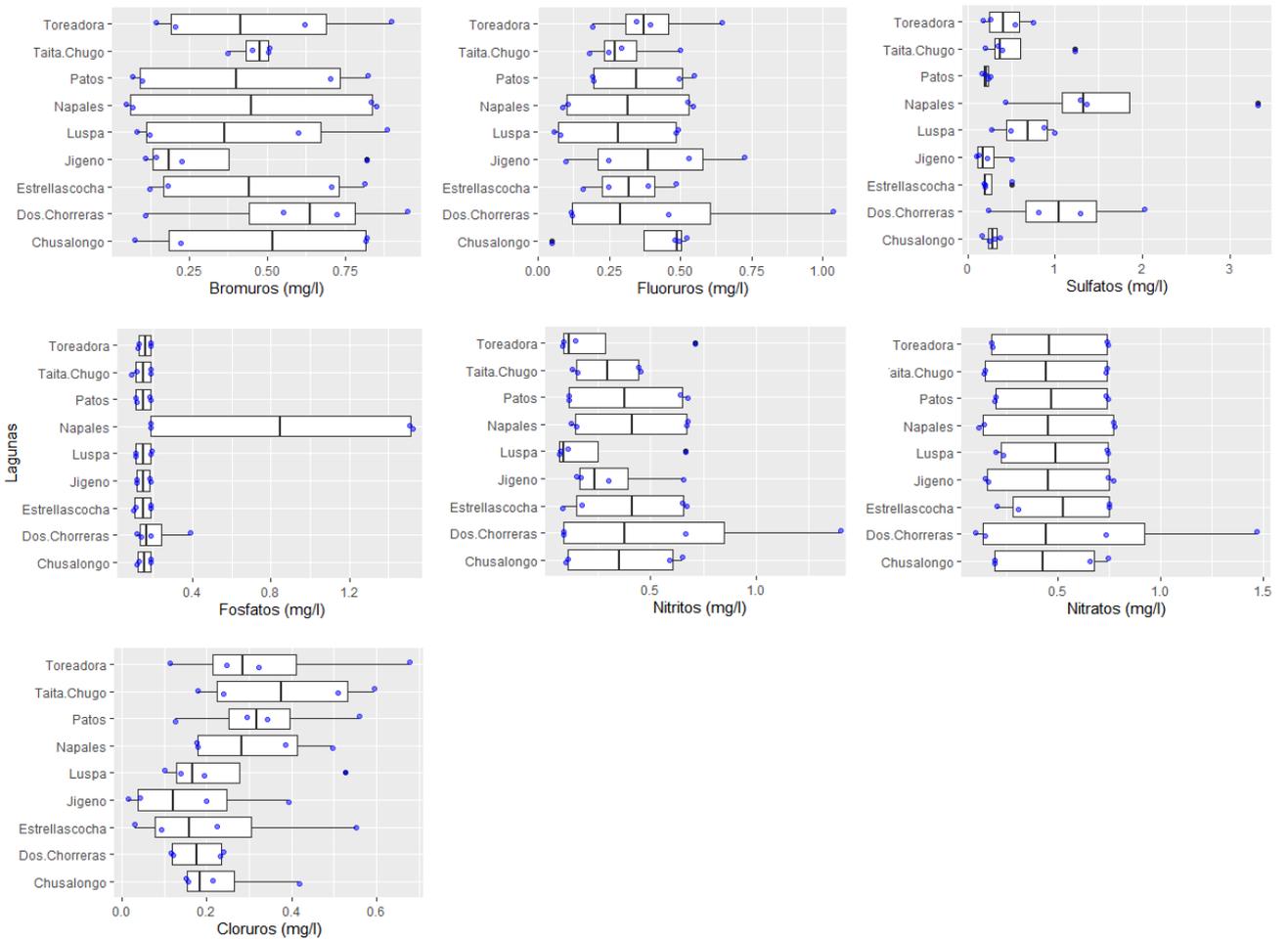


Figura 4. Concentración de aniones en lagunas del Macizo del Cajas

6. Clorofila

Los tipos estructurales de clorofila Ch-a, Ch-b y Ch-c reflejaron valores similares en ambos períodos estacionales, aunque se observó una leve tendencia que se inclinan a aumentar en la temporada seca (*Figura 6*). Este patrón es claro en las lagunas de Dos Chorreras y Taitachugo para los tres tipos de clorofila.

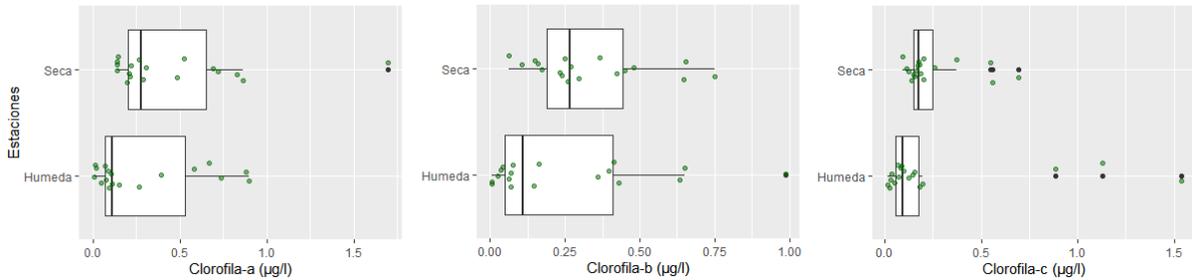


Figura 5. Concentración de clorofila alfa, beta y c en temporadas estacionales para lagunas del Macizo del Cajas

La concentración de clorofila también mostró diferentes distribuciones en los cuerpos lacustres de estudio (*Figura 7*). Los valores máximos de clorofila-a se registraron en Patos (1.69 µg/l) y Estrellascocha (1.54 µg/l). Ésta última laguna junto con Toreadora presentó concentraciones máximas para clorofila-c, y con relación a la clorofila-b se exhibió un pico de 0.99 µg/l en la laguna Luspa.

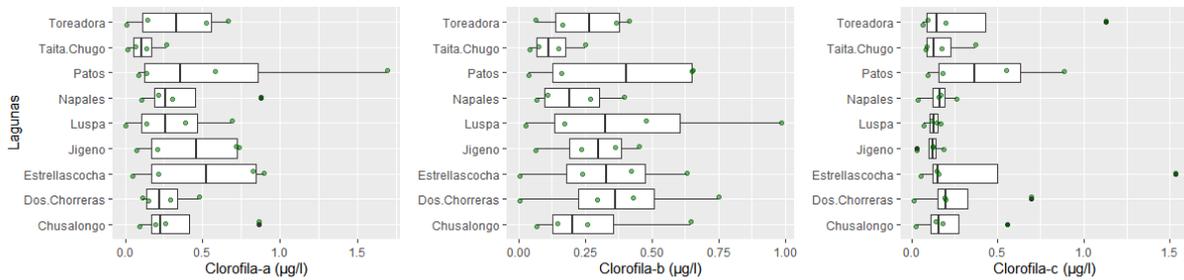


Figura 6. Concentración de clorofila alfa, beta y c en lagunas del Macizo del Cajas

7. Correlaciones

El análisis de correlación entre los factores químicos evidenció una significancia alta (> 0.6) entre la presencia de Bromuros y Fluoruros con los compuestos nitrogenados, al igual que los tipos de clorofila. Se presentaron coeficientes de significancia media (entre 0.3 y 0.6) para los tipos de Clorofila-c y Clorofila-b, así como la asociación entre Fluoruros - Bromuros, Fosfatos – Sulfatos (*Tabla 3*).

Tabla 3. Coeficientes de correlación entre las variables fisicoquímicas analizadas en lagunas del Macizo del Cajas

	Clorofila-a	Clorofila-b	Clorofila-c	Bromuros	Fluoruros	Cloruros	Nitritos	Nitratos	Fosfatos	Sulfatos
Clorofila-a	1									
Clorofila-b	0.700	1								
Clorofila-c	0.452	0.510	1							
Bromuros	0.143	0.141	-0.018	1						
Fluoruros	0.424	0.356	0.351	0.514	1					
Cloruros	-0.048	-0.010	-0.054	0.025	-0.365	1				
Nitritos	0.176	0.243	0.118	0.756	0.605	-0.003	1			
Nitratos	0.208	0.253	0.054	0.824	0.671	0.042	0.865	1		
Fosfatos	0.116	-0.012	-0.108	-0.182	-0.169	0.252	-0.029	-0.107	1	
Sulfatos	-0.220	-0.163	-0.142	0.051	0.024	0.067	0.209	0.109	0.538	1

8. Análisis de Componentes Principales (PCA)

Se capturó la mayor variabilidad de los parámetros químicos (varianza total explicada=71%) en tres componentes derivados del PCA. El primer componente (PCI= 35.3 %) refleja una mayor proporción para cuatro de los nutrientes (Fluoruros, Bromuros, Nitritos y Nitratos) en la temporada seca simbolizado por triángulos; y el segundo componente (PCII= 20.3%) representa una contribución mayor de los Cloruros y Fosfatos para el periodo húmedo que se presentan en círculos. El resto de parámetros no tuvo una asociación significativa con los periodos estacionales monitoreados.

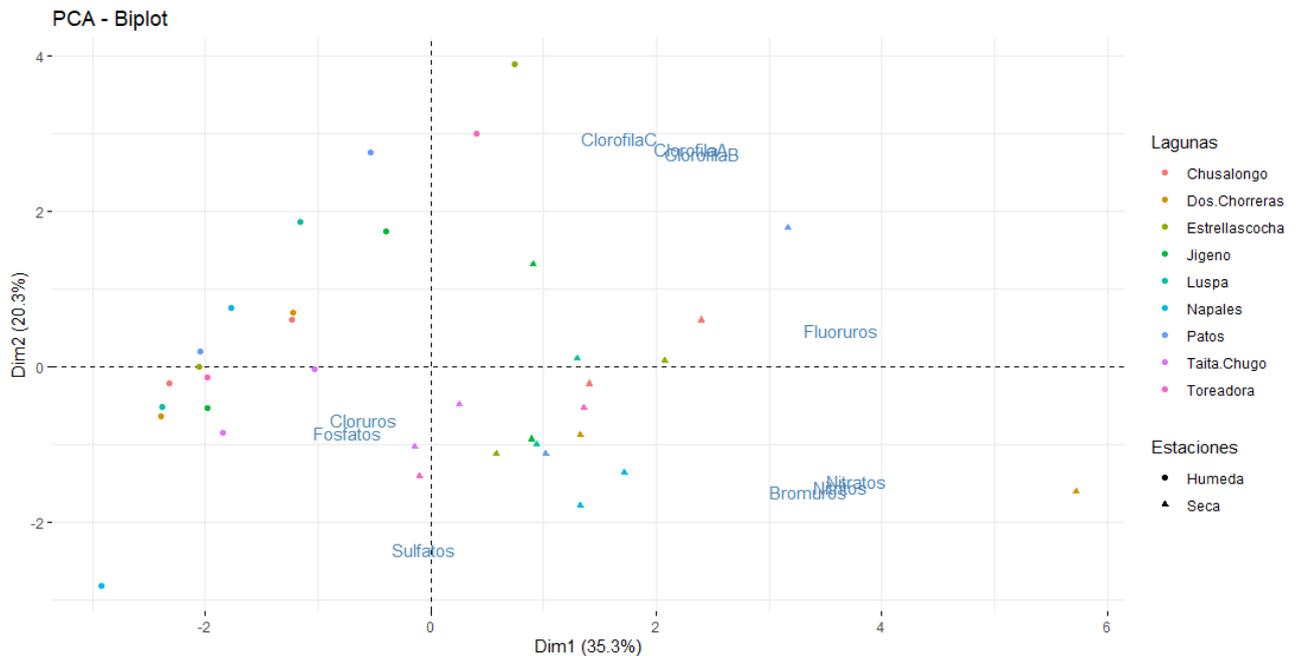


Figura 7. Análisis de Componentes Principales entre los parámetros fisicoquímicos evaluados en las lagunas del Macizo del Cajas

9. Análisis de Cluster Jerárquico

El análisis jerárquico entre los cuerpos lénticos formó agrupaciones para organizarlos en diferentes niveles de similitud. El dendrograma se clasificó en dos grandes grupos (clusters) que relacionan las características fisicoquímicas presentes en cada una de las lagunas. El primer cluster identifica un mayor nivel de cercanía entre Dos Chorreras y Napale, que en combinación se asemejan con la laguna Toreadora. Por otro lado, el segundo cluster establece una menor distancia entre Chusalongo y Estrellascocha que; a su vez, manifiesta un grado de similitud con Jigeno, formando así un subgrupo que se asocia con el subconjunto conformado por Luspa y Patos. Este aglomerado se asimila con la laguna Taitachugo, que se ramifica para compartir estas características con los cuerpos lacustres mencionados (*Figura 8*).

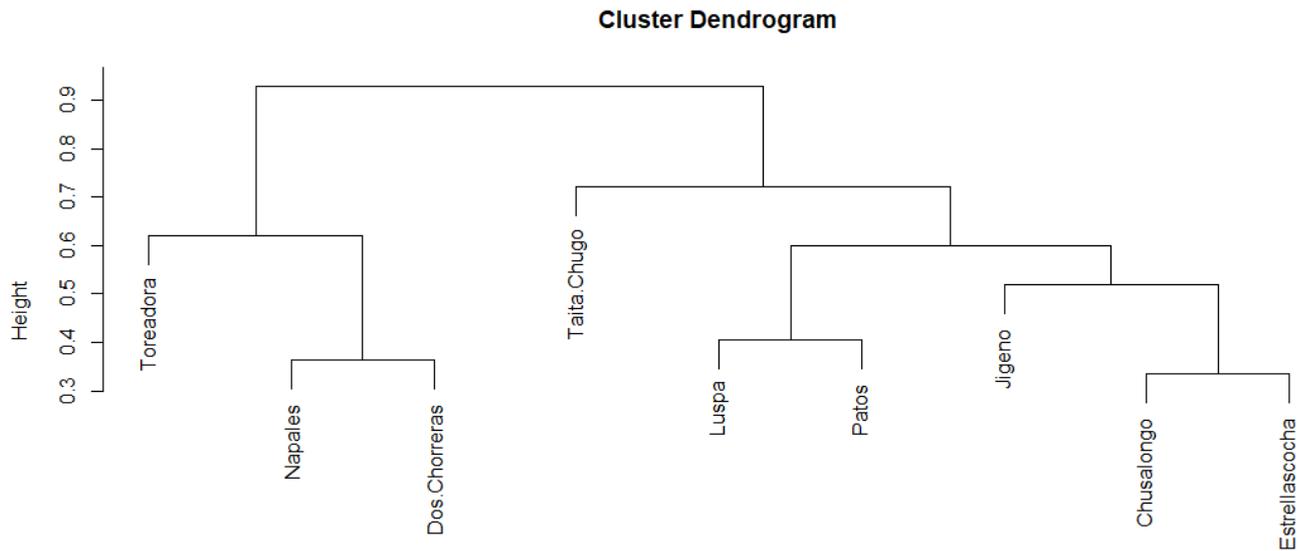


Figura 8. Dendrograma que agrupa los cuerpos lénticos del Macizo del Cajas en diferentes niveles de similitud a partir de los parámetros fisicoquímicos

CAPÍTULO 3

DISCUSIÓN

Los lagos del Macizo del Cajas que fueron analizados mostraron un pH circumneutral, menores temperaturas y bajos nutrientes provenientes de naturaleza del lecho rocoso y procesos de mineralización, que al parecer presentan una leve biodisponibilidad para el fitoplancton. La variación entre estos parámetros puede relacionarse a los factores climáticos; el pH registrado en las lagunas indica que se consideran aguas de neutras a alcalinas, propias de las zonas del neotrópico (Hernández-Altilano et al., 2012). Los bajos niveles de oxígeno disuelto son características de factores geoquímicos de la región, para los valores de DO se encontraron resultados similares al estudio de Andrade & Larriva (2015), ya que se manifestaron concentraciones de oxígeno disuelto superiores a 6 mg/l en el epilimnio a los 10 metros de la columna de agua, lo cual estaría relacionado con procesos de mezcla y estratificación en lagos altoandinos. Con relación a la variación de temperatura, se vería influenciado por la transición de la estacionalidad y características morfométricas propias de cada cuerpo de agua.

Entre los principales resultados del estudio, se reporta la influencia de la estacionalidad sobre las concentraciones de nutrientes en los cuerpos de agua. La variación estacional es de fundamental importancia a la hora de establecer mediciones, ya que puede cambiar la concentración de nutrientes y además tiene gran correlación con la temperatura, nitratos, OD, cloruros y sólidos disueltos (Wunderlin et al., 2001). En primera instancia, se presentó una alta significancia en la asociación entre la concentración de fosfatos y cloruros en el periodo húmedo. El bajo contenido de cloruros procede de origen atmosférico debido a masas de aire del oeste consistente en la deposición de los Andes del Sur, lo que puede proporcionar variabilidad estacional en los cuerpos lacustres del Macizo del Cajas (Beiderwieden et al., 2005). Los valores máximos de concentración fueron de ≈ 0.6 mg/L en Taitachugo y Toreadora, que se pueden atribuir por altos depósitos de sales debido a procesos hidrológicos/precipitaciones provenientes del Pacífico durante épocas de lluvia, o también se puede explicar por factores que relacionan la cercanía de los cuerpos de agua con la carretera que cruza para llegar a la laguna Toreadora, lo que indicaría una sensibilidad del sistema (Makowski Giannoni et al., 2016).

Según García-Avila et al., (2023), las concentraciones de fosfatos suelen fluctuar entre 0.05 y 3.76 mg/L durante temporadas húmedas en lagunas del Macizo del Cajas. Las máximas concentraciones fueron registradas en Napale (1.52 mg/L y 1.51 mg/L), una laguna altoandina alejada que suele presentar características prístinas; estos valores elevados de concentración pueden atribuirse al aumento de la erosión debido a lluvias periódicas de la época que arrastran el compuesto hacia el cuerpo de agua (Rodríguez et al., 2016). La presencia de fósforo también

puede derivar de procesos biológicos de organismos que utilizan el compuesto para cumplir con sus procesos metabólicas (Gu et al., 2020) que, al concluir su ciclo de vida y dar lugar al proceso de descomposición, se genera una liberación de fósforo nuevamente a la laguna, lo que eventualmente puede aumentar su concentración.

Con respecto a los compuestos nitrogenados, existen estudios sobre lagunas altoandinas en el sector de Maylas que han registrado concentraciones entre 0.02-0.4 mg/L en la temporada seca (Orellana & Sarango, 2024), un intervalo que comprende valores inferiores en contraste a las concentraciones observadas en los cuerpos de agua en estudio (0.39 – 1.83 mg/L). La presencia de concentraciones elevadas de nitritos se encontró en Dos Chorreras y Toreadora, lo que puede tener implicaciones vinculadas al alcance turístico de la laguna, estando expuesta a entradas del compuesto de origen antrópico, mientras que la baja carga de nitratos en Luspa y Estrellaschoa puede estar asociado a factores biológicos como un mayor consumo por parte del fitoplancton, lo cual suele retardar los procesos de nitrificación y aumento de materia orgánica (Esteves, 1998). Cabe destacar que las concentraciones para todos los cuerpos de estudio se encontraron por en el rango que asegura la calidad de aguas naturales dulces (límite máximo de 13 mg/L N-NO₃) según la normativa ambiental ecuatoriana (Ministerio del Ambiente, 2018).

Por otro lado, la fuerte asociación entre nitratos y el periodo seco puede atribuirse a múltiples factores; entre los cuales se menciona que su concentración en el agua suele ser variable a lo largo de los ciclos estacionales en lagos de alta montaña debido a épocas de mezcla completa y acumulación durante este periodo, así como por procesos de disolución de materiales rocosos y desintegración de material orgánico tanto vegetal como animal (Schindler et al., 1974). Spalding & Exner (1993) también sostienen que los nitritos se transforman rápidamente en nitratos, donde los nitratos tienen rápida movilidad en los cuerpos de agua; por lo tanto, se infiltran fácilmente en las aguas superficiales y subterráneas en el proceso de desnitrificación, lo cual explicaría la alta correlación entre los compuestos nitrogenados.

La concentración de nutrientes, la radiación solar y la precipitación también constituyen factores ambientales que representan mayor influencia en la variación temporal de la clorofila y fitoplancton. Según Defegu et al., (2014), la presencia de sulfatos estaría vinculada a la geomorfología de las zonas evaluadas, derivados por sus rocas y sedimentos naturales. Napale y Dos Chorreras constituyeron los sitios donde se exhibieron mayores concentraciones del compuesto, el cual representa una variable que tiene la capacidad de explicar la variación de la comunidad fitoplanctónica, dado que la deficiencia de este compuesto puede reducir la eficiencia fotosintética de las algas (Andrade & Larriva, 2015).

Las concentraciones de clorofila-a durante todo el muestreo fueron similares y no se convirtió en un indicador relevante de eutrofización, al igual que los resultados obtenidos por Orellana & Sarango (2014) en el trabajo limnológico que compara la variabilidad temporal en la laguna Maylas. Si bien no se presentó una marcada tendencia estacional en las concentraciones analizadas, los bajos valores de los pigmentos y fosfatos indicarían una baja productividad que se puede relacionar con lagunas oligotróficas según las categorías tróficas de la OCDE (*Anexo 9*), cuyas características suelen presentar altas concentración de oxígeno disuelto, pobres nutrientes y una productividad baja (Shen et al., 2013), de igual forma Wetzel (2001) clasificaría a las lagunas dentro de esta categoría considerando que los valores se encuentran dentro del rango 0.3-3 µg/l.

Por último, el análisis jerárquico entre los cuerpos lénticos formó agrupaciones para organizar en diferentes niveles de similitud a partir de dos grandes grupos. El primer gran cluster englobó a lagunas altoandinas que comparten características típicas de ecosistemas prístinos remotos y oligotróficos: el sistema lacustre que compone las lagunas de Chusalongo, Estrellascocha, Jigeno se encuentran próximas geográficamente y drenan hacia el Atlántico. El segundo cluster agrupó a las lagunas Toreadora, Dos Chorreras y Napale. A diferencia de las dos primeras lagunas mencionadas, Napale es el único cuerpo lacustre que no constituye un gran atractivo turístico; sin embargo, la fácil accesibilidad al sitio que ha influenciado la frecuencia de visitas cada vez más esporádicas a la laguna (*Anexo 4*) y las actividades ganaderas que se han registrado en la zona, representarían también un factor atópico que pueden agrupar estas lagunas, aunque no se considera una causa que influya eutrofización severa considerando las concentraciones bajas de clorofila (Van Colen, 2018). Las similitudes igualmente pueden atribuirse por elevadas concentraciones de nutrientes nitrogenados, fosfatos y sulfatos que se presentaron en estas lagunas en las dos estaciones monitoreadas, lo cual podría explicar una combinación de factores tanto naturales como antrópicos.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIÓN

Los cuerpos lacustres tienden a presentar leves fluctuaciones de forma natural en el pH, oxígeno disuelto y temperatura, ya sea por factores que involucran procesos biológicos, la hidrología, deposición atmosférica y/o geología, que otorgaría características particulares de ecosistemas propios de la región altoandina. En las lagunas estudiadas, los compuestos químicos y la clorofila no varían significativamente, debido a que las concentraciones presentaron valores bajos que se encuentran dentro de los rangos óptimos de calidad y, por lo tanto, indican un estado oligotrófico de las lagunas de estudio. La variabilidad de los parámetros fisicoquímicos no sólo depende de características geológicas u otras de naturaleza geográfica, sino que también de la estacionalidad, lo cual resultó un factor que influyó en la concentración de nutrientes, dado que el periodo seco que contempla los meses de junio a septiembre registró valores superiores a los de la época húmeda en gran parte de los compuestos aniónicos, a excepción de los cloruros y fosfatos, los cuales resultan del arrastre debido a las altas precipitaciones y meteorización de las rocas, o se atribuyen factores que relacionan la cercanía de los cuerpos de agua con la carretera, en el caso de los cloruros. De igual manera, la concentración de clorofila-a fue constante y similar durante todo el periodo de muestreo, exhibiendo valores bajos del pigmento que indicaría un estado óptimo de las lagunas.

En general, las lagunas del Macizo del Cajas se encontraron agrupadas debido a la similaridad en las características fisicoquímicas y la influencia humana que reside en la ubicación de cada una de las lagunas. Toreadora y Dos Chorreras estuvieron englobadas en un gran cluster, al igual que un cuerpo lacustre menos concurrido como Napale, el cual puede estar influenciado por su relación con la composición química, así como la presencia de ganado y la concurrencia cada vez más frecuente en la zona. En este sentido, es imperativo continuar con los monitoreos e implementando otras herramientas como los índices estandarizados de calidad de agua y eutrofización para obtener una caracterización a mayor detalle con respecto al estado actual y la proyección futura tanto de estas lagunas, como del resto de cuerpos lacustres del Macizo del Cajas.

Los resultados alcanzados por esta investigación, en relación a la calidad del agua y estado trófico de las lagunas del Macizo del Cajas constituyen una base para comprender su importancia ecológica y concienciar sobre la conservación de estos ecosistemas. La temporalidad y los análisis de similitud resultaron parámetros importantes para analizar la dinámica en las lagunas con relación a las variables fisicoquímicas y el estado del ecosistema. De forma que resulta fundamental continuar generando datos mediante monitoreos anuales que puedan recopilar

resultados de nuevas líneas de investigación para contribuir a la proyección temporal con respecto a la evolución de las lagunas del Macizo del Cajas.

LISTA DE REFERENCIAS

- Aguilera, X., Lazzaro, X., & Coronel, J.S. (2013). Tropical high-altitude Andean lakes located above the tree line attenuate UV-A radiation more strongly than typical temperate alpine lakes. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 12, 1649-1657. <https://doi.org/10.1039/c3pp25285j>
- Altundağ, H., Agar, S., Altintig, E., Ateş, A., & Sivrikaya, S. (2019). Use of ion chromatography method on the determination of some anions in the water collected from Sakarya, Turkey. *Journal of Chemical Metrology*. <https://doi.org/10.25135/jcm.26.19.03.1221>
- Andrade, D.L., & Larriva, P.A. (2015). Variación temporal de fitoplancton de seis lagunas altoandinas en relación a las características físico-químicas del medio. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27089.94566>
- Beiderwieden, E., Wrzesinsky, T., & Klemm, O. (2005). Chemical characterization of fog and rain water collected at the eastern Andes cordillera. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9, 185-191. <https://doi.org/10.5194/hess-9-185-2005>
- Becker, A., & Wilks, R. (2021). *maps*: Draw Geographical Maps.
- Bolaños-Alfaro, J.D., Cordero-Castro, G., & Segura-Araya, G. (2017). Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). <https://doi.org/10.18845/tm.v30i4>
- Bravo-Inclán, L., & Tomasini, C. (2017). Experiencias en la determinación de clorofila a y feopigmentos por espectrofotometría. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Díaz Pérez, M. (2018). Desarrollo y validación de un método analítico por cromatografía iónica para la caracterización de aguas y su aplicación en muestras de aguas industriales. Universidad de Cartagena.

- Degefu, F., Herzig, A., Jirsa, F., & Schagerl, M. (2014). First Limnological Records of Highly Threatened Tropical High-Mountain Crater Lakes in Ethiopia. *Tropical Conservation Science*, 7, 365 - 381. [10.1177/194008291400700302](https://doi.org/10.1177/194008291400700302)
- Doering, P.H., Chamberlain, R.H., & Haurert, K. (2006). Chlorophyll a and its use as an indicator of eutrophication in the Caloosahatchee Estuary. Florida.
- Esteves, F. (1998). Fundamentos de Limnología. Río de Janeiro, Brasil: Interciencia Limitada
- García-Ávila, F., Loja-Suco, P., Siguenza-Jeton, C., Jiménez-Ordóñez, M., Valdiviezo-Gonzales, L., Cabello-Torres, R.J., & Avilés-Añazco, A. (2023). Evaluation of the water quality of a high Andean lake using different quantitative approaches. *Ecological Indicators*, 154. 110924–110924. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110924>
- Lee, G.F., & Jones, R.A. (1981). Application of the OECD Eutrophication Modeling Approach to Estuaries. *Humana Press EBooks*. 549–568. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5826-1_28
- Miranda, F.G., & Rosales, V.M. (2018). EUTROFIZACIÓN, UNA AMENAZA PARA EL RECURSO HÍDRICO. In: IMPACTO SOCIO-AMBIENTAL, TERRITORIOS SOSTENIBLES Y DESARROLLO REGIONAL DESDE EL TURISMO. Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C, Coeditores, México. ISBN UNAM: 978-607-30-0971-3, ISBN AMECIDER: 978-607-8632-02-2.
- Gu, J., Zhang, W., Li, Y., Niu, L., Wang, L., & Zhang, H. (2020). Source identification of phosphorus in the river-lake interconnected system using microbial community fingerprints. *Environmental research*, 186, 109498. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109498>

- Hernández-Atilano, E., Baena, J.A., Ramírez, N.J., Restrepo, J.J., González, C., Duque, S.R., Riaño, N.J., & Mogollón, M. (2017). Rasgos morfológicos del fitoplancton en seis sistemas leníticos de las regiones Amazónica, Andina y Caribe de Colombia. *Actualidades Biológicas*, 34(96), 67-83.
- Li, X., Sha, J., & Wang, Z. (2017). Chlorophyll-A Prediction of Lakes with Different Water Quality Patterns in China Based on Hybrid Neural Networks. *Water*, 9, 524. <https://doi.org/10.3390/w9070524>
- Makowski, M., Giannoni, K., Rollenbeck, L., Lehnert, L. & Bendix, J. (2016). Atmospheric salt deposition in a tropical mountain rainforest at the eastern Andean slopes of south Ecuador – Pacific or Atlantic origin? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(15), 10241–10261. <https://doi.org/10.5194/acp-16-10241-2016>
- Ministerio del Ambiente. Agua y Transición Ecológica. (2018). Actualización del plan de manejo del Parque Nacional Cajas. INSIGMA Cía. Ltda. 156.
- Muntean, E., Mihaiescu, T., Muntean, N., & Mihaiescu, R. (2009). *ION CHROMATOGRAPHIC ASSESMENT OF SURFACE WATER QUALITY FROM LAKES*.
- Navarrete, E., Galindo, C. G., Prosperina, K., & Perimetral, V. (2003). Huellas de un “frío pasado” patrimonio geológico del Parque Nacional El Cajas. El patrimonio geomínero en el contexto de la ordenación territorial, 12, 181-197.
- OECD (Organization for Economic Cooperation and Development). (1982). Eutrophication of waters: monitoring, assessment and control. Organisation for Economic and Cooperative Development, Paris, France. <https://doi.org/10.1002/iroh.19840690206>
- Orellana, E., & Sarango, H. (2023). Comparación de la variabilidad temporal de los índices de calidad de agua y eutrofización en la laguna Maylas del cantón

Gualaceo. Universidad de Cuenca.

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/42482>

R Core Team (2023). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Rodríguez, S.C., Asmundis, C.L., & Martínez, G. (2016). Variaciones estacionales de las concentraciones de fosfatos y nitratos en distintas fuentes de aguas de pequeños productores hortícolas. *Agrotecnia*, 24, 30–30.

<https://doi.org/10.30972/agr.0241174>

Shen. Z., Niu. J., Wang. Y., & Zhao. X. (2013). *Distribution and Transformation of Nutrients and Eutrophication in Large-scale Lakes and Reservoirs*. Springer. 978-7-308-10490-6.

Schindler, D.W., Welch, H.E., Kalff, J., Brunskill, G.J., & Kriech, N. (1974). Physical and Chemical Limnology of Char Lake, Cornwallis Island (75° N Lat.). *Wsq: Women's Studies Quarterly*, 31, 585-607. <https://doi.org/10.1139/f74-092>

Spalding, R.F., & Exner, M.E. (1993). Occurrence of nitrate in groundwater-a review. *Journal of Environmental Quality*, 22, 392-402.

<https://doi.org/10.2134/jeq1993.00472425002200030002x>

Thermo Fisher (2013). Certificate of Analysis. Dionex™ Combined Seven Anion Standard I.

Van Colen, W., Mosquera, P.V., Hampel, H., & Muylaert, K. (2018). Link between cattle and the trophic status of tropical high mountain lakes in páramo grasslands in Ecuador. *Lakes & Reservoirs: Science, Policy and Management for Sustainable Use*. <https://doi.org/10.1111/lre.12237>

- Van Colen. W., Mosquera, P.V., Vanderstukken, M., Goiris, K., Carrasco, M., Decaestecker, E., Alonso, M.Á., León-Tamariz, F., & Muylaert, K. (2017). Limnology and trophic status of glacial lakes in the tropical Andes (Cajas National Park, Ecuador). *Freshwater Biology*, 62, 458-473.
<https://doi.org/10.1111/fwb.12878>
- Vintimilla, M. (2023). Limnology of Tropical Mountain Lakes: Analysis of the hydromorphological, physical and biogeochemical variability of the Cajas Massif lake district. *Tdx.cat*. <http://hdl.handle.net/10803/688197>
- Vollenweider, R. A, & J. Kerekes (1982). OECD 1982. Eutrophication of water. Monitoring, assessment and control. OECD Cooperative programme on monitorin waters (Eutrophication control). *Enviromental Directorate*, OEDC.
- Wetzel. R. G., & Likens. G. E. (1991). Limnological Analyses. In *Limnological Analyses*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4098-1>
- Wickham H (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. ISBN 978-3-319-24277-4.
- Wunderlin, D., Del Pilar, A., María Valeria, Pesce Silvia Fabiana, Hued & Andrea Cecilia. (2001). Pattern Recognition Techniques for the Evaluation of Spatial and Temporal Variations in Water Quality. A Case Study: *Water Research*, 35, 2881–2894. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(00\)00592-3](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(00)00592-3)

ANEXOS

Fase de Laboratorio

Procedimiento experimental de clorofila

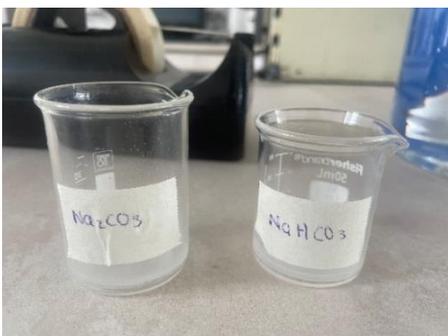


Anexo 1. Filtración de las muestras de agua

Análisis de aniones



Anexo 2. Generación de cromatogramas



Anexo 3. Elaboración del eluyente

Medición de pH, Temperatura y Oxígeno Disuelto



Anexo 4. Equipos especializados para pH, Temperatura y Oxígeno Disuelto

Lagunas muestreadas



Anexo 5. Laguna Napale
Fuente: Alfredo Vintimilla



Anexo 6. Laguna de Patos



Anexo 7. Laguna Estrellasocha



Anexo 8. Laguna Chusalongo

Tabla 4. Valores promedio de Clorofila a.b y c obtenido a partir del método tricromático

Lagunas	Estaciones	Clorofila-a	Clorofila-b	Clorofila-c
Chusalongo	Húmeda	0.094	0.068	0.026
	Seca	0.198	0.259	0.558
	Húmeda	0.262	0.146	0.181
	Seca	0.862	0.646	0.138
Dos Chorreras	Húmeda	0.148	0.005	0.013
	Seca	0.289	0.296	0.2
	Húmeda	0.112	0.43	0.195
	Seca	0.481	0.749	0.695
Estrellasocha	Húmeda	0.045	0.005	0.052
	Seca	0.214	0.238	0.155
	Húmeda	0.895	0.632	1.536

	Seca	0.828	0.423	0.147
	Húmeda	0.074	0.062	0.032
Jigeno	Seca	0.206	0.235	0.184
	Húmeda	0.739	0.361	0.122
	Seca	0.717	0.451	0.123
	Húmeda	0.004	0.027	0.071
Luspa	Seca	0.136	0.173	0.167
	Húmeda	0.389	0.986	0.145
	Seca	0.69	0.479	0.114
	Húmeda	0.105	0.069	0.035
Napale	Seca	0.307	0.271	0.261
	Húmeda	0.88	0.396	0.154
	Seca	0.218	0.108	0.171
	Húmeda	0.084	0.037	0.096
Patos	Seca	0.139	0.16	0.18
	Húmeda	0.579	0.65	0.887
	Seca	1.694	0.655	0.548
	Húmeda	0.016	0.043	0.083
Taita Chugo	Seca	0.137	0.151	0.175
	Húmeda	0.069	0.075	0.087
	Seca	0.266	0.249	0.37
	Húmeda	0.011	0.164	0.065
Toreadora	Seca	0.522	0.365	0.2
	Húmeda	0.668	0.413	1.129
	Seca	0.143	0.063	0.092

Tabla 5. Concentraciones de aniones en diferentes estaciones

Lagunas	Estaciones	Bromuros	Fluoruros	Cloruros	Nitritos	Nitratos	Fosfatos	Sulfatos
Chusalongo	Húmeda	0.221	0.049	0.419	0.096	0.193	0.114	0.250
	Seca	0.817	0.496	0.156	0.590	0.658	0.185	0.314
	Húmeda	0.075	0.479	0.215	0.107	0.193	0.124	0.375
	Seca	0.821	0.523	0.150	0.651	0.746	0.185	0.166
Dos Chorreras	Húmeda	0.107	0.119	0.232	0.087	0.144	0.138	1.292
	Seca	0.725	0.458	0.121	0.663	0.736	0.189	0.804
	Húmeda	0.553	0.117	0.116	0.087	0.099	0.118	0.236
	Seca	0.951	1.038	0.241	1.402	1.471	0.390	2.024
Estrellascocha	Húmeda	0.123	0.157	0.094	0.082	0.305	0.098	0.193
	Seca	0.705	0.249	0.551	0.668	0.751	0.186	0.195
	Húmeda	0.181	0.386	0.223	0.171	0.203	0.108	0.187
	Seca	0.814	0.486	0.031	0.648	0.752	0.185	0.506
Jigeno	Húmeda	0.227	0.096	0.393	0.300	0.162	0.117	0.504
	Seca	0.819	0.249	0.200	0.654	0.772	0.186	0.227
	Húmeda	0.107	0.528	0.016	0.168	0.146	0.118	0.103
	Seca	0.143	0.726	0.044	0.149	0.744	0.183	0.119
Luspa	Húmeda	0.122	0.076	0.194	0.067	0.232	0.108	0.999
	Seca	0.601	0.485	0.139	0.664	0.744	0.186	0.497
	Húmeda	0.080	0.055	0.526	0.069	0.195	0.111	0.275
	Seca	0.886	0.491	0.101	0.107	0.742	0.190	0.876
Napales	Húmeda	0.067	0.086	0.496	0.149	0.115	1.525	3.321
	Seca	0.853	0.543	0.180	0.672	0.776	0.184	1.359
	Húmeda	0.047	0.103	0.385	0.123	0.138	1.510	0.428
	Seca	0.833	0.524	0.178	0.674	0.771	0.185	1.292
Patos	Húmeda	0.099	0.195	0.127	0.109	0.193	0.114	0.230
	Seca	0.705	0.495	0.342	0.674	0.746	0.187	0.256
	Húmeda	0.067	0.190	0.294	0.112	0.195	0.108	0.199

Taitachugo	Seca	0.824	0.549	0.560	0.642	0.737	0.184	0.157
	Húmeda	0.375	0.180	0.240	0.151	0.139	0.089	1.232
	Seca	0.504	0.249	0.510	0.450	0.736	0.185	0.400
	Húmeda	0.452	0.498	0.180	0.127	0.143	0.114	0.201
Toreadora	Seca	0.509	0.294	0.596	0.439	0.742	0.184	0.351
	Húmeda	0.205	0.192	0.322	0.083	0.179	0.123	0.541
	Seca	0.622	0.394	0.248	0.712	0.744	0.188	0.744
	Húmeda	0.144	0.645	0.115	0.085	0.175	0.125	0.174
	Seca	0.899	0.346	0.678	0.143	0.742	0.188	0.265

Tabla 6. Categorías tróficas OCDE

Categoría Trófica	Transparencia (m)	Fósforo (µg/L)	Clorofila-a (µg/L)
Ultraoligotrófico	> 6	< 4	<1
Oligotrófico	6 - 3	4 - 10	1 - 2.5
Mesotrófico	3 - 1.5	10 - 35	2.5 - 7.9
Eutrófico	1.5 - 0.7	35 - 100	8 - 25
Hipertrófico	< 0.7	> 100	>25

Fuente: (OCDE, 1982).