



Facultad de Ciencia y Tecnología

Escuela de Biología

*CARACTERIZACIÓN BIO-ÓPTICA DE LAGUNAS DEL MACIZO DEL CAJAS MEDIANTE
LA DETERMINACIÓN DE NIVELES DE CLOROFILA E ÍNDICE DE VEGETACIÓN
NORMALIZADO (NDVI).*

Trabajo previo a la obtención del grado académico de:

Biólogo

Autora:

María Paz León Jara

Director:

Blgo. Edwin Zárate Hugo MsC.

Cuenca – Ecuador

2024

DEDICATORIA

Para Cleo, que fue, es y será un ser muy especial e importante para mí, la que me ha acompañado desde que comencé esta travesía llamada Universidad, la que permaneció a mi lado todas esas noches en vela, y por aguardar por mí todos esos días que no estuve con ella por las salidas de campo.

Para mi madre, el pilar principal de mi vida, la persona que ha creído en mí aun cuando yo no lo hacía. La persona que me sacó adelante en momentos difíciles de mi vida. Es la persona que me ha enseñado a ser fuerte pese a lo mal que la vida nos trate, a no rendirme nunca pese a la mala racha. Una mujer que siempre me escucha a pesar de no entender de lo que le hablo la mayor parte del tiempo, la que me presta atención aun cuando son cosas que le dan miedo o no le gustan.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia que creyó en mi y me apoyó desde un inicio para seguir mi pasión. Los que me guiaron por el camino correcto para llegar a ser lo que soy y donde estoy ahora.

A mi director de tesis Edwin Zárate por darme la oportunidad de poder trabajar en este proyecto, por la paciencia y el apoyo de todo este tiempo de la carrera. De igual manera a las personas que me apoyaron y brindaron su ayuda a lo largo de este camino.

A todos mis compañeros de clase que se convirtieron en amigos a lo largo de estos años. A Daniela, una gran persona que se convirtió en mi cómplice de locuras, la que me ha acompañado de cerca todos estos años a pesar de todo, me ha apoyado y siempre ha estado para mí, estoy muy agradecida de que hayamos coincidido en esta tan linda etapa de la vida.

A mis maestros que me enseñaron a lo largo de estos años, que aportaron no solo conocimientos para mi formación como profesional, sino también de vivencias que me hicieron crecer como persona.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	4
1.1.1. Objetivo general	4
1.1.2. Objetivos específicos	4
METODOLOGÍA	5
2.1. Área de estudio	5
2.2. Fase de campo.	6
2.3. Trabajo en laboratorio.	6
2.3.1. Medición de niveles de Clorofila.	6
2.3.2. NDVI de las lagunas.	7
2.4. Análisis de datos	7
2.4.1. Relación niveles de Chl-a con variables derivadas de información satelital.	7
2.4.2. Análisis de índices NDVI.	8
2.4.3. Análisis coeficiente de correlación de Pearson.	9
RESULTADOS	10
3.1. Concentraciones de Clorofila en los cuerpos de agua.	10
3.2. Valores NDVI de las diferentes lagunas.	12
3.3. Correlación entre Clorofila a (Chl-a) e índice NDVI.	13
DISCUSIÓN	15
4.1. Concentraciones de Clorofila en los cuerpos de agua.	15

4.2. Valores NDVI de las diferentes lagunas.	16
4.3. Correlación entre Clorofila a (Chl-a) e índice NDVI.	16
CONCLUSION	18
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	19
ANEXOS	25

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1: Método monocromático para obtención de valores de Clorofila.</i>	8
<i>Ecuación 2: Método tricromático para obtención de valores de Clorofila.</i>	8
<i>Ecuación 3: Método de obtención valores NDVI.</i>	9

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Elevación (m.s.n.m) de las lagunas de estudio.</i>	6
<i>Tabla 2: Valores máximos, mínimos y media de índice NDVI de lagunas.</i>	13
<i>Tabla 3: Correlación Media del NDVI vs Clorofila A de Lagunas.</i>	14

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Mapa con la ubicación geográfica de las lagunas de estudio. .</i>	5
<i>Figura 2: Boxplot con los niveles de Chl-a en las lagunas de estudio.</i>	10
<i>Figura 3: Boxplot con niveles de Chl-b en las lagunas de estudio.</i>	11
<i>Figura 4: Boxplot con los niveles de Chl-c en las lagunas de estudio.</i>	11
<i>Figura 5: Boxplot con valores la media del NDVI de las lagunas de estudio.</i>	12

ÍNDICE DE ANEXOS

<i>Imagen 1 : Laguna de estudio “Napales”.</i>	25
<i>Imagen 2 : Laguna de estudio “Jigeno”.</i>	25
<i>Imagen 3 : Laguna de estudio “Patos”.</i>	26
<i>Imagen 4 : Laguna de estudio “Estrellascocha”.</i>	26
<i>Imagen 5 : Medición de parámetros físicos, pH, conductividad, oxígeno disuelto, temperatura.</i>	26
<i>Imagen 6 : Extracción de clorofila de muestras recolectadas.</i>	27
<i>Imagen 7 : Muestras descongeladas para su análisis en laboratorio.</i>	27
<i>Imagen 8 : Tubos con clorofila en filtros de microfibra de vidrio de 47 mm de diámetro (GF/F Whatman).</i>	27

RESUMEN

Los índices de vegetación normalizados (NDVI) derivados de tecnologías satelitales han demostrado ser eficientes para el monitoreo de ecosistemas, es por ello que a través de este trabajo realizamos la caracterización bio óptica de lagunas como indicador del nivel de clorofila contenido en lagunas altonadinas. Se estableció una correlación, utilizando la correlación de Pearson, entre el NDVI y los niveles de clorofila medidos al recolectar muestras de agua en las lagunas. Los datos obtenidos mostraron correlación al trabajar con la media NDVI y Chl-a. En determinadas lagunas fue fuertemente positivo, como en Estrellascocha, Dos Chorreras y Napales, lo que sugiere que efectivamente existe un vínculo entre la clorofila de una masa de agua y el índice NDVI. Sin embargo, también se obtuvieron datos de correlación negativa en las lagunas Jigeno, Patos y Toreadora, lo que podría deberse a la presencia de factores externos que influyeron en las características ópticas y físicas de las lagunas.

Palabras clave: Clorofila, NDVI, Pearson, Macizo del Cajas, lagunas altoandinas, Parque Nacional El Cajas

ABSTRACT

Normalized vegetation indices (NDVI) derived from satellite technologies have proven to be efficient for monitoring ecosystems, which is why through this work we carry out the biooptical characterization of lagoons as an indicator of the level of chlorophyll contained in highland lagoons. A correlation was established, using Pearson's correlation, between NDVI and chlorophyll levels measured by collecting water samples in the lagoons. The data obtained showed correlation when working with the mean NDVI and Chl-a. In certain lagoons it was strongly positive, such as in Estrellasocha, Dos Chorreras and Napales, which suggests that there is indeed a link between the chlorophyll of a water mass and the NDVI index. However, negative correlation data were also obtained in the Jigeno, Patos and Toreadora lagoons, which could be due to the presence of external factors that influenced the optical and physical characteristics of the lagoons.

Keywords: Chlorophyll, NDVI, Pearson, Macizo del Cajas, high Andean lagoons, El Cajas National Park.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso fundamental para el desarrollo de la vida en el planeta, no obstante, por condiciones tanto naturales como antrópicas hoy en día se producen pérdidas de calidad de dicho recurso. Los páramos altoandinos son considerados uno de los principales productores de agua para nuestro país, aun así están seriamente amenazados por actividades humanas y cambio climático, como Tenesaca (2022) nos explica. Dentro de estos los cuerpos de agua dulce, como lagos y lagunas, existe gran variedad de formas de vida, siendo fuentes importantes del recurso y base para diversos ecosistemas (Kasavan et al., 2021).

Como Torres (2015) describe, el Macizo del Cajas (MC) figura dentro de la red mundial de reservas de biosfera, tiene una extensión total de 976600.92 hectáreas en la estribación occidental de los Andes del Ecuador, expandiéndose desde el valle interandino hasta el Océano Pacífico. Dentro del MC se encuentran alrededor de 600 cuerpos de agua, de los cuales más del 50% están dentro del Parque Nacional Cajas. Dichos cuerpos forman parte fundamental del sistema hídrico para Cuenca y sus alrededores. A su vez, es de suma importancia debido a que son las nacientes de los principales afluentes que alimentan el complejo hidroeléctrico Paute, el cual provee de hasta un 40% de electricidad al Ecuador (Caldas, 2020).

Los cuerpos de agua están sujetos al proceso de eutrofización debido al aumento de nutrientes en el agua, este puede ser originado principalmente por actividades antropogénicas. Por este motivo aumenta la proliferación de algas y plantas acuáticas (Kasavan et al., 2021). Este proceso puede provocar cambios significativos en la calidad del agua y en la biodiversidad de los ecosistemas, de la misma manera desencadenaría problemas para con la salud de las poblaciones que consumen dicho recurso (Alexander et al., 2017). Siendo así, la eutrofización de los cuerpos de agua podría definirse como la suma de distintos factores, principalmente de un excesivo enriquecimiento de nutrientes, generando un crecimiento anormal de fitoplancton lo que originaría un desequilibrio primario y secundario de productividad (Yang et al. 2008).

A su vez, de acuerdo con Mineeva (2022), 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 vegetación de cianoprocariotas (algas verde azuladas) y otros productores primarios en cuerpos de agua.

De igual manera, es importante mencionar que las diferentes condiciones que generan eutrofización actúan de una manera particular en cada cuerpo de agua, tanto en ecosistemas de agua dulce como en ambientes marinos. Depende de las interacciones entre temperatura, luz y concentración de varios nutrientes. Los métodos de estudio y monitoreo de ecosistemas acuáticos siempre han considerado los muestreos in-situ en donde se toma muestras de agua para análisis fisicoquímicos y parámetros bióticos. Sin embargo, por limitaciones de escala y esfuerzo que suponen este tipo de estudios, nuevas técnicas de monitoreo se están desarrollando, una de ellas es la teledetección. Este método se empezó a utilizar principalmente como una herramienta para determinar la concentración de pigmentos fitoplanctónicos y sólidos suspendidos desde hace más de cuarenta años, focalizada en océanos, estuarios y grandes lagos (Gitelson et al. 1986; Gons 1999; Gordon et al. 1980, 1985; Nechad et al. 2010; Strong 1974; Vincent et al. 2004).

En la actualidad, distintos programas satelitales se han ido actualizando, aumentando la resolución tanto espectral como espacial, desarrollando a la par nuevos avances que permitieron expandir su uso hacia cuerpos de agua de menor tamaño (Ansper 2018; Hansen et al. 2015; Toming et al. 2016). Los parámetros que más se utilizan para la evaluación de cuerpos lénticos mediante dicha herramienta son la Clorofila a (Chl-a), los Sólidos Totales en Suspensión (*STS*) y el Carbono Orgánico Disuelto (*COD*) (Giardino et al. 2019). La determinación de la Chl-a, expresada como pigmentos fotosintéticos es fundamental para la evaluación de su condición trófica, así mismo es un bioindicador importante pues permiten expresar la variabilidad de un cuerpo de agua con respecto a florecimientos algales. Sin embargo, la Clorofila b y c, al ser pigmentos presentes en microorganismos y algas, absorben luz en diferentes longitudes de onda, lo que también influye en un ecosistema acuático, (Doddavarapu et al., 2021), por lo que el estudio mediante estos pigmentos se ha convertido en una herramienta importante para la evaluación del estado trófico de los cuerpos de agua.

En este sentido, el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es utilizado ampliamente como un indicador del vigor de la biomasa vegetal (Aguilar, 2015), este mide el verdor y la densidad de la vegetación captada en una imagen de satélite. Este procedimiento fue desarrollado por Rouse et al. (1973) para caracterizar cubierta vegetal de la superficie terrestre y difundido en un principio por Tucker et al. (1979), los valores están en función de la energía absorbida o reflejada por plantas en diversas partes del espectro electromagnético, y los resultados espectrales muestran un contraste entre el espectro del visible, (Garcia, 2015). En sí, el NDVI resalta la reflectancia y absorción de la clorofila, por lo que es adecuado para

establecer el estado o los niveles de producción primaria neta de los ecosistemas. La vegetación sana tiene una curva de reflectancia espectral que permite calcular la diferencia entre dos bandas: la del rojo visible y la del infrarrojo cercano. Este índice se expresa numéricamente entre -1 y 1, es utilizado para describir características y el estado de la vegetación (Pettorelli et al. 2013), gracias a su fórmula que normaliza la diferencia entre el rojo (670 nm) y el infrarrojo cercano (860 nm), que representa la actividad fotosintética, asociada con la productividad primaria neta y la biodiversidad vegetal.

La Chl-a absorbe radiación electromagnética en las regiones del azul (~490 nm) y rojo (~665 nm), refleja la región del verde (~560 nm) (Morel y Prieur 1977). A partir de esta proporción se han desarrollado numerosos índices de recuperación de la Chl-a (Gordon et al. 2012; O'Reilly et al. 1998). En agrupaciones de aguas continentales la reflectancia no decae hacia el infrarrojo cercano, sino que se estabiliza formando así una meseta. Aquí destacan las pendientes máximas registradas entre el rojo y el infrarrojo cercano, que corresponden a agrupaciones con altos contenidos de Chl-a (Spyrakos et al. 2017).

Gracias a que el NDVI brinda información sobre el estado de la vegetación y su nivel de verdor, por medio de la reflectancia y la absorción de la clorofila, actualmente se está utilizando para monitoreo de características tróficas de ecosistemas terrestres, marinos y de agua dulce (Tucker, C, 1979; Nagendra et al. 2013; Silva, F., et al. 2013). Además, sus propiedades permiten realizar un seguimiento de los efectos provocados por distintas actividades siendo estas antrópicas y, de la misma manera, el cambio climático sobre ecosistemas naturales (Pettorelli et al. 2012; Lim, J., et al. 2015; Gillespie et al. 2018). Estos índices no están condicionados por cambios en el estado fisiológico de las coberturas vegetales, por lo que sus variaciones pueden ser utilizadas para estudios espacio-temporales del comportamiento de la vegetación (Gonzaga, 2015).

A todo esto, la investigación y generación de indicadores para poder monitorear la calidad, tanto de los ecosistemas terrestres como de los ecosistemas acuáticos es fundamental para el futuro de nuestra sociedad. Es por ello que la investigación científica actualizada debe comenzar a considerar nuevos enfoques. Por lo que, para la presente investigación se ha planteado la determinación del comportamiento de los diferentes cuerpos de agua desde el punto de vista bio-óptico con respecto a los niveles de clorofila a (Chl-a) contenida en las lagunas del Macizo del Cajas.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

Caracterizar diferentes lagunas del Macizo Del Cajas mediante medición de niveles de clorofila de muestras de agua y valores del NDVI de estas, y así establecer la correlación entre estas variables.

1.1.2. Objetivos específicos

Recolectar muestra de agua en la zona limnética de distintas lagunas óptimas para el análisis dentro del laboratorio.

Realizar análisis de clorofila mediante los métodos monocromático y tricromático.

Obtener imágenes satelitales y el índice NDVI.

Establecer la correlación de los datos de clorofila con los datos del índice NDVI derivados de imágenes de satélite

2. METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a la reserva de biosfera del Macizo del Cajas (MC) que está localizada en el sur del Ecuador, en la cordillera de los Andes, colindante con el valle interandino y el Océano Pacífico, (ETAPA EP, 2018). Según el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, cuenta con una extensión de 976600.92 ha. El territorio continental propuesto como Reserva de Biosfera pertenece a las provincias: Azuay, contando con 521.376.84 ha; Cañar, con 137059.22 ha; El Oro con 78927.58 ha; y al Guayas con 154797.88 ha. A su vez, acoge varios ecosistemas que van desde marinos a los de alta montaña, (MAAE, 2012). En este estudio nos centraremos en distintas lagunas ubicadas en la zona de páramo, sobre los 3500 msnm como lo detalla la *Tabla 1*, ubicadas dentro del Parque Nacional El Cajas. Para el presente estudio se consideraron tanto la ubicación, como el tamaño y la accesibilidad de los cuerpos de agua, siendo así Chusalongo, Dos Chorreras, Estrellascocha, Jigeno, Luspa, Napales, Patos, Taitachugo y Toreadora las nueve lagunas seleccionadas para el desarrollo de este proyecto, con diferentes características tanto en su forma física como su ubicación, como se muestra en la *Figura 1*.

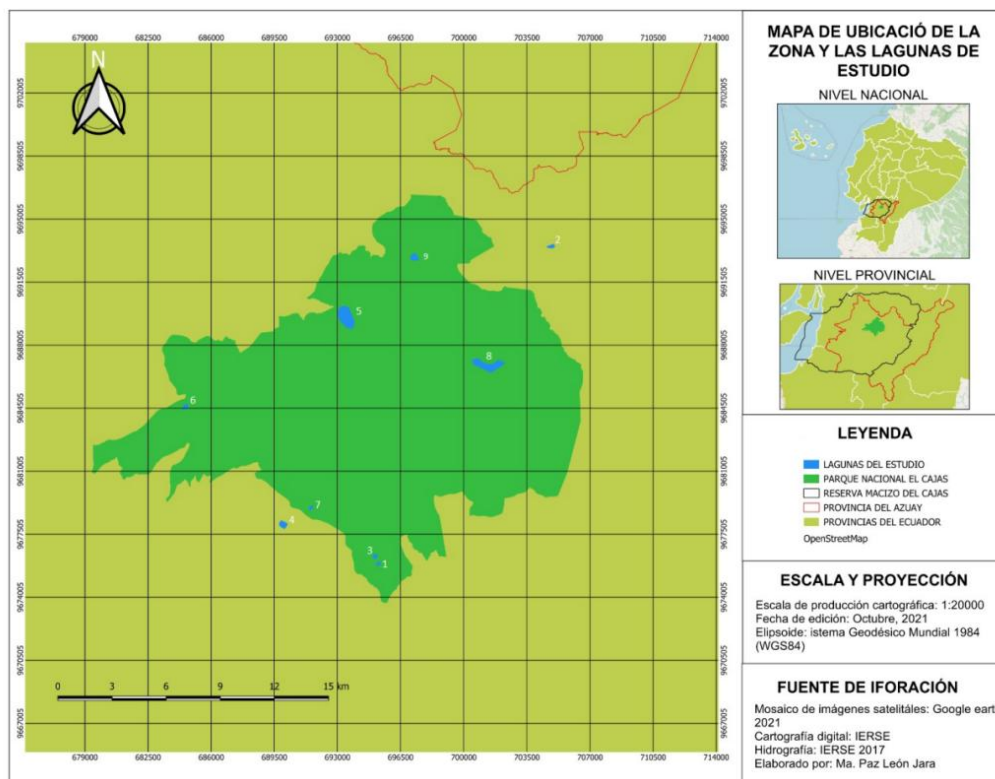


Figura 1: Mapa con la ubicación geográfica de las lagunas de estudio.

Fuente: Autor.

Tabla 1: Elevación (m.s.n.m) de las lagunas de estudio.

	Laguna	Elevación	Latitud	Longitud
1	Chusalongo	3986 msnm	-2,9263075	-79,2468081
2	Dos Chorreras	3913 msnm	-2,7702178	-79,1591209
3	Estrellascocha	3813 msnm	-2,9208603	-79,2530086
4	Jigeno	3967 msnm	-2,9105568	-79,2909876
5	Luspa	3772 msnm	-2,8022964	-79,2489187
6	Napales	3890 msnm	-2,8861040	-79,2929448
7	Patos	3966 msnm	-2,9045620	-79,2859909
8	Taitachugo	3548 msnm	-2,8315294	-79,1872557
9	Toreadora	3917 msnm	-2,7802949	-79,2239889

2.2. Fase de campo.

Los muestreos se realizaron en dos campañas, correspondientes a las épocas seca y húmeda, comprendidas entre los meses de junio a octubre y de noviembre a febrero entre los años 2023 y 2024. Las diferentes muestras de agua fueron tomadas en un total de nueve lagunas. Estas están distribuidas en la zonas este y oeste del Macizo del Cajas. Para el análisis de Chl-a, en cada salida de muestreo se tomaron dos submuestra de agua de la zona litoral (una en la orilla izquierda o derecha y la segunda muestra cerca a la desembocadura). Una vez recolectadas las muestras, fueron protegidas de la luz para evitar alteraciones y fueron trasladadas al laboratorio de Análisis Químico de la Universidad del Azuay.

2.3. Trabajo en laboratorio.

2.3.1. Medición de niveles de Clorofila.

Para la extracción del pigmento las muestras de agua tomadas en las lagunas fueron filtradas usando filtros de microfibras de vidrio de 47 mm de diámetro (GF/F Whatman). Los filtros con el concentrado fueron colocados en tubos de centrifuga (Falcon) y forrados con

papel aluminio para la lectura posterior. Luego, se colocó acetona al 90% y fueron conservadas a 4°C por 24 horas.

Transcurrido el tiempo, las muestras fueron centrifugadas a 5000 rpm durante diez minutos (Digisystem DSC-200T). Después se tomaron 3 ml del extracto de clorofila y se colocó en una cubeta de cuarzo de paso óptico, para ser medida la densidad óptica de la muestra en el espectrofotómetro UV visible (Thermo Scientific Evolution 60), obteniendo así la lectura de clorofila. Para finalizar la primera lectura, en la misma muestra leída se colocó 0.1 ml HCL por cada ml de muestras colocada en la cubeta de lectura, dejándolas reposar cinco minutos para posteriormente realizar una segunda lectura de la muestra (Skoog, 2008). Para el cálculo de los niveles de clorofila se aplicó los métodos recomendados por Wetzel & Likens (1991).

2.3.2. NDVI de las lagunas.

Para la elaboración de los NDVI se obtuvieron imágenes multiespectrales Landsat 8TM de 30m de resolución espacial de fechas cercanas a los periodos de muestreo de campo, tomadas de la página Earth Explorer-USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Estas imágenes vienen con correcciones atmosféricas, no obstante, fue necesario realizar una corrección topográfica para compensar los efectos de pendiente y aspecto en la reflectancia, debido a que tienen una gran influencia en la precisión de la clasificación de la vegetación. Posteriormente se realizó el NDVI que se deriva del contraste del canal rojo (VIS, 0.66 μm) y del canal infrarrojo cercano (NIR, 0.86 μm), (Tucker & Sellers, 1986).

2.4. Análisis de datos

Se utilizó estadística descriptiva y gráfica para caracterizar las lagunas. A su vez, se aplicó técnicas de correlación para establecer las relaciones entre los valores de clorofila medidos in-situ con los valores de los índices de vegetación.

2.4.1. Relación niveles de Chl-a con variables derivadas de información satelital.

Por medio de un análisis multivariado se estableció la correlación entre la Chl-a con índices NDVI, lo que permitió explicar la variabilidad en las lagunas a ser analizadas (Ledesma, et al. 2013; Barros, A., et al. 2010).

La Chl-a se midió a través de espectrofotometría UV visible, mediante el método monocromático y tricromático sugerido por Wetzel y Likens (2001).

- Método monocromático

$$Chla (\mu\text{g/l o mg/m}^3) = \frac{(k)(F)(E6650 - E665a)(v)}{(V)(Z)}$$

$$Phaeopigments (\mu\text{g/l o mg/m}^3) = \frac{(k)(F)[R(E6650 - E665a)](v)}{(V)(Z)}$$

Ecuación 1: Método monocromático para obtención de valores de Clorofila.

- Método tricromático

$$Chla (\mu\text{g/l o mg/m}^3) = \frac{(Ca)(v)}{(V)(Z)}$$

$$Chla (\mu\text{g/l o mg/m}^3) = \frac{[11,85(A664 - A750) - 1,54(A647 - A750) - 0,08(A630 - A750) xv]}{(V)}$$

$$Chla (\mu\text{g/l o mg/m}^3) = \frac{(Cb)(v)}{(V)(Z)}$$

$$Chla (\mu\text{g/l o mg/m}^3) = \frac{[21,3(A664 - A750) - 5,43(A647 - A750) - 2,66(A630 - A750) xv]}{(V)}$$

$$Chla (\mu\text{g/l o mg/m}^3) = \frac{(Cc)(v)}{(V)(Z)}$$

$$Chla (\mu\text{g/l o mg/m}^3) = \frac{[24,52(A664 - A750) - 1,67(A647 - A750) - 7,60(A630 - A750) xv]}{(V)}$$

$$Car (\mu\text{SPU/l o mSPU/m}^3) = \frac{[(10,0)(E480o)](v)}{(V)(Z)}$$

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

Ecuación 2: Método tricromático para obtención de valores de Clorofila.

Donde A_{480} , A_{630} , A_{647} , A_{663} , A_{664} , A_{665} , A_{750} representan densidades ópticas registradas en las longitudes establecidas; v al volumen en ml del extracto; V el volumen del agua filtrada en litros.

2.4.2. Análisis de índices NDVI.

Para el análisis de los valores NDVI, se determinó la media, mediana, moda, desviación estándar y coeficiente de variación, (Alonso, D. 2023) para así obtener un valor

específico y establecer una correlación con los valores de clorofila medidos en las muestras de agua tomadas in-situ.

Los valores están en función de la energía reflejada o absorbida en diversas partes del espectro electromagnético. En cuanto a la respuesta espectral tiene que ver con el hecho que la vegetación sana muestra un claro contraste entre el espectro visible, especialmente la *banda roja* y el *infrarrojo cercano* (Garcia, 2015).

El NDVI, se calcula mediante una fórmula que usa las dos bandas mencionadas. NIR corresponde a la reflectancia del canal *infrarrojo cercano* de la banda 4, y RED representa la reflectancia en el canal *rojo visible* de la banda 3, en este caso corresponden al sensor Landsat TM. Esto indica una relación inversa entre el valor de reflectancia, por ello es posible su uso para excluir cubiertas vegetales. Este índice varía entre -1 y +1, valores altos revelan alta actividad fotosintética de la cubierta vegetal (Tucker & Sellers, 1986) valores bajos indican situaciones de escasa o nula cubierta vegetal y baja actividad fotosintética. El índice normalizado se define como:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}}$$

Ecuación 3: Método de obtención valores NDVI.

La banda 3 (0.63 a 0.69 micrones - rojo) representa la absorción de clorofila, muy útil para la clasificación de la cubierta vegetal. Y, la banda 4 (0.76 a 0.90 micrones – infrarrojo cercano), los valores con la aplicación de la formula nos sirven para determinar el contenido de biomasa, además para la delimitación de cuerpos de agua, como explicó Tucker & Sellers (1986).

2.4.3. Análisis coeficiente de correlación de Pearson.

El coeficiente de correlación de Pearson mide el grado de relación lineal que tienen dos conjuntos de datos, (Ramírez, G., 2021). Es por ello que para poder utilizar el análisis de coeficiente de correlación se realizó un ajuste lineal, y así ser capaces de determinar una posible relación entre las dos variables, que en este caso serán los valores de la Chl-a con el índice NDVI. Éstas están representadas por una escala que va; de -1, o correlación fuerte negativa; hasta 1 en donde existe una correlación fuerte positiva. Para este análisis se utilizó el programa RStudio, de la misma manera se utilizó el programa para generar los gráficos con los resultados obtenidos.

3. RESULTADOS

3.1. Concentraciones de Clorofila en los cuerpos de agua.

Los valores de Chl-a presentados en la *Figura 2* demuestran variaciones entre las diferentes lagunas como también dentro de las mismas entre los muestreos realizados en periodos diferentes. Entre lagunas oscila entre $0.004\mu\text{g/l}$ y $0.895\mu\text{g/l}$. Estrellascocha posee una mayor variabilidad interna en la concentración de Chl-a, lo que sugiere tiene disponibilidad constante de nutrientes facilitando mayor actividad fotosintética; mientras que Taitachugo, aun que presenta menor variabilidad de valores, posee menor concentración de Chl-a, siendo el valor más bajo con $0.016\mu\text{g/l}$. Como se sabe, la mediana es un indicador de tendencia central, entonces, Estrellascocha posee la mediana más alta siendo esta $0.520\mu\text{g/l}$, lo que refleja una concentración consistente a lo largo del tiempo; a este valor le sigue Jigeno con $0.461\mu\text{g/l}$ y Toreadora con $0.332\mu\text{g/l}$.

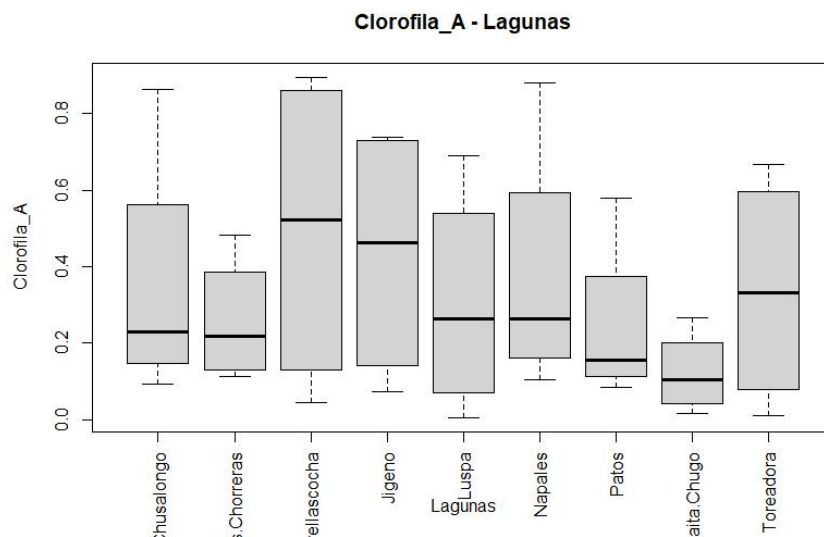


Figura 2: Boxplot con los niveles de Chl-a en las lagunas de estudio. En el eje X constan las diferentes lagunas, y el eje Y corresponde a los valores de clorofila.

En relación a la Chl-b, en la *Figura 3* podemos visualizar la distribución de los valores. Luspa presenta el valor máximo entre las demás lagunas siendo $0.985\mu\text{g/l}$, además es el cuerpo de agua que presenta mayor variabilidad. Patos fue la laguna con la mediana más elevada en comparación a las demás siendo $0.405\mu\text{g/l}$, lo que demuestra una concentración consistente de Chl-b en el tiempo que duró el estudio.

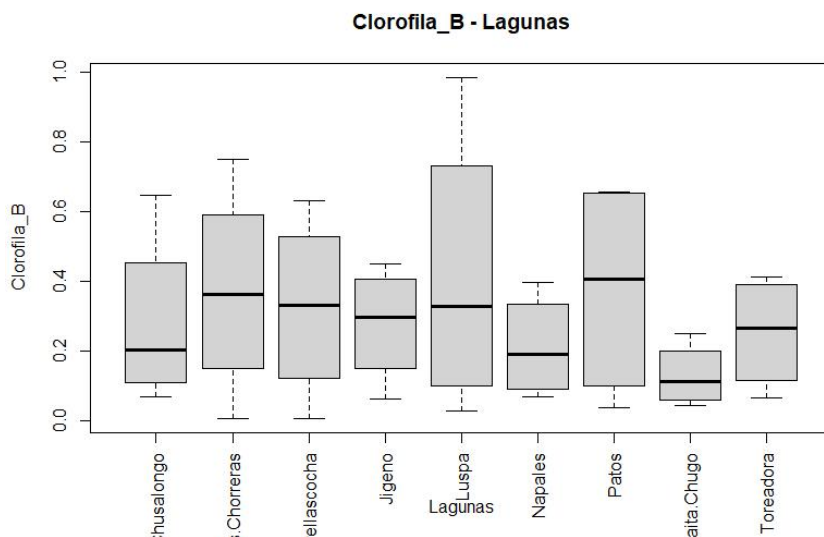


Figura 3: Boxplot con niveles de Chl-b en las lagunas de estudio. En el eje X constan las diferentes lagunas, y el eje Y corresponde a los valores de clorofila ($\mu\text{g/l}$).

Finalmente, de acuerdo a los resultados de la Chl-c, presentados en la Figura 4, Patos muestra el valor máximo de concentración de Chl-c siendo $0.887\mu\text{g/l}$; Estrellacocho posee el valor mas bajo de $0.154\mu\text{g/l}$, siendo la laguna con menor concentración; por otra parte, la mediana más alta fue de $0.364\mu\text{g/l}$ que pertenece a Patos, que también presentó una alta variabilidad de los valores de Chl-c.

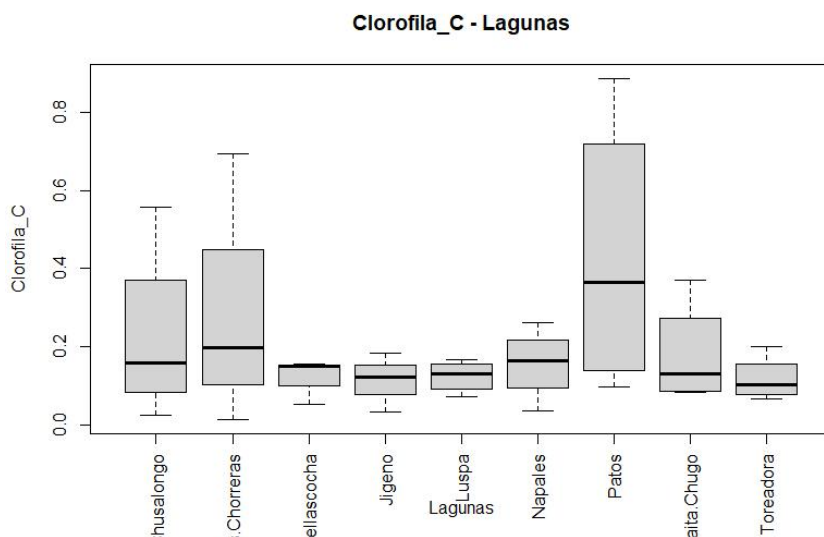


Figura 4: Boxplot con los niveles de Chl-c en las lagunas de estudio. En el eje X constan las diferentes lagunas, y el eje Y corresponde a los valores de clorofila.

3.2. Valores NDVI de las diferentes lagunas.

Se generaron varios valores de NDVI, correspondientes a la media, mediana, moda, desviación estándar y coeficiente de variación. Sin embargo, el análisis de datos se realizó en base a la media (M) debido a que este valor presentó mayor correlación con los valores de clorofila.

Los valores NDVI obtenidos fueron bajos, variando desde -0.059 (Chusalongo) hasta 0.108 (Patos), como se demuestra en la Figura 5. Sin embargo, como se observa en la tabla 2, la media más alta fue de la Laguna Patos, con un valor de 0.059 lo que podría indicar un alto nivel de pigmentación; por otro lado tenemos a Luspa que presenta la media más baja siendo 0.014 lo cual podría significar poca presencia de algas.

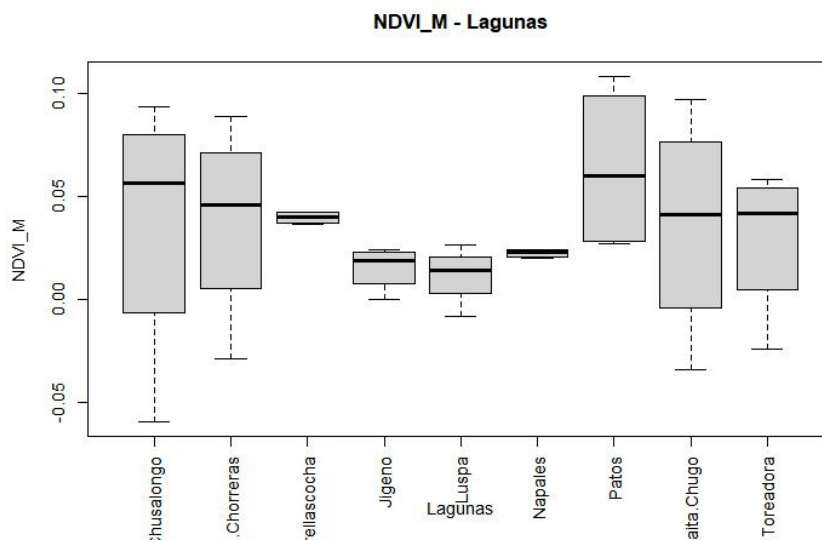


Figura 5: Boxplot con valores la media del NDVI de las lagunas de estudio. En el eje X constan las diferentes lagunas, eje Y corresponde a valores de la mediana de NDVI.

Tabla 2: Valores máximos, mínimos y media de índice NDVI de lagunas.

Lagunas	Máximo	Mínimo	Media
Chusalongo	0.09381058	-0.05995204	0.056601375
Dos Chorreras	0.0889034	-0.02887384	0.045907325
Estrellascocha	0.04260421	0.03622697	0.03972089
Jigeno	0.02412844	-0.000355709	0.01847849
Luspa	0.02649441	-0.008645482	0.01429584
Napales	0.02410306	0.01998233	0.0226429
Patos	0.1085719	0.02711684	0.05988538
Taitachugo	0.09700022	-0.03437218	0.0412608
Toreadora	0.05815252	-0.02406854	0.04165426

3.3. Correlación entre Clorofila a (Chl-a) e índice NDVI.

Mediante una prueba de correlación entre el índice del NDVI con respecto a la Chl-a de las nueve lagunas estudiadas se obtuvieron los valores respectivos de cada cuerpo de agua. Como se puede observar en la *Tabla 3*, existe una alta relación entre ambos valores, las lagunas Estrellascocha, Dos Chorreras y Napales poseen una correlación alta positiva con valores de 0.997, 0.868 y 0.672 respectivamente. Por otro lado las lagunas con valores medios son Taitachugo, Luspa y Chusalongo, con valores correspondientes de 0.481, 0.211 y 0.113. Finalmente tenemos las lagunas de Jigeno, Patos y Toreadora que presentaron una correlación negativa como se muestra en la *Tabla 3* siendo estos valores -0.445, -0.476 y -0.592, a su vez la laguna Toreadora tiene el índice negativo más alto.

Tabla 3: Correlación Media del NDVI vs Clorofila A de Lagunas.

Laguna	Correlación
Chusalongo	0.1135668
Dos Chorreras	0.8685129
Estrellascocha	0.9978421
Jigeno	-0.4450272
Luspa	0.2112229
Napales	0.672378
Patos	-0.4769822
Taitachugo	0.4817636
Toreadora	-0.5925044

4. DISCUSIÓN

4.1. Concentraciones de Clorofila en los cuerpos de agua.

Las lagunas del estudio presentaron diferentes niveles de concentración de Clorofila (Chl-a, Chl-b, Chl-c) sin ser mayores a $1\mu\text{g/l}$. En primera instancia, los valores correspondientes a Chl-a varía de $0.004\mu\text{g/l}$ a $0.895\mu\text{g/l}$; para la Chl-b de $0.004\mu\text{g/l}$ a $0.985\mu\text{g/l}$; finalmente para Chl-c de $0.013\mu\text{g/l}$ a $0.887\mu\text{g/l}$; como se detalla en la *Figura 2*. Es evidente que entre lagunas existe variabilidad de los valores de clorofila, en algunas predomina la presencia de Chl-a, en otras puede prevalecer la Chl-b o incluso la Chl-c. Estos implicarían que los ecosistemas acuáticos estudiados disponen de nutrientes limitados, llevándolos a una productividad primaria reducida como Pereira-Ibarra *et. al* (2021) lo explica. De igual manera, estas variaciones podrían deberse a condiciones climáticas, características físicas de cada laguna, además de la presencia de diferentes colonias de fitoplancton (Dashkova *et al*, 2022).

Como se sabe, los niveles altos de Chl-a se considera como un indicador de productividad primaria dentro de un cuerpo de agua, siendo así las lagunas con niveles de Chl-a más altos fueron Estrellascocha, Napales, Chusalongo y Jigeno, como se demuestra en la *Figura 2*, sin embargo los valores encontrados no reflejan niveles que se puedan catalogar como lagunas eutrofizadas.

Los valores de Chl-a obtenidos en este estudio presentan similitudes con el estudio de Colen *et al.* (2017) que encontró valores de clorofila entre $0.02\mu\text{g/l}$ a $0.68\mu\text{g/l}$, lo que sugiere que de igual manera nuestros valores representan cuerpos de agua oligotróficos debido a la poca productividad que manifiestan. Además, considerando que la Chl-a depende de la concentración de nutrientes, la penetración de la luz y temperatura del agua (Bonansea *et.al.*, 2012), es muy probable que la variación de las concentraciones entre lagunas se deba a variaciones de estos parámetros. Por otro el contenido de Chl-a evidencia la abundancia de fitoplancton (Millán-Nuñez *et. al*, 1978). y posiblemente de cianobacterias como evidencia Filazzola *et. al*, (2020), que atribuyen a las cianobacterias la mayor concentración de Chl-a, pues estas presentan mayor una afinidad por este pigmento.

Por otro lado, la concentración de Chl-b podría suponer una diversidad o abundancia de cierto tipo de algas y otros organismos fotosintéticos (Kühl *et al.*, 2020), es posible que las condiciones ambientales también estén involucradas, ya que ciertas condiciones pueden

favorecer a cierto tipo organismos. Así también Li *et. al* (2018) describe, que también podría estar relacionado a la ciertas condiciones de disponibilidad de recursos, a la competencia y la interacción entre especies dentro de un mismo cuerpo de agua. Algunos estudios atribuyen la mayor concentración de la Chl-c a la presencia de comunidades de diatomeas, que presentan adaptaciones específicas al ambiente en el que se encuentra (Dashkova et al., 2022). En el caso de existir dominancia de un grupos específico de organismos podría deberse a las características particulares de los ecosistemas, ya sea parámetros físicos como el oxígeno disuelto, la temperatura, salinidad, así como la cantidad de nutrientes disponibles (Bennett *et. al*, 2021).

4.2. Valores NDVI de las diferentes lagunas.

Los índices de vegetación oscilan entre valores positivos como negativos, siendo de -1 a +1, como ya se ha mencionado. Los valores que permanecen dentro de una escala positiva están relacionados con la presencia de vegetación, por el contrario los datos que están dentro de valores negativos tienden a ser relacionados con la ausencia de vegetación, (García, 2015). Como se muestra en la *Figura 5*, como también en la *Tabla 2*, los valores NDVI están encima de 0, si bien son valores apenas mayores se pueden atribuir a la presencia de fitoplancton.

El uso del NDVI para el análisis de cuerpos limnéticos es reciente, sus valores están relacionados con comunidades de fitoplancton y crecimientos algales, valores bajos están vinculados a una baja productividad mientras que valores altos representarían niveles elevados de productividad (García, 2015). Los valores más altos obtenidos en este estudio fueron en las lagunas de Patos (0.059), seguido por Chusalongo (0.056), luego Dos Chorreras (0.045) y finalmente Toreadora, (0.041) lo que nos deja interpretar que en estas lagunas existe mayor actividad fotosintética también una alta disponibilidad de nutrientes, además en estos valores pudieron influenciar las condiciones ambientales para que dichas características sean posibles.

4.3. Correlación entre Clorofila a (Chl-a) e índice NDVI.

En varios estudios la clorofila a (Chl-a) es utilizada para establecer una correlación con el índice NDVI, debido a que para la obtención del índice NDVI se emplean bandas absorción de Clorofila. Como describe el estudio de Morillo *et. al* (2018) para el lago de

Venezuela, el NDVI pudo ser el índice de vegetación que mejor predice la concentración de Chl-a. En ese caso, la correlación arrojó un valor de 0.94, lo que da una correlación fuerte positiva. También se menciona sobre un estudio de Zhaofei *et. al* (2017), en el cual también se encontró una alta correlación entre los valores del NDVI y datos de Chl-a, para un estudio sobre la cobertura vegetal en las mesetas de Mongolia.

Sin embargo, en el caso de nuestro estudio las únicas lagunas que presenta una correlación fuerte positiva son Estrellascocha y Dos Chorreras con valores de con un valor de 0.997 y 0.868 respectivamente. Esto coincide con el reciente trabajo de Tenesaca (2022) en donde una de las lagunas con alta concentración de clorofila y NDVI fue Dos chorreras, lo que nos deja interpretar que en esta laguna podemos confirmar que existe una correlación positiva entre valores de Chl-a y NDVI. Además de lagunas con correlación media o baja como lo son Chusalongo, Estrellascocha, y Taitachugo.

Estos valores de correlación positivos son comparables también con valores hallados por Ferral en el año de 2012 en donde evaluó de igual manera la Chl-a e índice NDVI en un embalse de Argentina, obtuvo una correlación de 0.93 que fue calculado a partir de imágenes LANDSAT TM. De la misma manera, otro estudio de Zhengjun *et. al* (2008), que reportó índices de correlación de 0.85.

No obstante, los valores de correlación también fueron negativos, es decir se relacionan inversamente. Toreadora presenta un valor de -0.592 el cual corresponde a fuerte negativa, lo que demuestra que existe una correlación inversamente proporcional, es decir, mientras una variable crece la otra decrece. Morocho (2023) explica que esta correlación negativa se debe a la presencia de factores externos que llegaron a influir en la calidad de los datos, en su caso fue el periodo de tiempo de obtención de las imágenes. En nuestro caso, al tener datos de varias fechas, desde el 2022 hasta el 2024, pudo haber influenciado de la misma manera

5. CONCLUSION

El desarrollo de este tipo de estudios nos permiten tener una idea más clara sobre nuevos métodos de monitoreo de diferentes ecosistemas. En este caso al ser un estudio de Limnología aportamos nueva información sobre nuevos métodos y protocolos que al ser recientes no existe mucha información al respecto. De igual manera, al ser un análisis bio-óptico mediante la determinación de niveles de clorofila e índice NDVI podemos decir que es un protocolo óptimo para poder complementar análisis mediante solamente la recolección de muestras in-situ para así poder ahorrar recursos y tiempo para un monitoreo adecuado y eficaz.

La variabilidad de clorofila *a*, *b* y *c* nos demostró que no todos los ecosistemas acuáticos poseen la misma estructura interna, es decir que no tienen el mismo nivel de productividad y que posiblemente tampoco poseen la presencia de los mismos organismos. Además podemos inferir que la actividad antrópica altera la composición de estos cuerpos de agua, la laguna Taitachugo es la más lejana, ésta no presenta altos niveles de clorofila de ningún tipo, por lo que se asume que este cuerpo de agua es el más oligotrófico de las lagunas estudiadas, ya que al no presentar altas concentraciones de clorofila, tampoco existiría gran cantidad de fitoplancton.

Trabajar en este tipo de investigaciones es de sumo interés debido a que vivimos en un mundo de constante cambio, por lo que la creación de nuevos protocolos para el monitoreo y conservación de recursos que se adapten a nuestras necesidades es muy importante. Al estar en una era digital es conveniente perfeccionar técnicas pre existentes como es el caso de la teledetección, si bien fue desarrollada hace ya varios años no es hasta hoy en día que tenemos la capacidad de perfeccionarlo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilar, C. G. (2015). Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales para análisis de coberturas vegetales en la provincia de Loja, Ecuador.

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>

Alonso, D. (2023). *NDVI: Qué es y cómo calcularlo con SAGA desde QGIS*. MappingGIS. https://mappinggis.com/2015/06/ndvi-que-es-y-como-calcularlo-con-saga-desde-qgis/#Que_es_un_NDVI

Ansper A. (2018). Sentinel-2/MSI applications for European Union Water Framework Directive reporting purposes. Doctoral dissertation, Tartu Ülikool.

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>

Bonanseña, M.; Ledesma, C.; Rodríguez, C.; Delgado, A. (2012). Concentración de clorofila-a y límite de zona fótica en el embalse Río Tercero (Argentina) utilizando imágenes del satélite CBERS-2B. *AmbiAgua, Taubaté*, v. 7, n. 3, p. 61-71.
<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.847>

Caldas, A. X. (2020). Caracterización SIG del uso de la tierra y geomorfología del Macizo del Cajas -. Cuenca.

Cárdenas, D., Macías, J. (2022). Determinación De Factores Físico Químicos En Cuerpos Lénticos En El Páramo Del Macizo Del Cajas. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/11784/1/17312.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>

- 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>
- 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>
- Ferral, A. (2012). Análisis espacio-temporal del efecto del sistema de aireación artificial en el embalse San Roque. Integración de datos de campo y técnicas geoespaciales. Córdoba, Argentina.: Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich.
- García, J. J. (2015). Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. Madrid.
- García, J. J. (2015). Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. Madrid.
- García, M. (2018). Protocolo de monitoreo hidrológico en páramos. Repositorio Institucional de Documentación Científica Humboldt, 174. <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/34981>
- Giardino C., Brando V., Gege P., Pinnel N., Hochberg E., Knaeps E., Reusen I., Doerffer R., Bresciani M., Braga F., Champollion N., Dekker A. y Foerster S. (2019). Imaging Spectrometry of Inland and Coastal Waters: State of the Art, Achievements and Perspectives. *Surveys in Geophysics*, 40 (3):401-429.
- Giardino, C., Pepe, M., Brivio, P. A., Ghezzi, P., & Zilioli, E. (2001). Detecting chlorophyll, secchi disk depth and surface temperature in a sub-Alpine lake using Landsat imagery. *Science of The Total Environment*, 268(1-3), 19-29. [https://doi.org/10.1016/s0048-9697\(00\)00692-6](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(00)00692-6)

Gillespie, T. W., Ostermann-Kelm, S., Dong, C., Willis, K. S., Okin, G. S., & MacDonald, G. M. (2018). Monitoring changes of NDVI in protected areas of Southern California. *Ecological Indicators*, 88, 485-494. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.01.031>

Gitelson A., Nikanorov A., Sabo G. y Szilagyi F. (1986). Etude de la qualite des eaux de surface parteledetection. IAHS Publications, 157:111-121.

Gons H. (1999). Optical teledetection of chlorophyll a in turbid inland waters. *Environmental Science & Technology*, 33 (7):1127-1132.

Gonzaga, C. (2016). Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales para análisis de coberturas vegetales en la provincia de Loja, Ecuador. CEDAMAZ

Gordon H., Clark D., Hovis W., Austin R. y Yentsch C. (1985). Ocean color measurements. In: Saltzman, B (Ed.), *Advances in Geophysics*. Elsevier, pp. 297-333.

Gordon H., Clark D., Mueller J. y Hovis W. (1980). Phytoplankton pigments from the Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner: comparisons with surface measurements. *Science*, 210 (4465):63-6.

Hansen C., Williams G., Adjei Z., Barlow A., Nelson J. y Miller A. (2015). Reservoir water quality monitoring using remote sensing with seasonal models: case study of five central-Utah Reservoirs. *Lake and Reservoir Management*, 31 (3):225-240.

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>

Ledesma, C., Bonansea, M., Rodríguez, C., & Delgado, A. R. S. (2013). Determinación de indicadores de eutrofización en el embalse Río Tercero, Córdoba (Argentina). *Revista Ciencia Agronómica*, 44(3), 419-425. <https://doi.org/10.1590/s1806-66902013000300002>

Leta Morocho, P. (2023). Correlación espacial de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) entre plataformas satelitales y vehículos aéreos no tripulados (UAV), en los agroecosistemas de cuatro cuencas de los altos Andes del macizo del

Cajas. Universidad Católica de Cuenca.
<https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/16585>

Millán-Núñez, R., & Alvarez-Borrego, S. (1978). Series De Tiempo De Clorofilas a, b y C, Y Sus Feofitinas En Las Bocas De Dos Lagunas Costeras. *Ciencias Marinas*, 5(2), 41–52. <https://doi.org/10.7773/cm.v5i2.323>

Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. *El macizo del Cajas es la quinta reserva de biósfera del Ecuador – Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica*. (2012). <https://www.ambiente.gob.ec/el-macizo-del-cajas-es-la-quinta-reserva-de-biosfera-del-ecuador/#:~:text=Reserva%20Biosfera%20Macizo%20de%20El,ha%20pertenecen%20a%20territorio%20marino.>

Morillo, G., Villasmil, G. J. A., Pineda, A., & Orozco, G. R. (2018). Estimación de clorofila «a» en el Lago de Maracaibo, Venezuela utilizando imágenes LANDSAT 8. *Mapping*, 188, 4-14. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6532352>

Nechad B., Ruddick K. y Park Y. (2010). Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. *Remote Sensing of Environment*, 114 (4):854-866.

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>

Pettorelli, N., Borowik, T., Sönnichsen, L., & Jędrzejewska, B. (2013). Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) as a predictor of forage availability for ungulates in forest and field habitats. *European Journal of Wildlife Research*, 59(5), 675-682. <https://doi.org/10.1007/s10344-013-0720-0>

Ramírez, G. P., Rojas, J., & Guerrero, J. (2021). Estimación de la concentración de clorofila-A en la SuperCie de la Bahía de Sechura usando datos imágenes de Landsat 8. *Revista de investigación de física*, 24(2), 11-16. <https://doi.org/10.15381/rif.v24i2.20321>

Rouse J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In NASA SP-351 I, pages 309–317. Third ERTS Symposium, 1973.

Santana Rodríguez, L. M., Escobar Jaramillo, L. A., & Andrés Capote, P. (2010). Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. *Revista de Geografía Norte Grande*, (45), 77-95.

Silva, F. B., Shimabukuro, Y. E., Aragão, L. E. O. C., Anderson, L. O., Pereira, G., Cardozo, F., & Arai, E. (2013). Corrigendum: Large-scale heterogeneity of Amazonian phenology revealed from 26-year long AVHRR/NDVI time-series. *Environmental Research Letters*, 8(2), 029502. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/029502>

Strong A. (1974). Remote sensing of algal blooms by aircraft and satellite in Lake Erie and Utah Lake. *Remote sensing of Environment*, 3 (2):99-107.

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>

Toming K., Kutser T., Laas A., Sepp M., Paavel B. y Nõges T. (2016). Mapping lake water quality parameters with Sentinel-2 MSI imagery. *Remote Sensing*, 8 (8):640.

Torres Guzmán, Olga Nataly. (2015). La declaratoria del Macizo del Cajas como reserva de la biosfera y la minería a gran escala: posibilidades y contradicciones en el caso de Quimsacocha. Tesis de maestría, Flacso Ecuador

Tucker C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2):127–150, 1979.

Tucker, C. J., & Sellers, P. (1986). Satellite Remote Sensing of Primary Production. *International Journal of Remote Sensing*, 7, 1395-1416. <http://dx.doi.org/10.1080/01431168608948944>

Tucker, C. J., Elgin, J. H., McMurtrey, J. E., & Fan, C. (1979). Monitoring corn and soybean crop development with hand-held radiometer spectral data. *Remote Sensing of Environment*, 8(3), 237-248. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90004-x](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90004-x)

Vásquez, G. (2015). Metodología para determinar niveles de Eutrofización en ecosistemas acuáticos. *REVISTA DE LA ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS*, 1(24). Recuperado a partir de <https://www.revistaacsb.org/r/index.php/acsb/article/view/81>

Vincent R., Qin X., McKay R., Miner J., Czajkowski K., Savino J. y Bridgeman T. (2004). Phycocyanin detection from LANDSAT TM data for mapping cyanobacterial blooms in Lake Erie. *Remote Sensing of Environment*, 89 (3):381-392

Vincent, W. F. (2009). Effects of Climate Change on Lakes. *Encyclopedia of Inland Waters*, 55–60. <https://doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00233-7>

Welschmeyer, N. A. (1994). Fluorometric analysis of chlorophyll A in the presence of chlorophyll B and pheopigments. *Limnology and Oceanography*, 39(8), 1985-1992. <https://doi.org/10.4319/lo.1994.39.8.1985>

Wetzel, R.G. and Likens, G.E. (2000) *Limnological Analyses*. 3rd Edition, Springer, New York, Chapter: Nitrogen, Phosphorus, and Other Nutrients, 85-113. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4757-3250-4>

Yang, Xe., Wu, X., Hao, Hl. *et al.* Mechanisms and assessment of water eutrophication. *J. Zhejiang Univ. Sci. B* 9, 197–209 (2008). <https://doi.org/10.1631/jzus.B0710626>

Zhengjun, W., Hong, J., y Du, G. (2008). Use of satellite imagery to assess the trophic state of Miyun Reservoir, Beijing, China. *Environmental pollution*, 13-19.

7. ANEXOS



Imagen 1: Laguna de estudio "Napales".



Imagen 2: Laguna de estudio "Jigeno".



Imagen 3: Laguna de estudio “Patos”.



Imagen 4: Laguna de estudio “Estrellascocha”.



Imagen 5: Medición de parámetros físicos, pH, conductividad, oxígeno disuelto, temperatura.

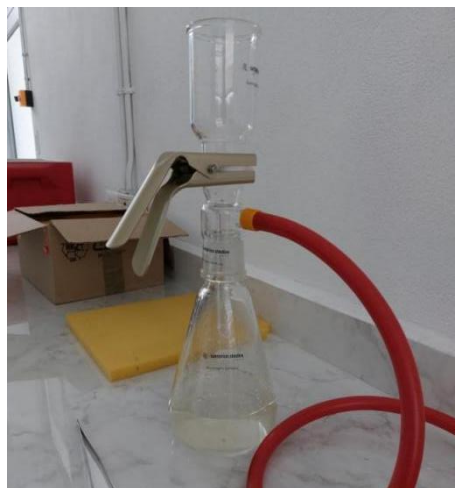


Imagen 6: Extracción de clorofila de muestras recolectadas.



Imagen 7: Muestras descongeladas para su análisis en laboratorio.



Imagen 8: Tubos con clorofila en filtros de microfibra de vidrio de 47 mm de diámetro (GF/F Whatman).