

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA Y GESTIÓN
AMBIENTAL



“Evaluación espacio-temporal de la clorofila-A mediante imágenes satelitales de las lagunas de Razhuilca en Huanta, Ayacucho 2017-2025”

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
EN GESTIÓN AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

Bach. Condori Hinostraza Joel

ASESOR

Dr. Lozano Rodriguez Jorge Luis

HUANTA – PERÚ

2025

NOMBRE DEL TRABAJO

EVALUACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA CLOROFILA-A MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES DE LAS LAGUNAS DE RAZU HUILLCA EN HUANTA, AYACUCHO 2017-2025

AUTOR

Joel Condori Hinostrroza

RECuento DE PALABRAS

16038 Words

RECuento DE CARACTERES

96637 Characters

RECuento DE PÁGINAS

83 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

1.3MB

FECHA DE ENTREGA

Sep 5, 2025 5:18 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Sep 5, 2025 5:20 PM GMT-5

● **11% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 7% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 6% Base de datos de trabajos entregados
- 4% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)



Firmado digitalmente
por LOZANO
RODRIGUEZ Jorge
Luis FAU
20574653798 soft
Fecha: 2025.09.05
19:51:39 -05'00'

**EVALUACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA CLOROFILA-A MEDIANTE
IMÁGENES SATELITALES DE LAS LAGUNAS DE RAZUHUILCA EN
HUANTA, AYACUCHO 2017-2025**

TESISTA:

Bach. Condori Hinostroza Joel

ASESOR

Dr. Lozano Rodriguez Jorge Luis



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
Creada por Ley N° 29658

FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL

"AÑO DE LA RECUPERACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE LA ECONOMÍA PERUANA"

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO EN GESTIÓN AMBIENTAL**

En ciudad de Luricocha, en el auditorio de las Instalaciones del campus universitario de Intay de la Universidad Nacional Autónoma de Huanta, ubicado en la autopista Carlos Ch. Hiraoka, desvió a Ccollana, a los 23 días del mes de setiembre de 2025, siendo las 14:00 horas se dio inicio al acto académico de sustentación de tesis con la presencia de los miembros del jurado calificador:

Dr. Solón Dante Carhuallanqui Ibarra
Mtro. Efrain Suclli Montañez
Dr. Jorge Luis Lozano Rodríguez

Presidente
Miembro titular 2
Miembro titular 3

Acto seguido se procedió a dar lectura de la Resolución de Vicepresidencia Académica N° 075-2025-CO-UNAH, en la que señala fecha, hora y designación de jurado evaluador para la sustentación de tesis del Bach. Joel Condori Hinostroza, con la tesis titulada: "Evaluación espacio-temporal de la clorofila-A mediante imágenes satelitales de las lagunas de Razuhuilca en Huanta, Ayacucho 2017-2025", asesorado por el Dr. Jorge Luis Lozano Rodríguez, para optar el Título profesional de: Ingeniero en Gestión Ambiental.

Observaciones:

.....
.....
.....

Terminada la sustentación se procedió a la formulación de preguntas por los miembros del jurado evaluador, los mismos que fueron defendidos y absueltos por el tesista. Acto seguido se procedió a calificar con el resultado siguiente:

Aprobado Regular	()
Aprobado Bueno	(X)
Aprobado Muy Buenos	()
Aprobado Excelente	()

Con la calificación de *catorce* (14)

Siendo las *15:00 horas* se da por finalizada el acto académico de sustentación de tesis pasando a firmar los miembros del jurado evaluador.

.....
[Signature]
Dr. Solón Dante Carhuallanqui Ibarra
PRESIDENTE

.....
[Signature]
Mtro. Efrain Suclli Montañez
MIEMBRO TITULAR 2



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA

.....
[Signature]
Dr. Jorge Luis Lozano Rodríguez
DOCENTE ORDINARIO ASOCIADO

Dr. Jorge Luis Lozano Rodríguez

DEDICATORIA

A mi madre Julia Hinostroza Huamaní y a mi padre Esteban Condori Ayala, por su amor incondicional, sacrificio y por ser mi mayor ejemplo de esfuerzo y perseverancia. A mis hermanos, por su constante apoyo y por compartir conmigo cada paso de este camino.

Con todo mi cariño y gratitud, les dedico este logro.

AGRADECIMIENTO

- A Dios, fuente de sabiduría y fortaleza, por iluminar mi camino, darme salud, paciencia y la oportunidad de culminar esta etapa tan importante de mi vida.
- A mis amigos, por su apoyo incondicional, por las palabras de aliento, la compañía sincera y los momentos compartidos que hicieron más llevadero este proceso.
- A mis docentes, por brindarme sus conocimientos, exigencia y formación académica, que han sido fundamentales para mi desarrollo profesional y personal.
- Y de manera muy especial, al Dr. Lozano Rodríguez Jorge Luis, mi asesor, por su valiosa orientación, paciencia y compromiso constante durante el desarrollo de este trabajo. Su guía ha sido clave para lograr este resultado.

RESUMEN

Este estudio empleó imágenes del satélite Sentinel-2 para evaluar la distribución espaciotemporal de clorofila-a en las lagunas Chacacocha y Yanacocha durante el período 2017-2025. Utilizando el índice Chlorophyll Index (Chl Index) y procesando los datos con los softwares ENVI 5.6 y ArcGIS, se generaron mapas temáticos y series temporales que permitieron caracterizar la dinámica trófica de estos ecosistemas altoandinos. La metodología demostró ser particularmente efectiva para capturar las variaciones en la productividad primaria de ambos cuerpos de agua.

El análisis reveló una clara tendencia temporal en las concentraciones de clorofila-a. Entre 2017 y 2020, los niveles se mantuvieron estables en ambas lagunas. Sin embargo, a partir de 2021 se observó un incremento progresivo, alcanzando valores máximos en 2023 (0.0758 en Chacacocha y 0.0528 en Yanacocha), asociados a condiciones climáticas extremas como sequías intensas. Esta tendencia se revirtió en 2024 y 2025 debido al aumento de precipitaciones, que estabilizó las concentraciones. Además, Chacacocha mostró una mayor variabilidad interanual (0.0289-0.0758) en comparación con Yanacocha (0.0184-0.0528), lo que sugiere diferencias en su sensibilidad a factores ambientales.

La investigación demostró la utilidad de la teledetección y el Chl Index para el monitoreo de lagunas altoandinas, destacando su vulnerabilidad ante cambios climáticos. Los resultados resaltan la necesidad de implementar estrategias de gestión adaptativas, especialmente en períodos de sequía, cuando el riesgo de eutrofización aumenta. Este trabajo no solo aporta datos valiosos para la comprensión de estos ecosistemas, sino que también establece una metodología replicable para futuros estudios en ambientes similares.

PALABRAS CLAVES: Clorofila-a, eutrofización, Chlorophyll Index (Chl Index), teledetección y ENVI 5.6.

ABSTRACT

This study used Sentinel-2 satellite imagery to assess the spatiotemporal distribution of chlorophyll-a in the Chacacocha and Yanacocha lagoons during the period 2017–2025. Using the Chlorophyll Index (Chl Index) and processing the data with ENVI 5.6 and ArcGIS software, thematic maps and time series were generated that allowed us to characterize the trophic dynamics of these high Andean ecosystems. The methodology demonstrated is particularly effective in capturing variations in the primary productivity of both water bodies.

The analysis revealed a clear temporal trend in chlorophyll-a concentrations. Between 2017 and 2020, levels remained stable in both lagoons. However, starting in 2021, a progressive increase was observed, reaching maximum values in 2023 (0.0758 in Chacacocha and 0.0528 in Yanacocha), associated with extreme weather conditions such as intense droughts. This trend reversed in 2024 and 2025 due to increased rainfall, which stabilized concentrations. Furthermore, Chacacocha showed greater interannual variability (0.0289–0.0758) compared to Yanacocha (0.0184–0.0528), suggesting differences in their sensitivity to environmental factors.

The research demonstrated the usefulness of remote sensing and the Chl Index for monitoring high Andean lagoons, highlighting their vulnerability to climate change. The results underscore the need to implement adaptive management strategies, especially during periods of drought, when the risk of eutrophication increases. This work not only provides valuable data for understanding these ecosystems but also establishes a replicable methodology for future studies in similar environments.

KEY WORDS: Chlorophyll-a, eutrophication, Chlorophyll Index (Chl Index), remote sensing and ENVI 5.6.

ÍNDICE

RESUMEN	ix
ABSTRACT.....	x
INTRODUCCIÓN	xv
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.1. Descripción y formulación del problema	17
1.2. Objetivos.....	19
1.2.1. Objetivo General.....	19
1.2.2. Objetivos Específicos.....	19
1.3. Justificación e importancia	20
1.4. Hipótesis	21
1.5. Variables.....	22
II. MARCO TEÓRICO	25
2.1. Antecedentes.....	25
2.2. Bases teóricas	29
2.2.1. Gestión sostenible del agua.....	29
2.2.2. Ecosistemas acuáticos lénticos (lagunas)	29
2.2.3. Ciclo hidrológico y recarga de acuíferos	30
2.2.4. Cambio climático y su impacto en los cuerpos de agua	30
2.2.5. Contaminación por actividades agrícolas	31
2.2.6. Indicadores biológicos de calidad del agua (bioindicadores)	32
2.2.7. Teledetección en el monitoreo ambiental.....	33
2.2.8. Aplicación del satélite Sentinel-2 y plataforma Copernicus.....	33
2.2.9. Análisis espacio-temporal en estudios ambientales.....	33
2.3. Definición de términos.....	34
2.3.1. Clorofila-a.....	34

2.3.2. Fitoplancton	34
2.3.3. Eutrofización.....	35
2.3.4. Índice de Clorofila (Chl Index)	36
2.3.5. Corrección radiométrica y atmosférica	36
2.3.6. Firma espectral.....	37
2.3.7. Bandas espectrales de Sentinel-2	38
III. METODOLOGÍA	40
3.1. Tipo y nivel de investigación	40
3.2. Ámbito temporal y espacial	40
3.2.1. Ámbito temporal	40
3.2.2. Ámbito espacial	41
3.3. Población y muestra.....	41
3.3.1. Población	41
3.3.2. Muestra	41
3.4. Instrumentos	44
3.5. Procedimientos	44
3.6. Análisis de datos	47
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
4.1. Adquisición y procesamiento de imágenes satelitales Sentinel-2 correspondientes a los años 2017 y 2025 para la detección de clorofila-a en las lagunas de Razuhuillca.....	49
4.2. Generación de mapas temáticos de la distribución de la clorofila-a, mediante firmas espectrales en las lagunas de Razuhuillca para los años 2017 al 2025.	53
4.3. Determinación de la variabilidad temporal de la concentración de clorofila-a en las lagunas de Razuhuillca a través de un gráfico de línea que abarque el período 2017-2025.....	72
V. CONCLUSIONES	75
VI. RECOMENDACIONES	76
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFIAS.....	77

VIII.	ANEXOS.....	83
-------	-------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Mapa de ubicación de las lagunas Chacaqocha y Yanacocha.....	43
Figura 2	Adquisición de imágenes satelitales de Copernicus	49
Figura 3	Corrección radiométrica de imágenes satelitales sentinel -2	49
Figura 4	Resample a 10 m de resolución en ENVI 5.6.	50
Figura 5	Unión de las 13 bandas espectrales en ENVI 5.6.	50
Figura 6	Corrección atmosférica de imágenes satelitales sentinel -2 en ENVI 5.6. .	51
Figura 7	Unión de bandas para el Índice Chlorophyll Index (Chl Index) en ENVI 5.6.	51
Figura 8	Generación del ráster de clorofila-a en ENVI 5.6	52
Figura 9	Recorte de las lagunas en ArcGIS	52
Figura 10	Mapa temático de la concentración de clorofila-a en las lagunas Chacacocha y Yanacocha correspondiente al año 2017.....	54
Figura 11	Mapa temático de la concentración de clorofila-a en las lagunas Chacacocha y Yanacocha correspondiente al año 2018.....	56
Figura 12	Mapa temático de la concentración de clorofila-a en las lagunas Chacacocha y Yanacocha correspondiente al año 2019.....	58
Figura 13	Mapa temático de la concentración de clorofila-a en las lagunas Chacacocha y Yanacocha correspondiente al año 2020.....	60
Figura 14	Mapa temático de la concentración de clorofila-a en las lagunas Chacacocha y Yanacocha correspondiente al año 2021.....	62
Figura 15	Mapa temático de la concentración de clorofila-a en las lagunas Chacacocha	

y Yanacocha correspondiente al año 2022.....	64
Figura 16 Mapa temático de la concentración de clorofila-a en las lagunas Chacacocha y Yanacocha correspondiente al año 2023.....	66
Figura 17 Mapa temático de la concentración de clorofila-a en las lagunas Chacacocha y Yanacocha correspondiente al año 2024.....	68
Figura 18 Mapa temático de la concentración de clorofila-a en las lagunas Chacacocha y Yanacocha correspondiente al año 2025.....	70
Figura 19 Gráfico de línea que muestra la evolución del promedio de concentración de clorofila-a en la laguna Chacacocha durante el periodo 2017–2025.....	72
Figura 20 Gráfico de línea que muestra la evolución del promedio de concentración de clorofila-a en la laguna Yanacocha durante el periodo 2017–2025.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de las variables.....	23
Tabla 2 Indicadores principales en la calidad de agua superficial.....	32
Tabla 3 Valores límites propuestos para categorías tróficas.....	36
Tabla 4 Firmas espectrales de coberturas terrestres.....	37
Tabla 5 Bandas espectrales del satélite Sentinel-2.....	39
Tabla 6 Coordenadas de la Laguna Chacacocha y Yanacocha (UTM).....	42
Tabla 7 Formula del Índice Chlorophyll Index (Chl Index).....	46

INTRODUCCIÓN

La calidad del agua es un tema de creciente preocupación a nivel mundial, ya que está directamente relacionada con la salud humana, la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos y el desarrollo económico. En las últimas décadas, el aumento de las actividades industriales, agrícolas y urbanas ha generado un deterioro significativo en la calidad de los cuerpos de agua, tanto superficiales como subterráneos. En el Perú, esta situación no es ajena; diversas lagunas, ríos y fuentes hídricas enfrentan serios problemas de contaminación, afectando no solo a la biodiversidad local, sino también a las poblaciones que dependen de estos recursos para su consumo, agricultura, pesca y recreación (Nieto, 2011).

Geng et al. (2025) menciona que, entre los principales procesos que deterioran la calidad del agua se encuentra la eutrofización, fenómeno provocado por el exceso de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, que genera un crecimiento desmedido de algas y plantas acuáticas. Este proceso altera el equilibrio ecológico de los cuerpos de agua y puede provocar la disminución del oxígeno disuelto, afectando la vida acuática. Un parámetro clave para evaluar la eutrofización es la clorofila-a, un pigmento presente en las algas verdes que permite estimar la biomasa fitoplanctónica y, por tanto, el grado de productividad biológica de una laguna o cuerpo de agua.

Las lagunas de Razuhuilca, ubicadas en la provincia de Huanta, región Ayacucho, forman parte de un ecosistema de alta montaña que cumple funciones vitales como la regulación hídrica, la provisión de agua para consumo humano y actividades agropecuarias, además de constituir hábitats para diversas especies nativas. No obstante, en los últimos años, se ha observado un aumento de actividades humanas en la zona, tales como el turismo desordenado, los cuales podrían estar alterando el equilibrio ecológico de estas lagunas. Dado el difícil acceso a muchas de estas áreas y la carencia de sistemas de monitoreo continuo, es imprescindible recurrir a herramientas tecnológicas modernas que permitan realizar un seguimiento eficaz del estado ecológico de estos cuerpos de agua, especialmente en cuanto a su contenido de clorofila-a, como indicador del riesgo de eutrofización y de posibles impactos ambientales acumulativos (Ore, 2016).

En este sentido, las imágenes satelitales se han convertido en una herramienta poderosa y eficiente para el monitoreo de parámetros ambientales, gracias a su capacidad de capturar información multiespectral de grandes superficies en intervalos regulares de tiempo. La misión Sentinel-2, parte del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA), proporciona imágenes con una resolución espacial de hasta 10 metros y una alta frecuencia temporal, lo cual la convierte en una fuente ideal para estudios de cuerpos de agua de pequeña y mediana escala. Mediante el análisis de firmas espectrales en bandas específicas, es posible estimar la concentración de clorofila-a en cuerpos de agua y generar mapas que revelen su distribución espacial y su evolución en el tiempo. Esta técnica permite reemplazar o complementar las mediciones in situ, optimizando recursos y facilitando una vigilancia más precisa en áreas remotas como las lagunas altoandinas del Perú (Zhao et al., 2024).

Por ello, el objetivo principal de la presente investigación fue evaluar la distribución espacio-temporal de la clorofila-a mediante imágenes satelitales de las lagunas de Razhuillca en Huanta, Ayacucho, durante el periodo 2017–2025. Para lograrlo, se utilizaron imágenes obtenidas por el satélite Sentinel-2, las cuales fueron procesadas y analizadas mediante los softwares especializados ENVI 5.6 y ArcGIS. Estas herramientas permitieron aplicar técnicas de análisis espectral y de teledetección, con el fin de generar mapas temáticos y realizar una evaluación detallada de la variabilidad de la clorofila-a en las lagunas estudiadas. La aplicación de esta metodología busca no solo contribuir al conocimiento científico sobre la calidad del agua en ecosistemas andinos, sino también brindar información útil para la gestión ambiental, la toma de decisiones y la implementación de medidas de conservación y mitigación en beneficio de las comunidades locales y del ecosistema en general.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción y formulación del problema

Guan et al. (2025) menciona que la calidad del agua en ecosistemas acuáticos como ríos, lagos y lagunas es un tema de creciente preocupación a nivel mundial, debido a su importancia para la salud humana, el equilibrio ecológico y el desarrollo sostenible. En las últimas décadas, el acelerado crecimiento poblacional, el incremento de las actividades agrícolas e industriales, así como la urbanización sin planificación, han generado un aumento significativo en la contaminación de cuerpos de agua dulce. Uno de los procesos más relevantes que afecta su calidad es la eutrofización, un fenómeno causado por la acumulación excesiva de nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo), que provoca el crecimiento desmedido de algas y plantas acuáticas, alterando la estructura y funcionamiento de los ecosistemas acuáticos. Esta situación se ha convertido en un problema ambiental global, presente tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo, afectando gravemente lagos emblemáticos como el Erie (EE.UU.), el Victoria (África) o el Taihu (China).

En el Perú, la eutrofización también representa una amenaza creciente para ríos, lagunas y lagos de importancia ecológica y social. Las fuentes de contaminación son variadas e incluyen descargas de aguas residuales domésticas sin tratamiento, escorrentía agrícola con fertilizantes, residuos sólidos arrojados directamente a los cuerpos de agua, y la actividad minera. La falta de monitoreo constante y el limitado acceso a tecnologías de control dificultan una gestión adecuada de estos ecosistemas. El estudio realizado por Amañuro (2024), identificó procesos de degradación en lagos como el Titicaca, lagunas costeras y cuerpos de agua altoandinos, evidenciando la presencia de floraciones algales, pérdida de biodiversidad acuática y deterioro en la calidad del agua.

En la región Ayacucho, y específicamente en la provincia de Huanta, la situación no es distinta. Las lagunas del sistema de Razuhuilca, ubicadas en la zona altoandina, constituyen una fuente importante de agua para las comunidades cercanas y para los ecosistemas de montaña. Estas lagunas no solo cumplen funciones de almacenamiento hídrico, sino que también forman parte del

patrimonio ambiental de la región (Bautista, 2020).

Uno de los mayores desafíos frente a la problemática de la eutrofización es la falta de monitoreo continuo y actualizado de los parámetros que indican el estado trófico de los cuerpos de agua. En zonas remotas como la sierra ayacuchana, el acceso geográfico limitado dificulta las evaluaciones frecuentes in situ. Esto ha generado vacíos de información sobre la evolución de la calidad del agua en lagos y lagunas altoandinas, dificultando la toma de decisiones informadas para su conservación y manejo sostenible (Valderrama, 2010).

Frente a ello, el uso de tecnologías de percepción remota, como las imágenes satelitales, se presenta como una alternativa eficaz para monitorear variables biofísicas en cuerpos de agua de forma periódica y con cobertura espacial amplia. El uso de sensores ópticos como los del satélite Sentinel-2 permite estimar parámetros como la clorofila-a, un indicador clave del nivel de eutrofización y del crecimiento de fitoplancton. Sin embargo, en la región Ayacucho, el uso de esta tecnología aún es incipiente, y se requieren investigaciones que demuestren su utilidad para el monitoreo de lagunas vulnerables como las de Razuhuillca.

En este contexto, es necesario desarrollar estudios que permitan evaluar la distribución espacio-temporal de la clorofila-a en lagunas altoandinas, con el fin de identificar cambios en su calidad ecológica y proponer estrategias de manejo adecuadas. Una investigación de esta naturaleza contribuirá no solo a mejorar el conocimiento sobre el estado de las lagunas de Huanta, sino también a sentar las bases para sistemas de monitoreo ambiental sostenibles y basados en tecnologías modernas, que puedan ser replicados en otros cuerpos de agua del país.

Interrogante General

- ¿Cuál es la distribución espacio-temporal de la clorofila-a mediante imágenes satelitales de las lagunas de Razuhuillca en Huanta, Ayacucho 2017-2025?

Interrogantes Específicos

PE1: ¿Cómo pueden ser adquiridas y procesadas las imágenes satelitales Sentinel-2 para detectar la concentración de clorofila-a en las lagunas de Chacacocha y Yanacocha entre los años 2017 al 2025?

PE2: ¿Qué patrones espaciales de distribución presenta la clorofila-a en las lagunas de Chacacocha y Yanacocha, según los mapas temáticos generados a partir de imágenes Sentinel-2 entre 2017 al 2025?

PE3: ¿Cómo ha variado temporalmente la concentración de clorofila-a en las lagunas de Chacacocha y Yanacocha durante el periodo 2017–2025?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Evaluar la distribución espacio-temporal de la clorofila-a mediante imágenes satelitales de las lagunas de Razuhuilca en Huanta, Ayacucho 2017-2025

1.2.2. Objetivos Específicos

OE1: Adquirir y procesar imágenes satelitales Sentinel-2 para determinar la presencia de clorofila-a en las lagunas de Chacacocha y Yanacocha del 2017 al 2025.

OE2: Generar mapas temáticos de la distribución de la clorofila-a, mediante pixeles espectrales en las lagunas de Chacacocha y Yanacocha del 2017 al 2025.

OE3: Determinar la tendencia temporal variable de la concentración de clorofila-a en las lagunas de Chacacocha y Yanacocha de los años 2017 al 2025.

1.3. Justificación e importancia

El agua es un recurso natural esencial para la vida y el desarrollo de las sociedades. Su disponibilidad y calidad están directamente relacionadas con la salud humana, la seguridad alimentaria, la conservación de los ecosistemas y el crecimiento económico. En este contexto, monitorear la calidad del agua se convierte en una prioridad, especialmente en zonas donde las fuentes naturales están siendo amenazadas por la contaminación. Uno de los principales procesos que deteriora la calidad del agua en lagos y lagunas es la eutrofización, la cual provoca la proliferación descontrolada de algas, disminuye el oxígeno disuelto y altera la biodiversidad acuática. Por ello, el seguimiento de indicadores como la clorofila-a, que permite evaluar el grado de eutrofización, resulta crucial para garantizar la sostenibilidad de estos ecosistemas hídricos (Guimaraes, 2022).

Esta investigación contribuirá significativamente tanto a la sociedad como a la comunidad científica. A nivel social, generará información valiosa sobre el estado ecológico de las lagunas de Razuhuillca, fuente de agua vital para muchas familias en la provincia de Huanta. Esta información podrá ser utilizada por autoridades locales y regionales para diseñar políticas de protección, gestión de recursos hídricos y prevención de la contaminación. A nivel científico, el estudio aportará evidencia sobre el uso de imágenes satelitales como una herramienta eficaz y de bajo costo para monitorear la calidad del agua en zonas altoandinas de difícil acceso, lo cual puede replicarse en otras regiones del país e incluso de América Latina.

Además, el uso de tecnologías de percepción remota, como las imágenes del satélite Sentinel-2, permite un análisis espacio-temporal detallado de la clorofila-a sin necesidad de realizar mediciones constantes en campo, lo que optimiza recursos y mejora la frecuencia del monitoreo. Esta metodología resulta especialmente útil para las entidades encargadas de la vigilancia ambiental, ya que facilita la toma de decisiones preventivas frente al deterioro de ecosistemas acuáticos.

La presente tesis también busca llenar vacíos de información existentes en la región de Ayacucho, donde no se han desarrollado suficientes estudios sobre la calidad del agua en lagunas altoandinas utilizando herramientas de análisis satelital. De este

modo, el estudio representa un aporte técnico y académico importante, que fortalece las capacidades locales en el uso de datos geoespaciales aplicados a la gestión de recursos naturales.

Finalmente, la investigación tiene un enfoque ambientalmente responsable y preventivo, al ofrecer un modelo de evaluación que promueve el cuidado de los ecosistemas antes de que se presenten situaciones críticas de contaminación. Esto es fundamental en un contexto global donde el cambio climático, la escasez hídrica y la presión humana sobre los recursos naturales exigen nuevas formas de monitoreo y gestión ambiental basadas en ciencia, tecnología e información oportuna.

1.4. Hipótesis

1.4.1 Hipótesis General

La distribución espacio-temporal de la clorofila-a en las lagunas de Razuhuillca, evaluada mediante imágenes satelitales Sentinel-2 entre los años 2017 al 2025, muestra una variabilidad significativa asociada a procesos de eutrofización y cambios ambientales.

1.4.2 Hipótesis Específicas

HE1: Las imágenes satelitales Sentinel-2 permiten adquirir y procesar la presencia de clorofila-a en las lagunas de Chacacocha y Yanacocha del 2017 al 2025

HE2: Los mapas temáticos generados a partir de píxeles espectrales evidencian patrones diferenciados en la distribución espacial de la clorofila-a en las lagunas de Chacacocha y Yanacocha del 2017 al 2025

HE3: La concentración de clorofila-a en las lagunas de Chacacocha y Yanacocha presenta una tendencia temporal variable de los años 2017 al 2025

1.5. Variables

- **Variable independiente:** Espacio-temporal
- **Variable dependiente:** Clorofila-a

Tabla 1*Operacionalización de las variables*

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
<ul style="list-style-type: none"> VARIABLE INDEPENDIENTE: Espacio-temporal 	<p>La dimensión espacio-temporal en estudios ambientales se refiere a la variación de un fenómeno a lo largo del tiempo (años, estaciones) y del espacio (localización geográfica). Esta perspectiva permite comprender patrones, tendencias y comportamientos ecológicos relacionados con factores naturales o antrópicos (Mallqui et al., 2022).</p>	<p>La dimensión espacio-temporal será abordada mediante la adquisición de imágenes satelitales Sentinel-2 correspondientes a los años 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024 y 2025 para la zona de estudio en las lagunas de Razuhuilca (Huanta, Ayacucho). Se empleará análisis multitemporal y mapas temáticos para evaluar la distribución espacial y temporal de la clorofila-a.</p>	<p>Concentración de pigmento fotosintético</p> <p>Calidad del agua</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Concentración estimada de clorofila-a (Satélite Sentinel-2) - Variación interanual de la concentración - Estimación del nivel trófico - Distribución espacial de la concentración

<ul style="list-style-type: none"> • VARIABLE DEPENDIENTE: 	<p>La clorofila-a es un pigmento fotosintético esencial presente en todas las algas y plantas fotosintéticas, que permite la absorción de energía solar para el proceso de fotosíntesis. En los ecosistemas acuáticos, su concentración se usa como indicador del nivel de fitoplancton y, por ende, de la productividad biológica y el estado trófico del cuerpo de agua (Bucheli et al., 2021).</p>	<p>La clorofila-a será estimada mediante el procesamiento de imágenes satelitales Sentinel-2 aplicando índices espectrales específicos como el Índice Chlorophyll Index (Chl Index), en el software ENVI 5.6.</p>	Temporalidad	<ul style="list-style-type: none"> - Años de análisis (2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024 y 2025)
			Espacialidad	<ul style="list-style-type: none"> - Estación climática (seca / lluviosa) - Coordenadas geográficas de puntos de monitoreo (entrada, centro, borde, salida)
			Teledetección	<ul style="list-style-type: none"> - Sensor óptico utilizado (Sentinel-2) - Índices espectrales aplicados (por ejemplo: NDVI, índice de clorofila) - Resolución espacial (10–20 m)

Nota: Abreviaciones utilizadas: (ENVI = Environment for Visualizing Images) y (mg/m³ = Miligramos por metro cúbico).

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacionales

A nivel mundial, se han desarrollado diversas investigaciones utilizando teledetección para evaluar la concentración de clorofila-a en cuerpos de agua, destacando el uso de imágenes satelitales y modelos espectrales para el monitoreo ambiental.

Kowe et al. (2023) estudiaron la variabilidad espacio-temporal de la calidad del agua en el Lago Manyame, empleando datos de imágenes Sentinel-2 y algoritmos de índices espectrales como el Índice de Vegetación Ajustado al Agua (WAVI) y el Índice de Diferencia Normalizada del Agua (NDWI). Su análisis abarcó un periodo de cinco años, donde se identificaron fluctuaciones estacionales en la concentración de clorofila-a. Se observó que los valores más altos ocurrieron en la estación seca debido a la disminución del caudal y el incremento de la actividad fotosintética. Estos resultados resaltaron la importancia del monitoreo continuo para evaluar el impacto de factores climáticos y antropogénicos en los ecosistemas acuáticos.

Por otro lado, Baltodano et al. (2024) exploraron la aplicabilidad de 13 productos satelitales de clorofila-a (CHL) en el Lago de Nicaragua, utilizando datos de los sensores MODIS y Sentinel-3. Su análisis de series temporales, comprendido entre los años 2011 y 2016, permitió determinar que el producto CHL derivado de la Iniciativa sobre Cambio Climático (CCI) es el más confiable para el monitoreo a gran escala de la calidad del agua. Sin embargo, el estudio también evidenció la necesidad de mejorar la calibración de modelos empíricos debido a la alta variabilidad en la respuesta espectral del agua, causada por contaminación, cambios en la productividad biológica y actividad antropogénica.

Lusheng et al. (2025) desarrollaron un método automatizado para mejorar la detección de cuerpos de agua mediante imágenes Landsat-9, optimizando el umbral de Otsu en 12 índices de agua, incluidos NDWI, MNDWI, AWEI y WI2015. Su enfoque, probado en diversas regiones con características hidrológicas distintas, alcanzó una precisión superior al 99% en la segmentación de cuerpos de agua. Estos avances facilitan la estimación de la clorofila-a al mejorar la detección de las masas de agua y su reflectancia espectral en el infrarrojo cercano y el rojo. Este método representa un importante avance para el monitoreo remoto de la calidad del agua, especialmente en áreas donde los datos in situ son escasos o difíciles de obtener.

Merchán (2018), realizado en Colombia empleó imágenes satelitales Landsat-8 como herramienta complementaria al monitoreo in situ para evaluar la variación espacial y temporal de la concentración de clorofila-a en la Ciénaga de Ayapel y el Lago de Tota. Se desarrollaron modelos de regresión a partir de bandas espectrales y datos de campo, obteniendo buenos resultados en la Ciénaga de Ayapel ($r^2 = 0,563$), mientras que en el Lago de Tota la correlación fue baja ($r^2 = 0,151$) debido a factores como la profundidad y la presencia de sólidos suspendidos. El estudio concluye que, a pesar de ciertas limitaciones, las imágenes satelitales son útiles, económicas y aplicables en el monitoreo de ecosistemas acuáticos tropicales.

Asimismo, los autores Delgado y Marín (2021), emplearon imágenes satelitales de clorofila superficial (clorofila-s), obtenidas a través del sensor SeaWiFS, con el propósito de identificar zonas con alta concentración de fitoplancton en la región norte de los fiordos australes, comprendida entre los 42° S y 46° S. Las áreas con mayor concentración se localizaron en el golfo de Ancud, la boca del Guafo, el sur del golfo Corcovado y el canal Moraleda. Se analizaron un total de 609 imágenes correspondientes al periodo 2000–2003 para evaluar la viabilidad del uso de sensores remotos

en el monitoreo de las condiciones biológicas de la región. Sin embargo, los resultados obtenidos indican de forma contundente que esta metodología no es recomendable para el área estudiada.

Barreneche et al. (2024), determino que debido a las limitaciones del monitoreo in situ, se evaluó el uso de sensores satelitales (Landsat 8, Sentinel-2 y Sentinel-3) para estimar clorofila-a como indicador de FAN. El estudio comparó tres métodos de corrección atmosférica (SeaDAS, POLYMER y ACOLITE) y 17 algoritmos, destacando el modelo Mixture Density Networks (MDN) como el más preciso, junto a otros como Gons, Moses y el índice NDChl-a. Se concluye que la teledetección, aplicada con algoritmos adecuados, es una herramienta eficaz para el monitoreo ambiental a escala nacional, con implicancias clave para reportes del ODS-

Geng et al. (2025), desarrolló un método innovador para generar estimaciones continuas en espacio y tiempo de la concentración de clorofila, superando las limitaciones de las imágenes satelitales afectadas por la cobertura nubosa. El enfoque combina datos de teledetección con un modelo hidrodinámico del lago, mediante un modelo de partículas trazadoras (PCPM) que simula el movimiento de la clorofila según las corrientes inducidas por el viento. Este método permitió identificar patrones estacionales y regionales controlados por la dinámica del lago. Además, se concluyó que las concentraciones de clorofila en el Lago Superior han permanecido estables durante los últimos 12 a 50 años, a diferencia de otros Grandes Lagos.

2.1.2. Nacionales

En el ámbito nacional, los estudios sobre teledetección aplicada a la calidad del agua han ido en aumento en los últimos años, aunque aún son limitados en comparación con otras regiones del mundo. Sin embargo, las investigaciones realizadas han aportado información valiosa sobre la dinámica de los ecosistemas acuáticos en el Perú y la aplicabilidad de

sensores satelitales para el monitoreo ambiental.

Gonzales Campos et al. (2019) analizaron el estado trófico de la Laguna de Paca, en la región Junín, utilizando imágenes Sentinel-1 y datos espectrales procesados en el software SNAP de la Agencia Espacial Europea (ESA). Para ello, aplicaron modelos empíricos de correlación entre índices espectrales y la concentración de clorofila-a y fosfato, determinando que la laguna presenta un estado trófico variable entre eutrófico e hipertrófico. Este estudio evidenció la influencia de la actividad antropogénica en la eutrofización del cuerpo de agua, resaltando la necesidad de estrategias de gestión sostenible para mitigar el impacto de los aportes de nutrientes.

Por su parte, Quezada García (2020) empleó imágenes Landsat-8 y Sentinel-2 para evaluar parámetros de calidad del agua en los ríos Neshuya y Aguaytía, ubicados en la Amazonía peruana. Mediante análisis de regresión lineal, encontró una relación significativa entre la reflectancia en las bandas del verde y rojo con parámetros como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD) y la Demanda Química de Oxígeno (COD). Sus hallazgos destacaron el potencial de la teledetección para el monitoreo de la calidad del agua en zonas de difícil acceso, permitiendo una mejor planificación de estrategias para la conservación y uso sostenible de los recursos hídricos.

Por otro lado, Quispe et al. (2010), analizó la relación entre datos de clorofila-a obtenidos por sensores satelitales (SeaWiFS) y mediciones in situ del IMARPE, encontrándose una correlación variable según la estación del año. El mejor ajuste se observó en primavera, mientras que en otoño fue menor, evidenciando que los sensores satelitales tienden a sobrestimar o subestimar la concentración de clorofila-a dependiendo de las condiciones estacionales. Este estudio resaltó la utilidad de integrar observaciones satelitales con datos de campo para mejorar el monitoreo de la productividad primaria en ecosistemas de alta dinámica, como el sistema de afloramiento peruano

Yang et al. (2025), en su estudio realizado en la represa Aguada Blanca, se analizó la variabilidad espacio-temporal de la clorofila-a utilizando imágenes satelitales Sentinel-2A y mediciones in situ tomadas en tres zonas del embalse (fluvial, intermedia y lacustre) durante varios meses del año 2017. A través de técnicas estadísticas, se establecieron modelos de correlación entre los datos satelitales y los parámetros físicos obtenidos con sonda multiparamétrica, generando algoritmos representativos por mes. Además, se evaluó el estado trófico mediante el índice de eutrofización de la OCDE, elaborando mapas que reflejan la distribución de la clorofila-a a lo largo del tiempo y el espacio.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Gestión sostenible del agua

La gestión sostenible del agua es un enfoque que busca equilibrar la disponibilidad y el uso de los recursos hídricos, considerando tanto las necesidades actuales como las de las futuras generaciones. Este concepto implica el manejo eficiente del agua para diversos fines, como el consumo humano, la producción agrícola, la industria y la conservación ambiental; asegurando al mismo tiempo la protección de los ecosistemas acuáticos. En un contexto de creciente presión sobre los cuerpos de agua por el cambio climático, la contaminación y la expansión de actividades humanas, resulta fundamental implementar estrategias de planificación y control que promuevan el uso responsable y la preservación de este recurso esencial (Calderon, 2023).

2.2.2 Ecosistemas acuáticos lénticos (lagunas)

Los ecosistemas acuáticos lénticos, como las lagunas, se caracterizan por tener aguas de escaso o nulo movimiento, lo que les otorga condiciones físico-químicas particulares que favorecen una alta biodiversidad. Estos cuerpos de agua juegan un rol esencial en el equilibrio ecológico, ya que actúan como reservorios naturales,

reguladores del microclima, y hábitats de numerosas especies de flora y fauna. Además, las lagunas contribuyen a la recarga de acuíferos, a la retención de sedimentos y nutrientes, y a la mejora de la calidad del agua al actuar como filtros naturales. En muchas regiones altoandinas, estos ecosistemas también representan una fuente importante de agua para el consumo humano, la agricultura y la ganadería. Sin embargo, su fragilidad ecológica los hace especialmente vulnerables frente a las actividades antrópicas, como la agricultura intensiva y la contaminación difusa, lo que resalta la importancia de su monitoreo y conservación (Ccora, 2022).

2.2.3. Ciclo hidrológico y recarga de acuíferos

Cao et al. (2010), menciona sobre el ciclo hidrológico que es el proceso natural mediante el cual el agua se mueve constantemente a través de la atmósfera, la superficie terrestre y el subsuelo. Involucra etapas como la evaporación, condensación, precipitación, infiltración y escurrimiento, siendo fundamental para mantener el equilibrio hídrico en los ecosistemas. Este ciclo permite la renovación continua del agua en diferentes reservorios, incluyendo ríos, lagos, lagunas y cuerpos subterráneos.

Dentro de este proceso, la recarga de acuíferos cumple un papel esencial, ya que permite el almacenamiento de agua en capas subterráneas a través de la infiltración del agua de lluvia o de cuerpos lénticos como las lagunas. Esta recarga es vital para garantizar el abastecimiento sostenible de agua potable, así como para mantener el caudal base de los ríos durante periodos secos. Alteraciones en el ciclo hidrológico, producto de actividades humanas o del cambio climático, pueden afectar significativamente la recarga natural y, con ello, la disponibilidad de agua a largo plazo.

2.2.4. Cambio climático y su impacto en los cuerpos de agua

Exley et al, (2021), resalta el tema sobre el cambio climático el cual

está alterando de manera significativa los patrones hidrológicos a nivel global, afectando tanto la disponibilidad como la calidad del agua en ecosistemas acuáticos. El aumento de la temperatura, la variabilidad en las precipitaciones y la intensificación de fenómenos extremos como sequías e inundaciones, influyen directamente en el nivel, volumen y dinámica de lagos, ríos y lagunas. Estos cambios pueden acelerar procesos como la eutrofización, reducir la oxigenación del agua y alterar los ciclos biogeoquímicos, afectando la biodiversidad acuática y el equilibrio ecológico. En regiones altoandinas, donde los ecosistemas acuáticos son frágiles, los efectos del cambio climático pueden ser aún más severos, comprometiendo el acceso al agua y los servicios ecosistémicos que estos cuerpos proveen.

2.2.5. Contaminación por actividades agrícolas

Las actividades agrícolas son una de las principales fuentes de contaminación difusa en cuerpos de agua, especialmente en zonas rurales y altoandinas. El uso intensivo de fertilizantes químicos, ricos en nitratos y fosfatos, facilita el arrastre de estos nutrientes hacia ríos, lagunas y acuíferos a través de la escorrentía superficial y la infiltración (Lima, 2024).

Este tipo de contaminación puede alterar la calidad del agua, promoviendo procesos como la eutrofización, que afectan directamente a la biodiversidad y a los usos del recurso hídrico. Además, al tratarse de una fuente difusa, su control resulta más complejo, lo que hace necesario el monitoreo constante y la implementación de buenas prácticas agrícolas para mitigar su impacto.

2.2.6. Indicadores biológicos de calidad del agua (bioindicadores)

Los bioindicadores son organismos que reflejan el estado ecológico de un cuerpo de agua, ya que responden a cambios en la calidad del entorno. Entre ellos, el fitoplancton y, en especial, la clorofila-a, son ampliamente utilizados para evaluar la presencia de nutrientes y procesos como la eutrofización. Su análisis permite detectar alteraciones ecológicas de manera más sensible y complementa la información físico-química obtenida mediante monitoreo convencional (Bustamante, 2021).

En la siguiente tabla se muestran los principales indicadores biológicos utilizados para evaluar la calidad del agua en ecosistemas acuáticos. Estos organismos responden a cambios en las condiciones ambientales, especialmente a variaciones en los niveles de nutrientes y contaminantes.

Tabla 2

Indicadores principales en la calidad de agua superficial

Indicador biológico	Tipo de organismo	Función
Clorofila-a	Fitoplancton (microalgas)	Biomasa de algas, productividad primaria, eutrofización
Composición de fitoplancton	Microalgas	Cambios en comunidad, presencia de especies tolerantes o tóxicas
Zooplancton	Microcrustáceos, rotíferos	Cambios tróficos y contaminación química
Macroinvertebrados bentónicos	Insectos acuáticos, crustáceos, moluscos	Calidad ecológica, perturbación física y química
Características de la comunidad	Diversidad, abundancia	Nivel de estrés ambiental, perturbaciones

Nota: Esta tabla indica los diversos indicadores biológicos, así como los tipos de organismos y la función (Bustamante, 2021).

2.2.7. Teledetección en el monitoreo ambiental

Pandey et al. (2021), define a la teledetección como una herramienta clave en el monitoreo ambiental, ya que permite obtener información precisa y continua del territorio mediante sensores instalados en satélites o aeronaves. Esta tecnología facilita la observación de fenómenos naturales sin necesidad de contacto directo, lo que resulta especialmente útil en zonas de difícil acceso. En el caso de los cuerpos de agua, permite analizar variables como la temperatura, turbidez, clorofila-a y cambios en la cobertura superficial, contribuyendo a una evaluación eficiente y a gran escala del estado ecológico de los ecosistemas.

2.2.8. Aplicación del satélite Sentinel-2 y plataforma Copernicus

El satélite Sentinel-2, parte del programa europeo Copernicus, está diseñado para el monitoreo ambiental y la gestión de recursos naturales. Cuenta con un sensor multiespectral (MSI) que capta imágenes en trece bandas espectrales, permitiendo una observación detallada de la superficie terrestre, incluida la detección de variaciones en cuerpos de agua.

A través de la plataforma Copernicus, estos datos están disponibles de forma libre y gratuita, lo que facilita su uso en investigaciones científicas. En estudios limnológicos, Sentinel-2 es especialmente útil para estimar la concentración de clorofila-a, identificar zonas con proliferación algal y generar mapas temáticos que reflejan cambios espaciales y temporales en la calidad del agua (Comisión Europea, 2018).

2.2.9. Análisis espacio-temporal en estudios ambientales

Gómez et al, (2016). Menciona sobre el análisis espacio-temporal el cual permite examinar cómo varían determinadas variables

ambientales a lo largo del tiempo y en diferentes ubicaciones geográficas. En el estudio de cuerpos de agua, esta herramienta resulta útil para identificar patrones de cambio en la calidad del agua, como el aumento progresivo de la clorofila-a o la expansión de zonas eutrofizadas. Al combinar información satelital multitemporal con herramientas SIG, se pueden generar mapas comparativos y gráficos que permiten interpretar la dinámica ambiental y apoyar la toma de decisiones para la gestión sostenible de los ecosistemas.

2.3. Definición de términos

2.3.1. Clorofila-a

La clorofila-a es un pigmento fotosintético esencial presente en organismos como el fitoplancton, algas y plantas acuáticas. Su función principal es captar la luz solar para la fotosíntesis, siendo un componente clave en los ecosistemas acuáticos. Dado que está directamente relacionada con la biomasa del fitoplancton, su concentración es un indicador útil del nivel de productividad biológica en cuerpos de agua (Catalina, 2015).

En estudios ambientales, la clorofila-a se emplea como bioindicador de la calidad del agua, ya que altos niveles suelen asociarse con procesos de eutrofización. Su monitoreo permite detectar desequilibrios ecológicos causados por el exceso de nutrientes, como nitrógeno y fósforo. Por esta razón, es ampliamente utilizada en investigaciones limnológicas y en el monitoreo satelital de lagos y lagunas.

2.3.2. Fitoplancton

El fitoplancton está conformado por microorganismos fotosintéticos que habitan en la columna de agua y constituyen la base de la cadena

alimentaria acuática. Su crecimiento depende de factores como la luz y la disponibilidad de nutrientes, y su abundancia puede reflejar el estado trófico de un cuerpo de agua. Debido a su sensibilidad a los cambios ambientales, el fitoplancton es utilizado como un bioindicador clave en estudios de calidad del agua y procesos de eutrofización (Cruz, 2018).

2.3.3. Eutrofización

La eutrofización es un proceso que ocurre cuando un cuerpo de agua recibe un exceso de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, lo que provoca un crecimiento descontrolado de algas y fitoplancton. Este fenómeno reduce la transparencia del agua, disminuye el oxígeno disuelto y altera el equilibrio ecológico, afectando la biodiversidad acuática. Es común en zonas influenciadas por actividades agrícolas, aguas residuales o erosión de suelos (Barba, 2013).

Existen valores estandarizados para evaluar el estado de eutrofización en cuerpos de agua, y estos no solo se basan en la clorofila-a, sino también en otras variables como el fósforo total, la transparencia del agua y el nitrógeno total. Sin embargo, la clorofila-a es uno de los indicadores más directos y confiables de la biomasa fitoplanctónica y, por tanto, del nivel de eutrofización.

Tabla 3*Valores límites propuestos para categorías tróficas (Barba, 2013).*

Estado Trófico	Fósforo Total anual (TP)	Clorofila-a media anual	Clorofila-a máxima anual	Profundidad media disco de Secchi	Profundidad mínima disco de Secchi
Ultraoligotrófico	$\leq 4 \mu\text{g/L}$	$\leq 1.0 \mu\text{g/L}$	$\leq 2.5 \mu\text{g/L}$	$\geq 12.0 \text{ m}$	$\geq 6.0 \text{ m}$
Oligotrófico	$\leq 10 \mu\text{g/L}$	$\leq 2.5 \mu\text{g/L}$	$\leq 8.0 \mu\text{g/L}$	$\geq 6.0 \text{ m}$	$\geq 3.0 \text{ m}$
Mesotrófico	10 – 35 $\mu\text{g/L}$	2.5 – 8 $\mu\text{g/L}$	8 – 25 $\mu\text{g/L}$	6.0 – 3.0 m	3.0 – 1.5 m
Eutrófico	35 – 100 $\mu\text{g/L}$	8 – 25 $\mu\text{g/L}$	25 – 75 $\mu\text{g/L}$	3.0 – 1.5 m	1.5 – 0.7 m
Hipereutrófico	$\geq 100 \mu\text{g/L}$	$\geq 25 \mu\text{g/L}$	$\geq 75 \mu\text{g/L}$	$\leq 1.5 \text{ m}$	$\leq 0.7 \text{ m}$

Nota: Abreviaciones utilizadas: ($\mu\text{g/L}$ = microgramos por litro) y (m = metros).

2.3.4. Índice de Clorofila (Chl Index)

El Índice de Clorofila (Chl Index) es un indicador espectral derivado de imágenes satelitales que permite estimar la concentración de clorofila-a en cuerpos de agua. Este índice se basa en la reflectancia de bandas específicas del espectro electromagnético, especialmente en el borde rojo y el infrarrojo cercano. Su uso facilita el monitoreo remoto de la calidad del agua y la detección de zonas con alta actividad biológica o posibles procesos de eutrofización (Gómez, 2025).

2.3.5. Corrección radiométrica y atmosférica

La corrección radiométrica es un proceso aplicado a las imágenes satelitales que busca ajustar las distorsiones causadas por el sensor o las condiciones de adquisición. Este procedimiento mejora la

precisión de los valores de reflectancia, asegurando que los datos representen con mayor fidelidad las características reales de la superficie terrestre o acuática (Moran, 2014).

Por otro lado, la corrección atmosférica elimina los efectos de la atmósfera, como la absorción y dispersión de la luz por partículas y gases, que pueden alterar la señal captada por el satélite. Ambas correcciones son fundamentales para garantizar la calidad y confiabilidad de los análisis espectrales, especialmente cuando se estiman parámetros biofísicos como la clorofila-a.

2.3.6. Firma espectral

La firma espectral es la respuesta única de reflectancia que tiene un objeto en diferentes longitudes de onda. Permite identificar materiales o condiciones, como la presencia de clorofila-a en cuerpos de agua, mediante sensores satelitales, facilitando su análisis sin contacto directo (Avila, 2019).

Tabla 4

Firmas espectrales de coberturas terrestres.

Cobertura	Visible (400–700 nm)	NIR (700–1300 nm)	SWIR (1300–2500 nm)
Agua clara	Muy baja reflectancia	Muy baja	Casi nula
Vegetación sana	Media (en verde)	Muy alta	Baja
Suelo seco	Media	Media	Media-alta
Asfalto	Baja	Baja	Baja
Concreto	Alta	Alta	Alta

Nota: Abreviaciones utilizadas: (nm = nanómetro), (NIR = infrarrojo cercano) y (SWIR = Infrarrojo de Onda Corta).

2.3.7. Bandas espectrales de Sentinel-2

Las bandas espectrales del satélite Sentinel-2 (misiones Sentinel-2A y 2B del programa Copernicus de la ESA) están diseñadas para aplicaciones en monitorización ambiental, agricultura, agua, suelos, vegetación, y más. Sentinel-2 cuenta con 13 bandas espectrales en el visible, infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR), con diferentes resoluciones espaciales.

Tabla 5

Bandas espectrales del satélite Sentinel-2

Banda	Nombre	Longitud de onda (nm)	Ancho de banda (nm)	Resolución (m)	Uso principal
B1	Coastal aerosol	443	20	60	Corrección atmosférica, aerosol marino
B2	Azul (Blue)	490	65	10	Observación de cuerpos de agua, vegetación, batimetría
B3	Verde (Green)	560	35	10	Vegetación, agua, visibilidad general
B4	Rojo (Red)	665	30	10	Índices de vegetación (como NDVI), suelos, clorofila
B5	Red Edge 1	705	15	20	Análisis de salud vegetal, vegetación acuática
B6	Red Edge 2	740	15	20	Monitoreo de cultivos, clorofila
B7	Red Edge 3	783	20	20	Monitoreo detallado de vegetación
B8	Infrarrojo cercano (NIR)	842	115	10	NDVI, vigor de la vegetación

B8A	Red Edge 4 (NIR narrow)	865	20	20	Detalles de vegetación, sensibilidad a estrés vegetal
B9	Infrarrojo de absorción de agua	945	20	60	Detección de vapor de agua
B10	Cirros (SWIR)	1375	30	60	Detección de nubes cirros (alta atmósfera)
B11	SWIR 1	1610	90	20	Contenido de humedad, suelos, vegetación seca
B12	SWIR 2	2190	180	20	Detección de biomasa, quemadas, geología

Nota: Abreviaciones utilizadas: (nm = nanómetro), (NIR = infrarrojo cercano), (SWIR = Infrarrojo de Onda Corta) y (red edge = borde rojo).

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y nivel de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, ya que tiene como finalidad resolver un problema práctico relacionado con la calidad del agua en las lagunas Chacaqocha y Yanacocha, ubicadas en Huanta, Ayacucho. A través del uso de imágenes satelitales del programa Copernicus (Sentinel-2) y la estimación de clorofila-a mediante el índice Chlorophyll Index (Chl Index), se busca generar información útil para la gestión ambiental y la toma de decisiones sobre el manejo sostenible de estos ecosistemas. Al tratarse de una problemática real que afecta la biodiversidad y el equilibrio ecológico de las lagunas, se plantea una solución basada en herramientas tecnológicas modernas, por lo que corresponde al enfoque de investigación aplicada.

El nivel de investigación es descriptivo, ya que el estudio se enfoca en caracterizar el comportamiento espacial y temporal de la clorofila-a durante el periodo 2017-2025. No se pretende establecer relaciones de causalidad entre variables, sino describir la concentración superficial de clorofila-a a partir de firmas espectrales corregidas radiométrica y atmosféricamente. El diseño de investigación es no experimental y longitudinal, porque no se manipulan las variables, sino que se observan los fenómenos tal como se presentan en la naturaleza. Además, el estudio abarca varios años, lo que permite analizar la evolución de la clorofila-a en el tiempo mediante mapas temáticos comparativos y un gráfico de líneas con el promedio anual, brindando una visión clara de los cambios en la calidad del agua en las lagunas estudiadas.

3.2. Ámbito temporal y espacial

3.2.1. Ámbito temporal

El ámbito temporal de la presente investigación abarca el periodo comprendido entre los años 2017 al 2025, con el objetivo de evaluar la variabilidad anual de la concentración superficial de clorofila-a en las lagunas seleccionadas. Esta secuencia temporal permitirá identificar

tendencias a lo largo del tiempo y detectar posibles alteraciones en la calidad del agua asociadas a procesos de eutrofización, considerando el contexto ambiental de los ecosistemas altoandinos.

3.2.2. Ámbito espacial

El ámbito espacial del estudio se centra en las lagunas Chacaqocha y Yanacocha, ubicadas en la provincia de Huanta, región Ayacucho, Perú. Estas lagunas forman parte de un sistema natural altoandino vulnerable y han sido seleccionadas por su relevancia ecológica, así como por su exposición a fuentes de nutrientes provenientes de la actividad agrícola y la erosión de suelos. Dicha condición las convierte en cuerpos de agua prioritarios para su monitoreo mediante herramientas de teledetección.

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

La población de estudio está conformada por la red de lagunas del sistema Razuhuilca, ubicada en la provincia de Huanta, región Ayacucho, la cual cumple un rol importante en la regulación hídrica, conservación de la biodiversidad y provisión de servicios ecosistémicos en la zona altoandina. Este sistema de lagunas se encuentra expuesto a procesos naturales y antrópicos que pueden afectar su calidad ambiental.

3.3.2. Muestra

La muestra está constituida por las lagunas Chacaqocha y Yanacocha, seleccionadas debido a su accesibilidad, relevancia ecológica y la disponibilidad de datos satelitales representativos. Estas lagunas presentan condiciones particulares que las hacen adecuadas para evaluar los cambios en la concentración de clorofila-a durante el periodo 2017-2025, mediante el análisis de imágenes Sentinel-2 y la aplicación del índice espectral Chlorophyll Index

(Chl Index).

Tabla 6

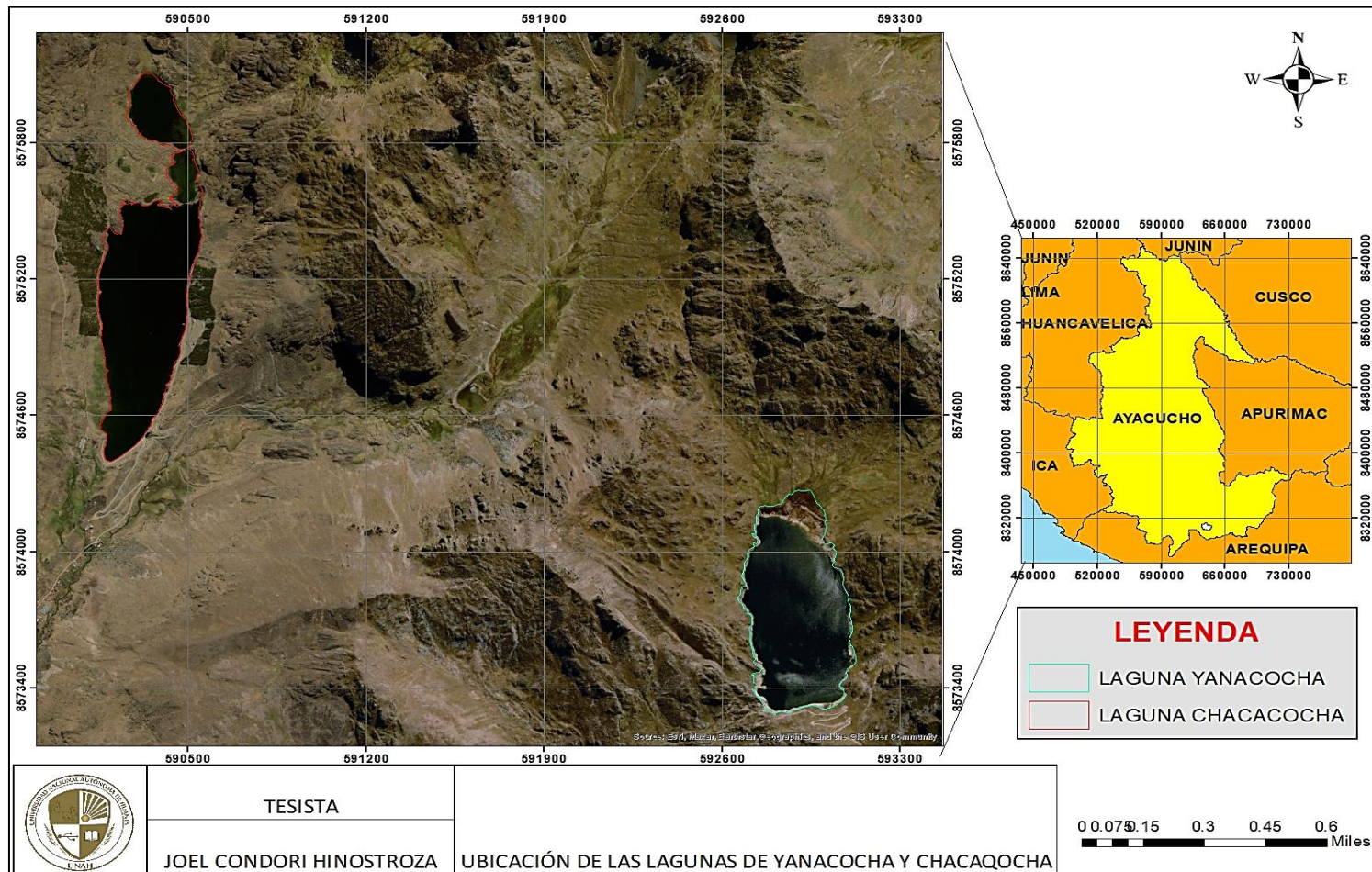
Coordenadas de la Laguna Chacacocha y Yanacocha (UTM)

Lagunas	Coordenadas		ALTITUD
	Este	Norte	
Chacacocha	590323.77 m	8574938.51 m	4075 m
Yanacocha	592887.68 m	8573722.41 m	4204 m

Nota: Elaboración propia

Figura 1

Mapa de ubicación de las lagunas Chacaqocha y Yanacochoa



Nota: Elaboración propia.

3.4. Instrumentos

Los instrumentos utilizados en esta investigación corresponden a las fuentes y métodos de obtención de datos. Se utilizarán imágenes satelitales Sentinel-2, descargadas desde la plataforma Copernicus Open Access Hub, como fuente primaria para la estimación de la clorofila-a en las lagunas Chacaqocha y Yanacocha. Para ello, se aplicará el índice Chlorophyll Index (Chl Index), el cual permite estimar la concentración de clorofila-a a partir de las bandas específicas del sensor MSI del satélite Sentinel-2.

3.5. Procedimientos

3.5.1. Descarga de imágenes satelitales

La obtención de imágenes satelitales se llevará a cabo a través de la plataforma oficial Copernicus Open Access Hub (<https://acortar.link/68ZjVs>), la cual proporciona acceso gratuito a los datos del programa Sentinel, gestionado por la Agencia Espacial Europea (ESA). Se seleccionarán imágenes del satélite Sentinel-2, que cuenta con el sensor MSI (Multispectral Instrument), el cual registra información en 13 bandas espectrales, ideales para estudios ambientales relacionados con cuerpos de agua. El área de interés corresponde a las lagunas Chacaqocha y Yanacocha, ubicadas en el sistema hidrológico Razuhuilla, provincia de Huanta, región Ayacucho.

Para la descarga, se aplicarán los siguientes criterios de selección: fechas específicas correspondientes a los años 2017 al 2025, una cobertura geográfica que incluya completamente las lagunas estudiadas, y un porcentaje de nubosidad inferior al 5%, con el fin de asegurar imágenes claras y utilizables. En nivel de procesamiento fue L1C (Top of Atmosphere). Una vez descargadas, las imágenes serán almacenadas y organizadas por fecha y código de escena, para su posterior procesamiento en el software ENVI 5.6, donde se

aplicarán las correcciones necesarias y se prepararán los datos para el análisis espectral de clorofila-a.

3.5.2. Correcciones radiométricas y atmosféricas en ENVI 5.6.

Una vez descargadas las imágenes Sentinel-2, se realizará su procesamiento en el software ENVI 5.6 para asegurar la calidad espectral de los datos. En primer lugar, se aplicará el comando “Radiometric Calibration”, que permite realizar la corrección radiométrica, transformando los valores digitales (DN) en radiancia aparente, tomando en cuenta las propiedades del sensor MSI del satélite Sentinel-2.

Posteriormente, se empleará el comando “Resize Data” para resamplear las bandas de 20 m y 60 m a una resolución de 10 m, asegurando la compatibilidad espacial entre todas las bandas espectrales. Luego, se utilizará el comando “Build Layer Stack” para combinar las 13 bandas multiespectrales en una sola imagen compuesta multibanda. Finalmente, se aplicará el comando “FLAASH Atmospheric Correction”, que realiza la corrección atmosférica mediante un modelo físico que elimina los efectos de la atmósfera, obteniendo así valores de reflectancia superficial (Bottom of Atmosphere - BOA). Este flujo de trabajo es esencial para garantizar que los datos procesados sean precisos y representativos de las condiciones reales de la superficie de las lagunas.

3.5.3. Unión de bandas espectrales

Para la unión de las bandas espectrales en ENVI 5.6, se utilizará el comando “Band Math”, el cual permite combinar múltiples bandas en una sola imagen compuesta multibanda. Este proceso es fundamental para realizar análisis espectrales de forma integrada. A

continuación, se detallará la fórmula empleada y la selección de las bandas específicas utilizadas para la estimación de la clorofila-a mediante el índice espectral correspondiente.

Índice Chlorophyll Index (Chl Index)

Kowe et al, (2023), menciona que es un indicador espectral utilizado para estimar la concentración de clorofila-a en cuerpos de agua, permitiendo evaluar el grado de eutrofización y la biomasa fitoplanctónica en ecosistemas acuáticos. Se basa en la relación entre la reflectancia en las bandas del rojo y del borde rojo, aprovechando la sensibilidad de estas longitudes de onda a la absorción de la clorofila. Este índice es especialmente útil en estudios de teledetección, ya que facilita el monitoreo remoto de la calidad del agua sin necesidad de mediciones in situ. Su aplicación con imágenes de Sentinel-2 permite analizar la variabilidad espacio-temporal de la clorofila-a con alta resolución.

La fórmula del Índice Chlorophyll Index (Chl Index) se expresa de la siguiente manera:

Tabla 7

Formula del Índice Chlorophyll Index (Chl Index)

Índice	Formula	Descripción
Chlorophyll Index (Chl Index)	$ChlIndex = \frac{B5}{B4} - 1$	Donde:
		<ul style="list-style-type: none"> • B5: Reflectancia en la banda del borde rojo (705 nm, Sentinel-2) • B4: Reflectancia en la banda del rojo (665 nm, Sentinel-2)

Nota: Abreviaciones utilizadas: (nm = nanómetro).

3.5.4. Generación de mapas en ArcGIS

Para la generación de los mapas temáticos en ArcGIS, fue necesario recortar el archivo ráster procesado, delimitando el área de estudio

en función del shapefile previamente creado. Este procedimiento se realizó utilizando el comando Clip ubicado en la ruta: Data Management Tools > Raster Processing > Clip, lo cual permitió aislar únicamente la zona correspondiente a las lagunas Chacaqocha y Yanacocha.

Posteriormente, para obtener los valores promedio de clorofila-a dentro de cada laguna, se empleó el comando Zonal Statistics as Table, accesible desde Spatial Analyst Tools > Zonal > Zonal Statistics as Table. Esta herramienta permitió calcular estadísticas descriptivas, como el valor medio de los píxeles contenidos dentro de cada polígono (zona), generando una tabla asociada para su posterior análisis e interpretación.

3.6. Análisis de datos

Se desarrollo el procesamiento de las imágenes satelitales Sentinel-2 correspondientes a los años 2017 al 2025, iniciando con la adquisición de dichas escenas desde la plataforma del programa Copernicus, asegurando que las imágenes seleccionadas presentaran baja cobertura nubosa y adecuada visibilidad de la superficie acuática. Luego, se procedió a realizar la corrección radiométrica en el software ENVI 5.6 con el objetivo de minimizar los errores inherentes al sensor y garantizar una adecuada calibración de los valores digitales de las bandas espectrales . Posteriormente, se ejecutó el resampleo de las bandas con resoluciones espaciales de 20 m y 60 m a una resolución común de 10 m, permitiendo una integración uniforme y precisa en el análisis multiespectral. Esta operación fue seguida por la fusión de las bandas resampleadas en ENVI 5.6, generando una sola imagen multibanda que consolidó toda la información espectral necesaria.

A continuación, se aplicó la corrección atmosférica, también en ENVI 5.6, con la finalidad de eliminar los efectos de la atmósfera, tales como la dispersión, absorción y la presencia de nubosidad residual, mejorando significativamente la calidad espectral de las imágenes (Anexo 6). Una vez corregidas las imágenes, se procedió

con la combinación de las bandas espectrales requeridas para el cálculo del Índice de Clorofila (Chlorophyll Index – Chl Index), utilizando las bandas B5 (705 nm) y B4 (665 nm), lo cual permitió generar un insumo clave para la estimación de la clorofila-a superficial. Posteriormente, se elaboró el ráster de clorofila-a mediante la fórmula correspondiente en ENVI 5.6, obteniendo una representación espacial continua de la concentración de este pigmento fotosintético. Este ráster fue exportado a la plataforma ArcGIS, donde se efectuó el recorte espacial preciso de las áreas correspondientes a las lagunas Chacaqocha y Yanacocha, permitiendo un enfoque localizado y específico del análisis.

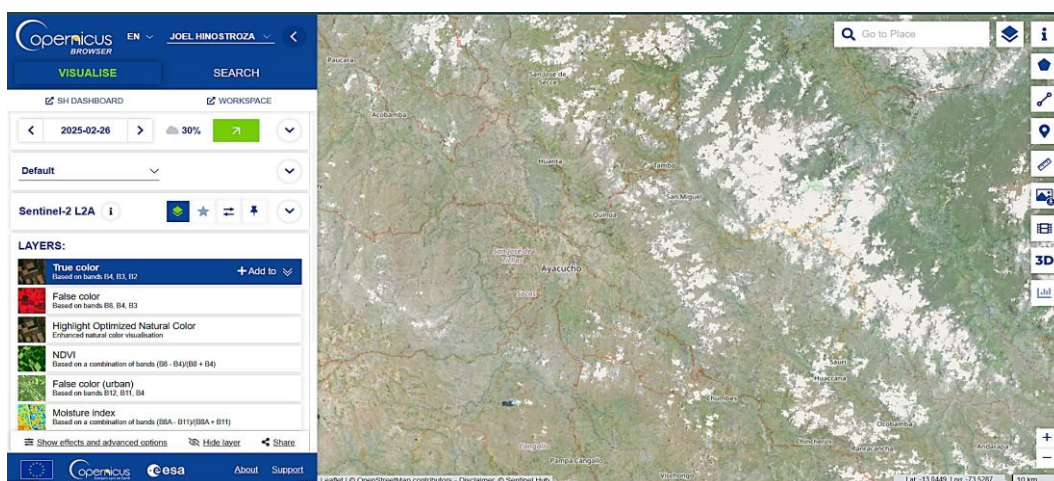
Finalmente, en ArcGIS se determinaron los valores promedio de concentración de clorofila-a en cada una de las lagunas para los años analizados, constituyendo una base sólida para la evaluación espacio-temporal de este parámetro y su interpretación ecológica.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Adquirir y procesar imágenes satelitales Sentinel-2 para determinar la presencia de clorofila-a en las lagunas de Chacacochoa y Yanacocha del 2017 al 2025.

Figura 2

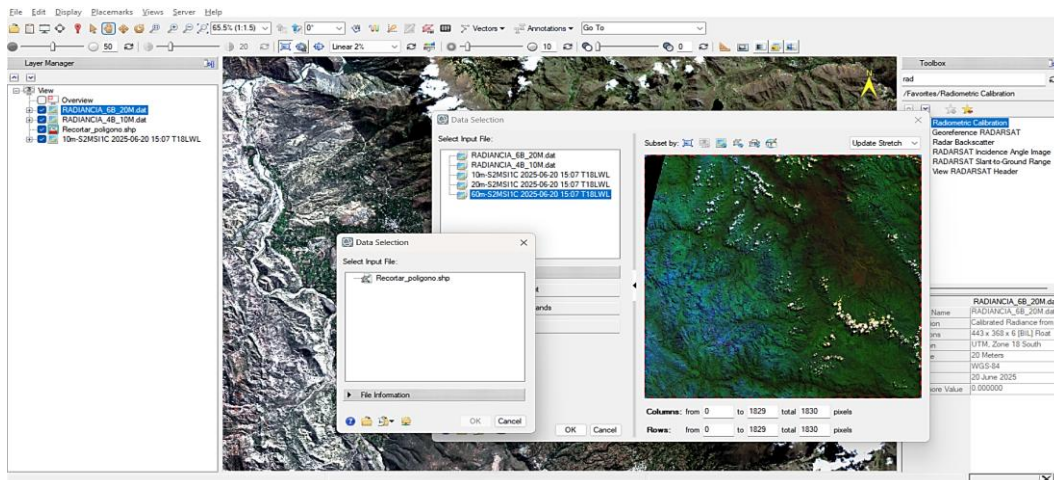
Adquisición de imágenes satelitales de Copernicus



Se obtuvo las descargas de las imágenes para los periodos del 2017 – 2025, con los criterios de baja cobertura nubosa y adecuada visibilidad de la superficie acuática.

Figura 3

Corrección radiométrica de imágenes satelitales sentinel -2 en ENVI 5.6.

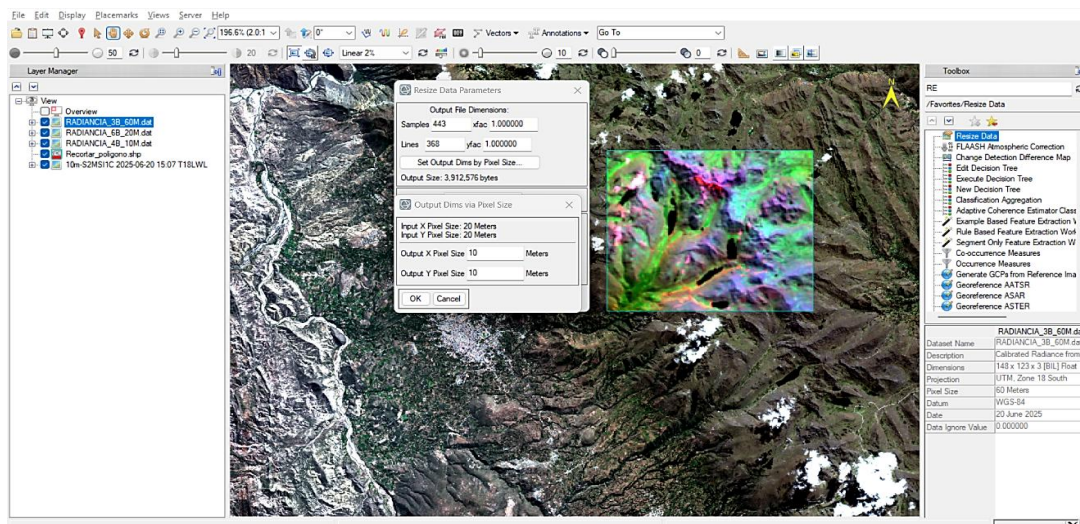


Se corrigió el imagen radiométricamente en el software ENVI 5.6 con el objetivo de minimizar los errores inherentes al sensor y garantizar una adecuada

calibración de los valores digitales de las bandas espectrales

Figura 4

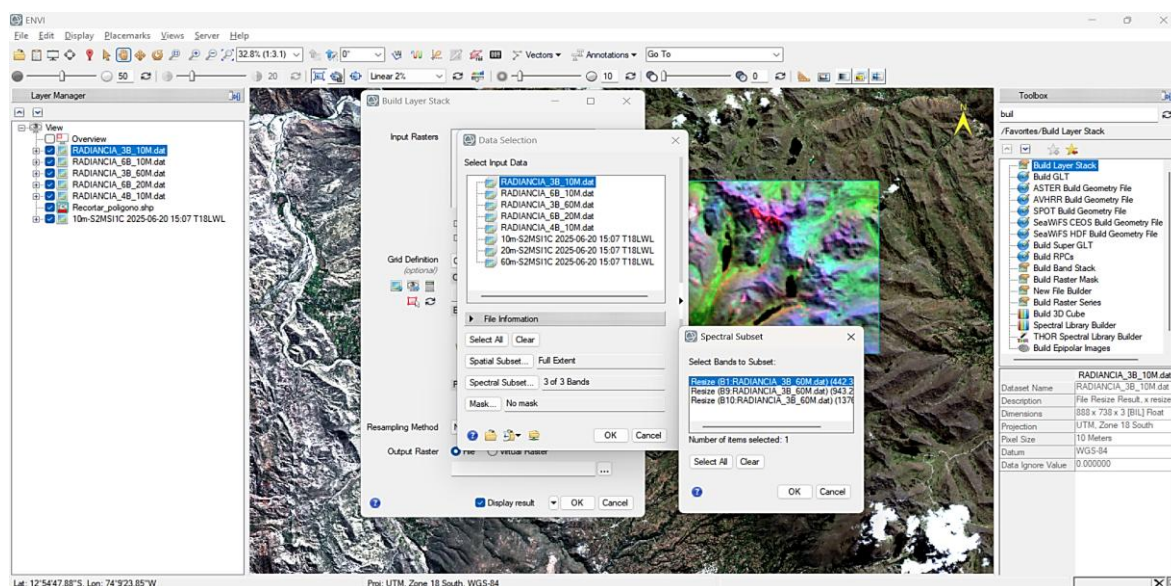
Resample a 10 m de resolución en ENVI 5.6.



Se ejecutó el resamplado de las bandas con resoluciones espaciales de 20 m y 60 m a una resolución común de 10 m, permitiendo una integración uniforme y precisa en el análisis multiespectral.

Figura 5

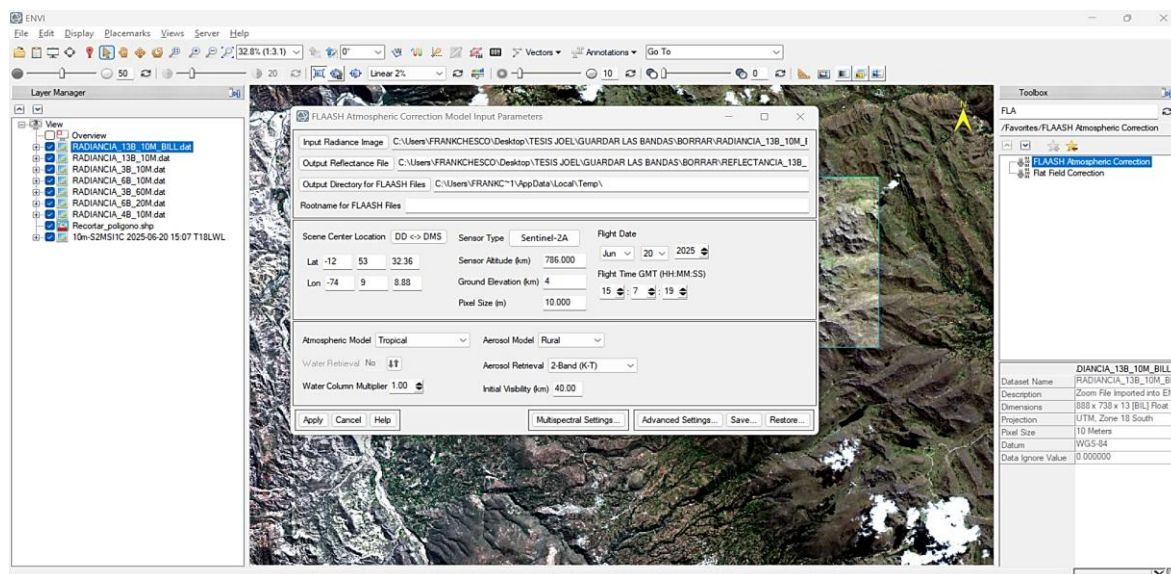
Unión de las 13 bandas espectrales en ENVI 5.6.



Aplicando el comando *resize data* se pudo realizar la fusión de las bandas resampladas en ENVI 5.6, generando una sola imagen multibanda que consolidó toda la información espectral necesaria

Figura 6

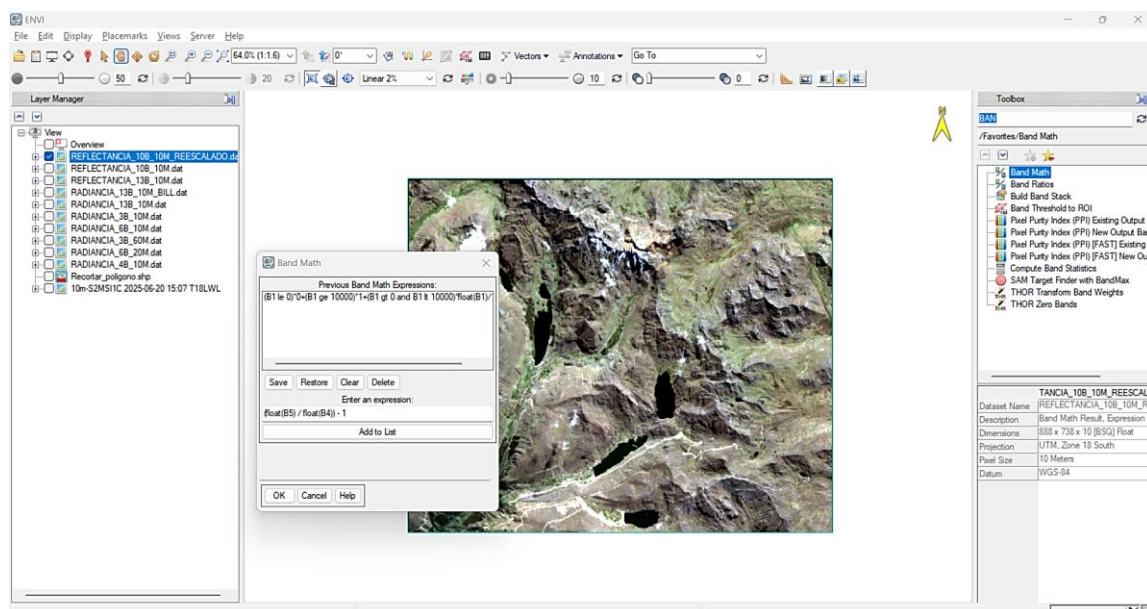
Corrección atmosférica de imágenes satelitales sentinel -2 en ENVI 5.6.



Se aplicó la corrección atmosférica mediante el comando *FLAASH atmospheric correction*, también en ENVI 5.6, con la finalidad de eliminar los efectos de la atmósfera, mejorando significativamente la calidad espectral de las imágenes

Figura 7

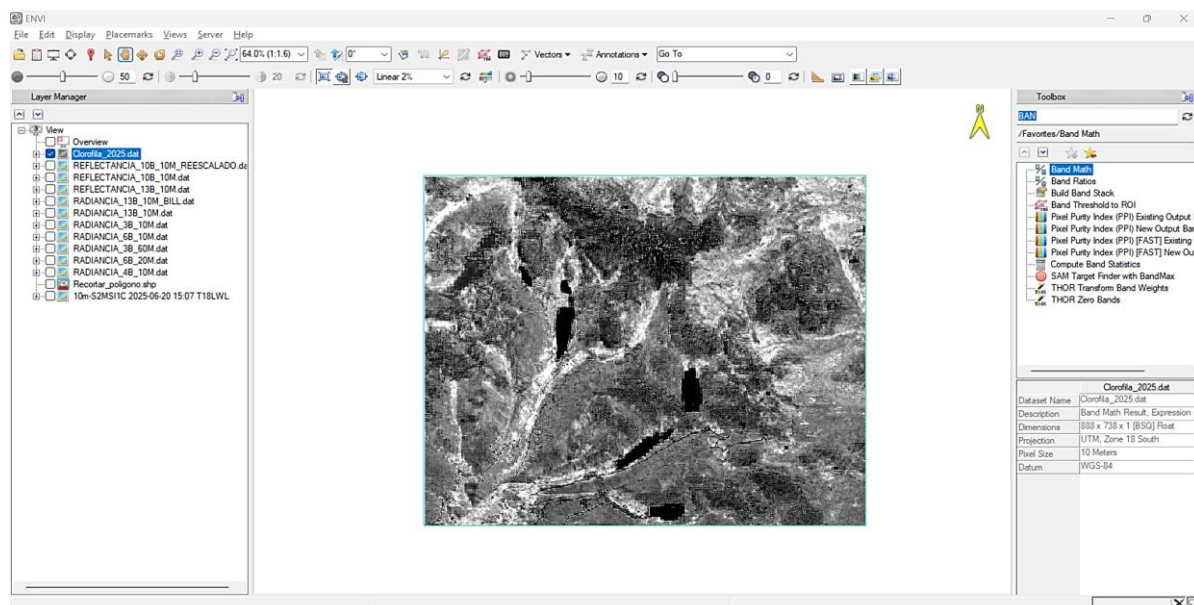
Unión de bandas para el Índice Chlorophyll Index (Chl Index) en ENVI 5.6.



Al unir las bandas espectrales se pudo aplicar el Índice de Clorofila (Chlorophyll Index – Chl Index), utilizando las bandas B5 (705 nm) y B4 (665 nm), lo cual permitió generar un insumo clave para la estimación de la clorofila-a superficial mediante los píxeles espectrales.

Figura 8

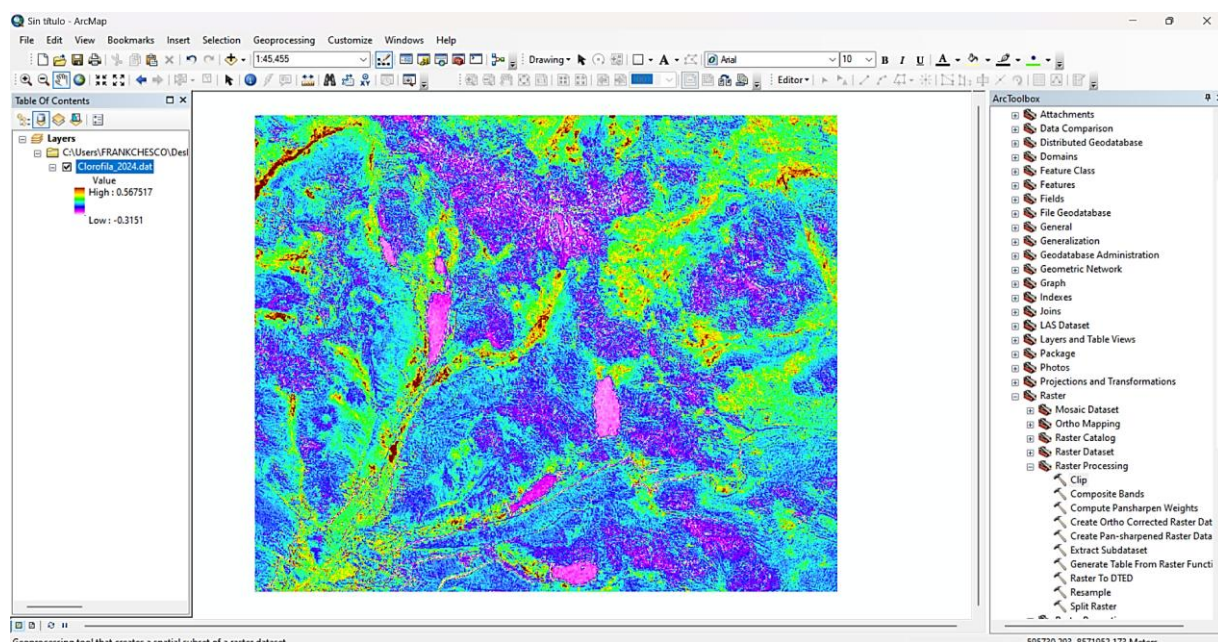
Generacion del ráster de clorofila-a en ENVI 5.6.



Se elaboró el ráster de clorofila-a utilizando el indice de clorofila correspondiente en ENVI 5.6, obteniendo una representación espacial continua de la concentración de este pigmento fotosintético

Figura 9

Recorte de las lagunas en ArcGIS



Este ráster fue exportado a la plataforma ArcGIS, donde se efectuó el recorte espacial preciso de las áreas correspondientes a las lagunas Chacaqocha y

Yanacocha, permitiendo un enfoque localizado y específico del análisis.

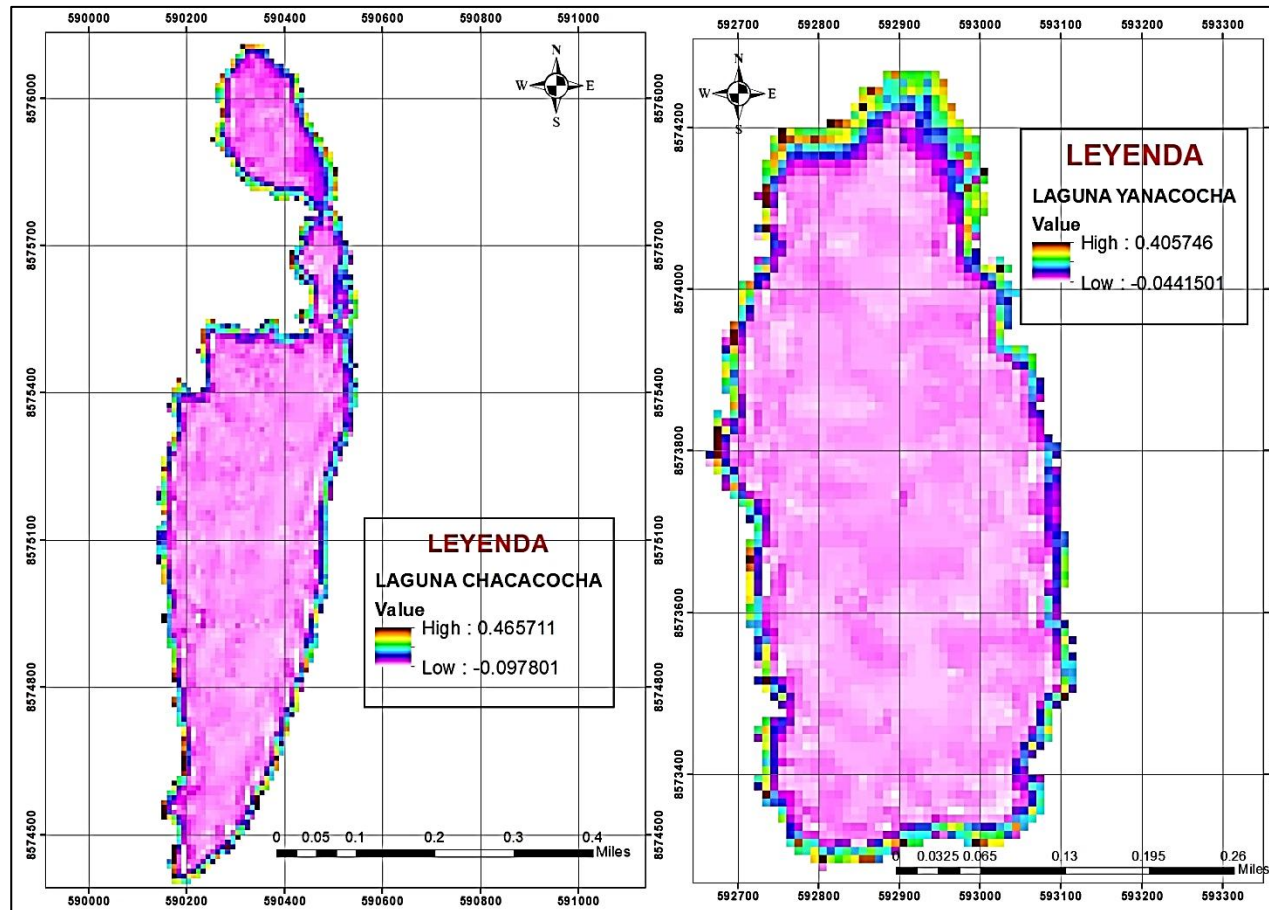
4.2. Generación de mapas temáticos de la distribución de la clorofila-a, mediante firmas espectrales en las lagunas de Chacacocha y Yanacocha para los años 2017 al 2025.

Se generaron mapas temáticos para los años 2017 al 2025 utilizando el Índice Chlorophyll Index (Chl Index), obtenido a partir de firmas espectrales de las imágenes Sentinel-2, con el objetivo de identificar la distribución espacial y temporal de la clorofila-a en las lagunas Chacacocha y Yanacocha del sistema de Razuhuilca. Este índice permitió detectar con precisión las zonas con mayores concentraciones de clorofila-a, asociadas a procesos de eutrofización por el ingreso de nutrientes orgánicos asociados a las escorrentías provenientes de las partes altas de las lagunas.

Los mapas elaborados muestran patrones de acumulación y cambios temporales en la concentración de clorofila-a, siendo útiles para el diagnóstico ambiental y la planificación de acciones de monitoreo y conservación. A continuación, se presentan los mapas temáticos correspondientes al periodo 2017–2025.

Figura 10

Mapa temático de la concentración de clorofila-a en las lagunas Chacacocha y Yanacocha correspondiente al año 2017.



Nota: Abreviaciones utilizadas: (High = Alta), (Low = Baja) y (Value = Valor).

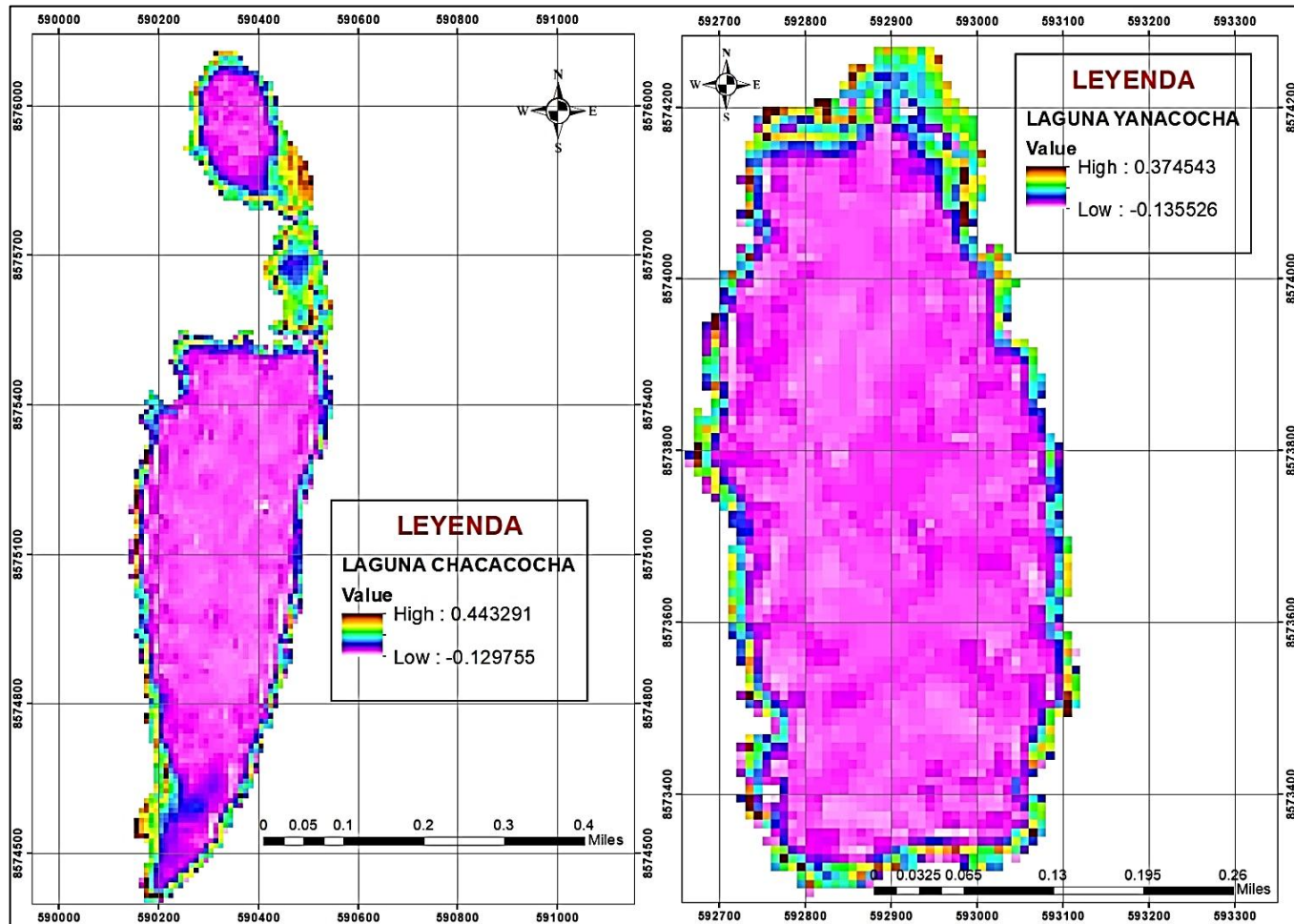
De acuerdo a la figura 10, en la laguna Chacacocha, para el año 2017 la concentración de clorofila-a varió entre -0.097801 y 0.465711, con las zonas de mayor intensidad ubicadas principalmente en los bordes de la zona norte. Estas concentraciones elevadas en las zonas periféricas están relacionadas con la entrada de nutrientes provenientes de fuentes externas, como escorrentías o actividad humana cercana. El centro de la laguna muestra valores más bajos, lo que puede deberse a una menor presencia de fitoplancton o a la mayor profundidad del cuerpo de agua. Este patrón sugiere que Chacacocha puede estar experimentando un proceso de eutrofización en ciertas áreas, lo que debe ser monitoreado para prevenir un deterioro ecológico mayor.

En la laguna Yanacocha, los valores de clorofila-a oscilan entre -0.0441501 y 0.405746, presentando un comportamiento similar al de Chacacocha, con mayores concentraciones en los bordes y valores más bajos hacia el centro. Destaca especialmente la zona norte de la laguna, donde se observa un área con valores elevados de clorofila-a, lo cual puede interpretarse por la coloración más intensa en el mapa, lo que indica una mayor actividad biológica en esa región. Este incremento está vinculado a un ingreso de nutrientes por corrientes superficiales o acumulación de materia orgánica. Aunque en general Yanacocha presenta una menor concentración máxima que Chacacocha, esta zona específica del norte requiere atención, ya que podría representar el inicio de un proceso de enriquecimiento trófico localizado.

Por otro lado, Mérgan (2018), identificaron en la laguna de Ayapel dos patrones de variación en la concentración de clorofila-a: el primero corresponde a una distribución norte-sur, con mayores concentraciones en la zona sur durante los periodos de aguas bajas; la segunda muestra un gradiente desde el litoral hacia la zona limnética, donde se observaron concentraciones más elevadas en el interior de la laguna durante los periodos de aguas altas.

Figura 11

Mapa temático de la concentración de clorofila-a en las lagunas Chacacocha y Yanacocha correspondiente al año 2018



Nota: Abreviaciones utilizadas: (High = Alta), (Low = Baja) y (Value = Valor).

De acuerdo a la Figura 11, que muestra el mapa temático de la concentración de clorofila-a en las lagunas Chacacocha y Yanacocha durante el año 2018, se observan patrones espaciales similares a los del año anterior, aunque con algunas diferencias significativas en la distribución y magnitud de los valores.

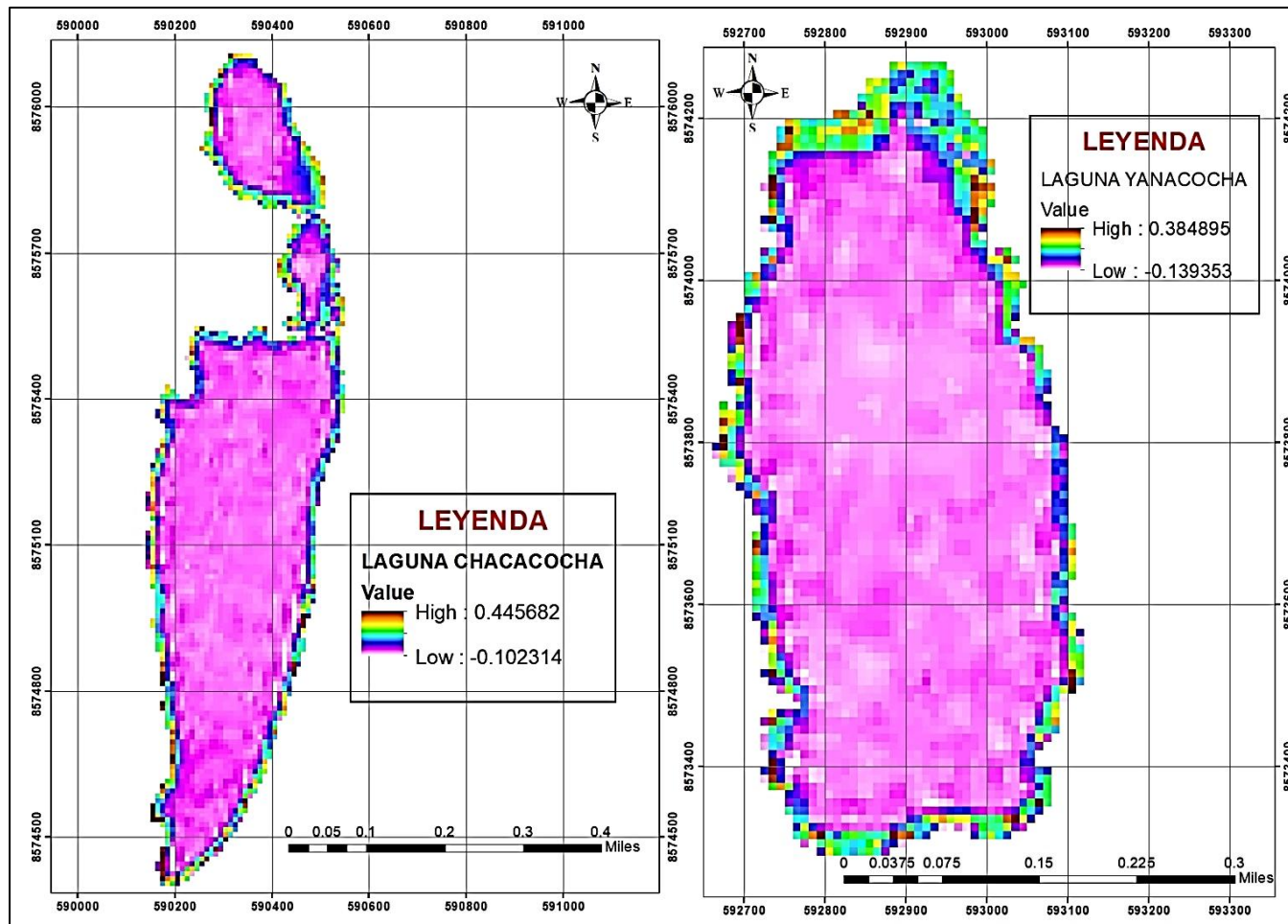
En la laguna Chacacocha, los valores de clorofila-a varían entre -0.129755 y 0.443291, presentando nuevamente las concentraciones más altas en las zonas periféricas, especialmente marcadas en la zona norte y en el extremo sur. La coloración más intensa en estos sectores indica una mayor actividad fitoplanctónica, posiblemente asociada al ingreso de nutrientes desde las microcuencas adyacentes. Comparado con el año 2017, se evidencia una mayor expansión de las áreas con alta concentración en la zona norte, lo que puede reflejar un aumento en el nivel de eutrofización. El centro de la laguna, por su parte, continúa mostrando valores bajos, lo que mantiene la hipótesis de que la profundidad o la dinámica del agua influyen en la distribución de la clorofila-a. Este comportamiento resalta la necesidad de implementar acciones de control y seguimiento ambiental en los sectores más críticos.

En la laguna Yanacocha, los valores oscilan entre -0.135526 y 0.374543, con una distribución que mantiene el patrón de concentraciones altas en los bordes y bajas en el centro. Sin embargo, en comparación con el año anterior, se nota una leve reducción en los valores máximos y una dispersión más uniforme de las zonas intensas, lo cual podría interpretarse como una ligera mejora en el equilibrio trófico del ecosistema. Aun así, se observa nuevamente una zona de alta concentración en el norte de la laguna, destacada por tonalidades más intensas, lo que sugiere persistencia de condiciones favorables para el desarrollo de fitoplancton en ese sector. Este foco sigue siendo relevante para el monitoreo, ya que podría representar una entrada continua de nutrientes o condiciones físicas particulares que favorecen la productividad biológica.

Delgado y Marín (2021) identificaron altas concentraciones de clorofila-a ($>5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) en el Golfo de Ancud, boca del Guafo, sur del Golfo Corcovado y Canal Moraleda. De forma similar, en la presente investigación se registraron valores elevados en las lagunas Yanacocha y Chacacocha, especialmente en sus zonas perimétricas.

Figura 12

Mapa temático de la concentración de clorofila-a en las lagunas Chacacocha y Yanacocha correspondiente al año 2019



Nota: Abreviaciones utilizadas: (High = Alta), (Low = Baja) y (Value = Valor).

Según la Figura 12, que presenta la distribución de clorofila-a en las lagunas Chacacocha y Yanacocha durante el año 2019, se evidencian patrones de concentración que reflejan procesos ecológicos importantes relacionados con la productividad y la posible influencia de factores externos.

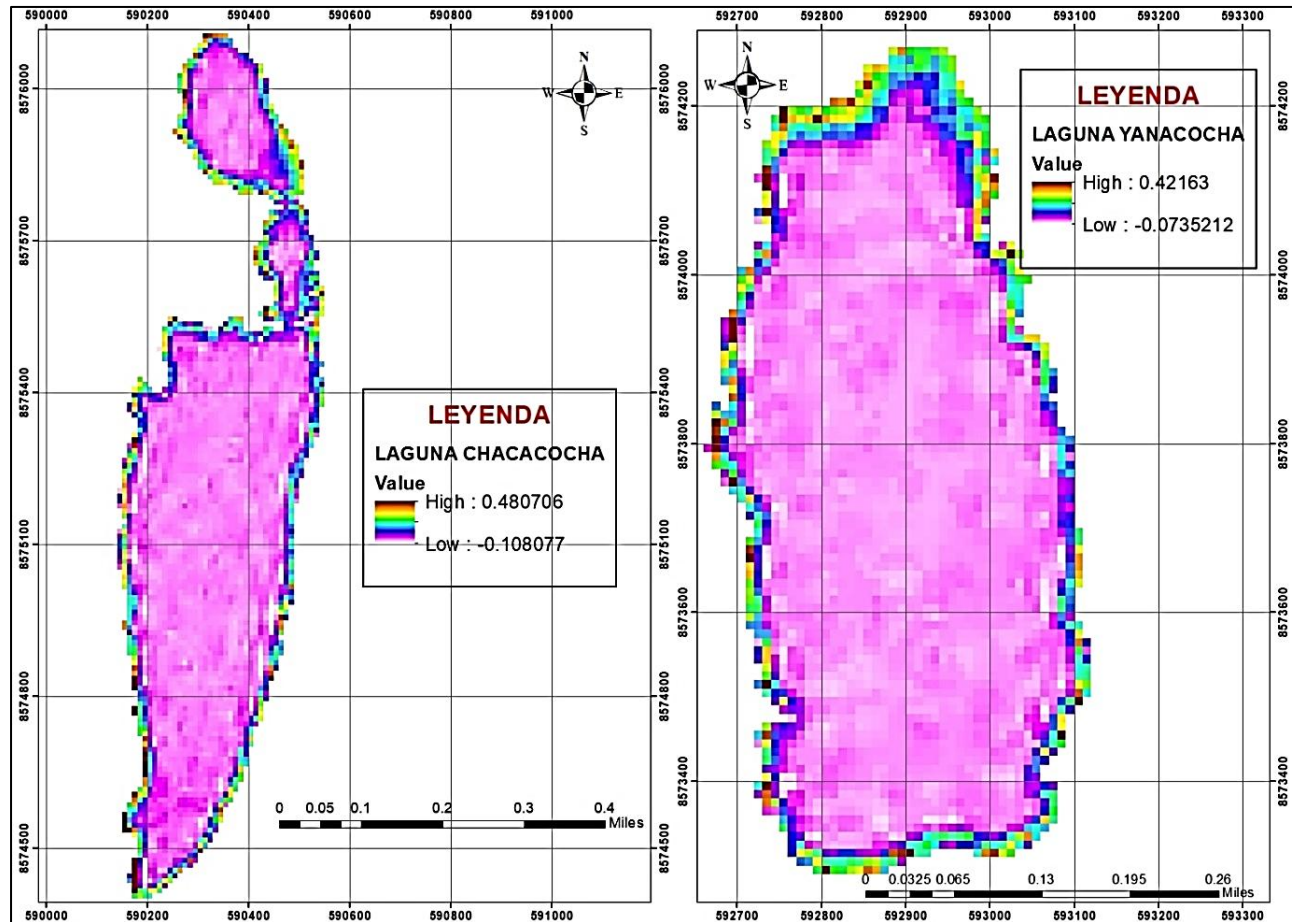
En la laguna Chacacocha, los niveles de clorofila-a se ubican entre -0.102314 y 0.445682, con valores más elevados registrados principalmente en las áreas periféricas, en especial en los extremos norte y sur. Esta concentración en los bordes podría responder a zonas de mayor acumulación de nutrientes, ya sea por arrastre de sedimentos, descargas cercanas o por la propia morfología de la laguna que favorece el estancamiento en ciertos puntos. A diferencia del centro, que presenta valores más atenuados, los bordes actúan como zonas críticas que podrían estar experimentando una mayor actividad de organismos fotosintéticos. Si bien el valor máximo es semejante al de años anteriores, la persistencia de estos puntos de alta concentración sugiere la necesidad de tomar medidas preventivas para evitar un deterioro progresivo del ecosistema.

En el caso de la laguna Yanacocha, los valores de clorofila-a van desde -0.139353 hasta 0.384895, con una distribución relativamente homogénea, aunque se distinguen algunos sectores del norte y sur con mayor intensidad. Esta distribución sugiere que, si bien la laguna mantiene un equilibrio general, existen zonas donde podrían estarse acumulando nutrientes, posiblemente por entrada de aguas superficiales o por características físicas del terreno. En comparación con años previos, no se observan aumentos significativos en las concentraciones máximas, lo que podría interpretarse como una estabilidad relativa en el sistema, aunque con focos puntuales de mayor productividad. Por ello, resulta importante continuar con el monitoreo para anticipar cualquier cambio en la dinámica del ecosistema

Por otro lado (Quispe et al., 2010), en su estudio registró concentraciones de clorofila-a entre <1 y >50 $\mu\text{g/L}$, con promedios de 5 a 20 $\mu\text{g/L}$. Las mayores concentraciones se observaron en zonas costeras como Chimbote, Pisco e Ilo. Asimismo, en esta investigación también se obtuvieron los valores más elevados en las zonas periféricas de las lagunas de Yanacocha y Chacacocha.

Figura 13

Mapa temático de la concentración de clorofila-a en las lagunas Chacacocha y Yanacocha correspondiente al año 2020



Nota: Abreviaciones utilizadas: (High = Alta), (Low = Baja) y (Value = Valor).

En la Figura 13 se presenta la distribución espacial de la concentración de clorofila-a en las lagunas Chacacocha (izquierda) y Yanacocha (derecha), procesada a partir de imágenes satelitales Sentinel-2. Los valores están expresados en unidades relativas del índice espectral aplicado, representando una estimación de la biomasa fitoplanctónica en superficie.

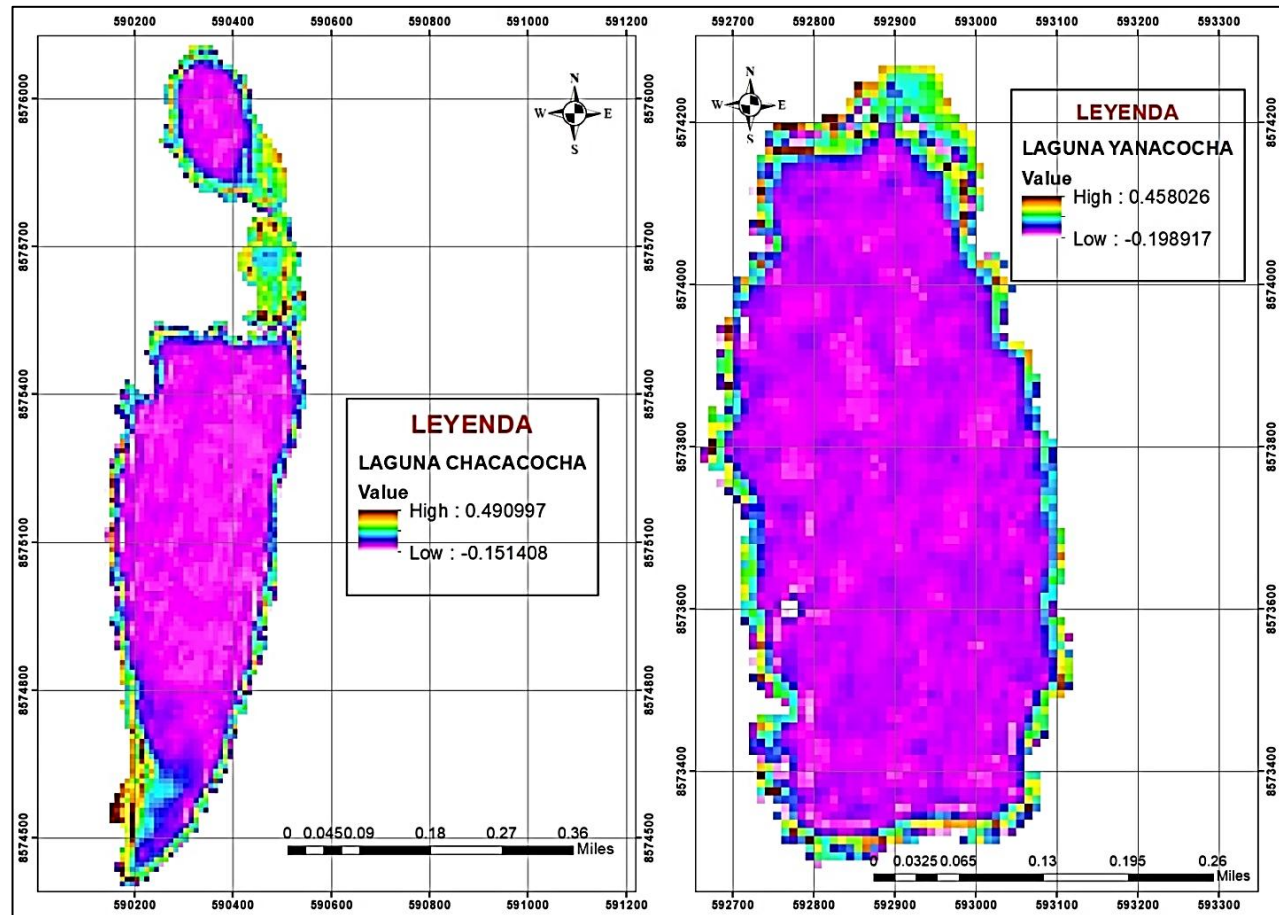
Para la laguna Chacacocha, los valores de clorofila-a oscilaron entre -0.108077 y 0.480706, observándose una mayor concentración en la parte norte de la laguna, donde predominan tonalidades magenta intenso que indican una alta actividad fotosintética y acumulación de biomasa fitoplanctónica. Además, se identifican zonas de color azul en sectores periféricos, lo cual sugiere presencia de altas concentraciones de clorofila-a en bordes específicos, posiblemente influenciadas por aportes externos puntuales o menor circulación del agua. Esta distribución puede deberse a factores físicos como la topografía del fondo, la incidencia solar, la velocidad del viento y la disponibilidad localizada de nutrientes que favorecen la proliferación de microalgas.

En el caso de la laguna Yanacocha, los valores oscilaron entre -0.0735212 y 0.42163, evidenciándose que la mayor concentración también se encuentra en la parte norte del cuerpo de agua, donde se visualizan distintas tonalidades, incluyendo magenta, rosa y azul; que revelan una notable variabilidad espacial. Estas concentraciones elevadas podrían estar asociadas al ingreso de nutrientes desde afluentes o drenajes superficiales. Las zonas centrales y del sur presentan valores más bajos y homogéneos, lo que podría indicar un menor grado de eutrofización o un mayor proceso de mezcla hídrica.

En la investigación de Yang et al. (2025) se concluyó que la calidad del agua en nueve lagos varió de oligotrófica a eutrófica, registrándose altas concentraciones de clorofila-a en Nowlans, Placides y Hourglass por aportes de nutrientes de origen humano. Cinco lagos presentaron condiciones mesotróficas y uno (Vaughan) se mantuvo en estado oligotrófico. Estos resultados se relacionan con la presente tesis, donde también se evidencia un incremento en las concentraciones de clorofila-a que podrían modificar el estado trófico del ecosistema.

Figura 14

Mapa temático de la concentración de clorofila-a en las lagunas Chacacocha y Yanacocha correspondiente al año 2021



Nota: Abreviaciones utilizadas: (High = Alta), (Low = Baja) y (Value = Valor).

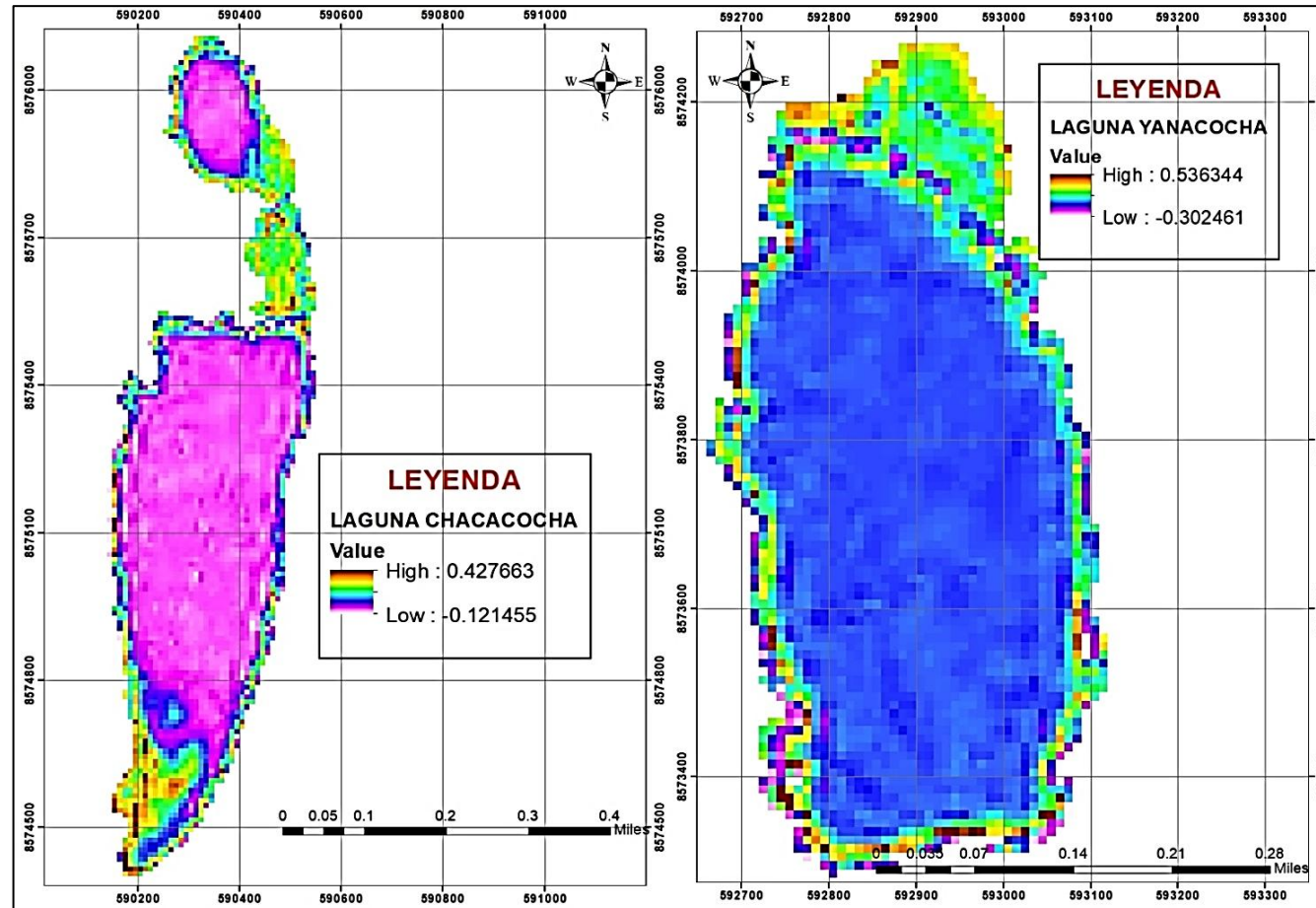
La Laguna Chacacocha presentó un rango de concentraciones de clorofila-a entre -0.151408 y 0.490997, con una distribución espacial marcadamente heterogénea. El sector norte mostró los valores más altos, asociados al descenso del nivel del agua y acumulación de nutrientes. En contraste, la zona central presentó valores intermedios, indicando una menor actividad fitoplanctónica, posiblemente debido a una mayor profundidad y mezcla vertical del agua. Este patrón refleja cómo la reducción del volumen hídrico afectó diferencialmente a la laguna, creando zonas de alta productividad algal en áreas someras del norte, mientras que las regiones centrales mantuvieron condiciones más estables.

Mientras tanto las concentraciones de clorofila-a en la laguna Yanacocha para el año 2021 oscilaron entre -0.198917 y 0.458026, mostrando un patrón distinto al de Chacacocha. La mayor parte del espejo de agua presentó tonalidades azules, señalando un incremento generalizado de clorofila-a en toda la laguna. El sector norte mantuvo los picos máximos, aunque con menor intensidad que Chacacocha. Las áreas centrales mostraron valores consistentemente elevados, sugiriendo una eutrofización más homogénea, probablemente relacionada con una circulación hídrica diferente y mayor mezcla de nutrientes en toda la columna de agua. Esta distribución uniforme contrasta con el gradiente marcado observado en Chacacocha.

Asimismo, Gonzales (2019), en su estudio realizado en la laguna de Paca mediante teledetección y datos in situ mostraron concentraciones de clorofila-a que oscilaron entre 8 y más de 25 $\mu\text{g/L}$. En el primer y segundo muestreo, los valores se mantuvieron mayormente en el rango de 8–25 $\mu\text{g/L}$, clasificando la laguna en estado eutrófico, mientras que en el tercer análisis las concentraciones superaron los 25 $\mu\text{g/L}$, indicando condiciones hipertróficas. Estos resultados coinciden con la tesis para este año 2022 donde se aumentaron las concentraciones, los cuales fueron a causa de las bajas precipitaciones y provocó el aumento de la proliferación algal en la laguna de Yanacocha y Chacacocha, lo cual ocasionó un estado eutrófico para este año.

Figura 15

Mapa temático de la concentración de clorofila-a en las lagunas Chacacocha y Yanacocha correspondiente al año 2022



Nota: Abreviaciones utilizadas: (High = Alta), (Low = Baja) y (Value = Valor).

Las concentraciones en la laguna Chacacocha oscilaron entre -0.121455 a 0.427663, en ese año 2022 hubo una expansión significativa de áreas con alta concentración de clorofila-a hacia las zonas norte y sur, contrastando con años anteriores donde estos valores se limitaban principalmente al sector norte. Este incremento, particularmente notable en el sur, coincide con el año de menores precipitaciones, que redujo el volumen de agua y ocasiono la proliferación y el aumento de la concentración algal en la laguna.

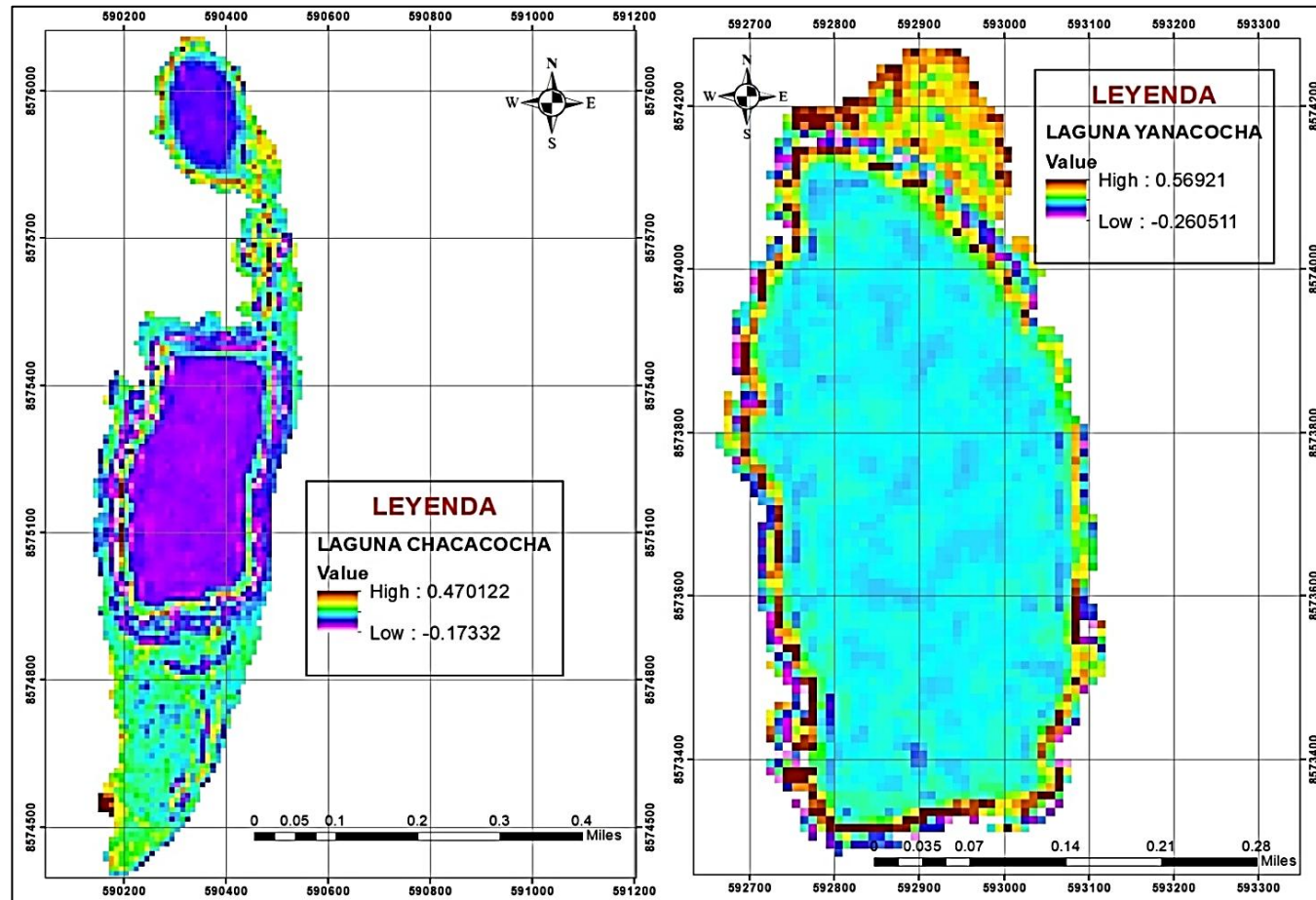
Por otro lado en la laguna Yanacocha los valores oscilaron de -0.302461 a 0.536344, donde se presentó una transformación drástica con el 85% de su superficie mostrando valores elevados representados por tonalidades azules intensas. El sector norte concentró los valores máximos, duplicando las mediciones de 2021. Este cambio radical, donde incluso áreas tradicionalmente alcanzaron valores elevadas, de este año se evidencia una aceleración en su proceso de eutrofización de la laguna Yanacocha.

Al contrastar con años anteriores, ambas lagunas mostraron en 2022 una expansión sin precedentes en sus áreas con alta concentración de clorofila-a, directamente vinculada al marcado descenso en las precipitaciones. En Chacacocha, la reducción del volumen hídrico provocó que zonas tradicionalmente estables presentaran por primera vez valores muy elevados, mientras tanto en Yanacocha experimentó una transformación más drástica, donde su superficie con concentraciones elevadas se expandió comparado con años previos.

En el estudio realizado por Geng et al., (2025), desarrollo en el lago Hong, donde experimentó un deterioro progresivo en su estado trófico, evolucionando de condiciones mesotróficas-eutróficas a un estado completamente eutrófico en toda su extensión. Este proceso estuvo acompañado por un incremento en la concentración de clorofila-a, asociado al cambio del color del agua de verde a amarillo, especialmente en las regiones noreste y oeste del lago. La intensificación del uso del suelo en la cuenca, junto con factores climáticos como la precipitación y el viento costero, contribuyeron al aumento de la biomasa algal, reflejado en mayores niveles de clorofila-a y en el agravamiento de la eutrofización.

Figura 16

Mapa temático de la concentración de clorofila-a en las lagunas Chacacocha y Yanacocha correspondiente al año 2023



Nota: Abreviaciones utilizadas: (High = Alta), (Low = Baja) y (Value = Valor).

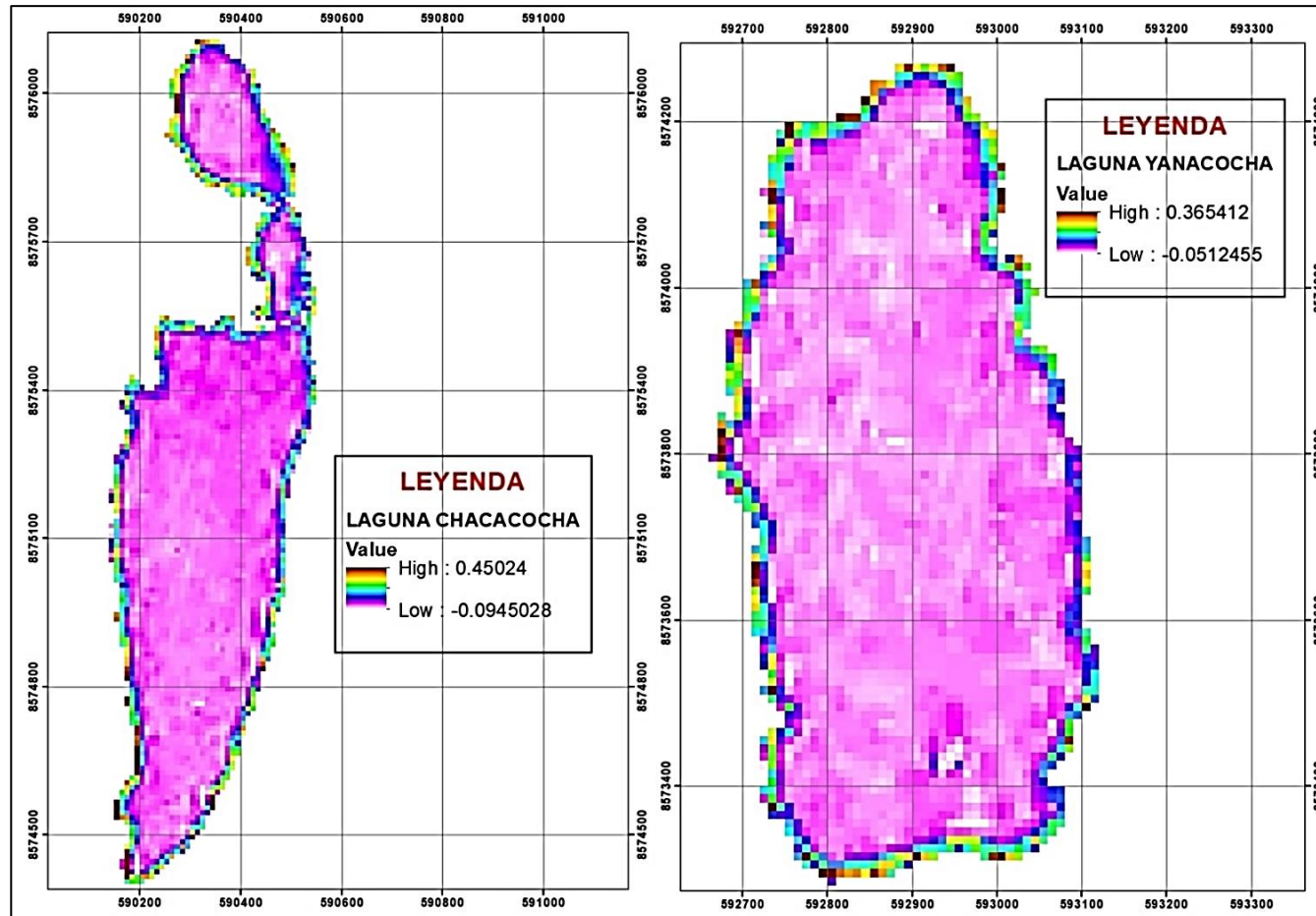
En el año 2023, la Laguna Chacacocha sufrió un grave impacto ambiental debido a una drástica reducción del volumen hídrico, causado principalmente por el déficit de precipitaciones en la región. Esta disminución generó un incremento significativo en las concentraciones de clorofila-a, lo que indica un posible proceso de eutrofización. Los valores registrados oscilaron entre -0.17332 y 0.470122, mostrando una amplia variabilidad que refleja las condiciones críticas del cuerpo de agua. La fuerte reducción en su capacidad afectó directamente la calidad del agua, aumentando la concentración de nutrientes y, en consecuencia, la proliferación de algas. Este fenómeno no solo alteró el equilibrio ecológico de la laguna, sino que también pudo afectar a las comunidades y especies que dependen de este recurso.

Durante el mismo año, la Laguna Yanacocha también experimentó cambios notables, aunque menos severos que en Chacacocha. Las concentraciones de clorofila-a se incrementaron en toda la laguna, con valores que oscilaron entre -0.265211 y 0.56921, siendo más pronunciados en la zona norte. Este aumento sugiere una mayor acumulación de nutrientes y materia orgánica, el cual es vinculada a la reducción en el volumen de agua. A diferencia de Chacacocha, Yanacocha no perdió tanta capacidad hídrica, pero el incremento en los niveles de clorofila-a evidencia una alteración en su dinámica ecológica. Este comportamiento podría estar asociado a factores como la menor circulación de agua o la influencia de actividades antropogénicas en la zona norte, lo que requiere un monitoreo continuo para prevenir futuros desequilibrios.

Kowe et al., (2023), en su estudio evidenció una marcada variabilidad temporal en la concentración de clorofila-a en el lago Manyame, con valores que oscilaron entre 11.43 y 60.18 $\mu\text{g/L}$ durante el periodo 2018–2022. Los niveles más altos se registraron en la estación seca, lo que indica condiciones de eutrofización moderada a alta, especialmente en la parte norte del lago. Estos hallazgos confirman que el uso de imágenes Sentinel-2 permite una evaluación eficaz de la calidad del agua en ecosistemas afectados por actividades humanas.

Figura 17

Mapa temático de la concentración de clorofila-a en las lagunas Chacacocha y Yanacocha correspondiente al año 2024



Nota: Abreviaciones utilizadas: (High = Alta), (Low = Baja) y (Value = Valor).

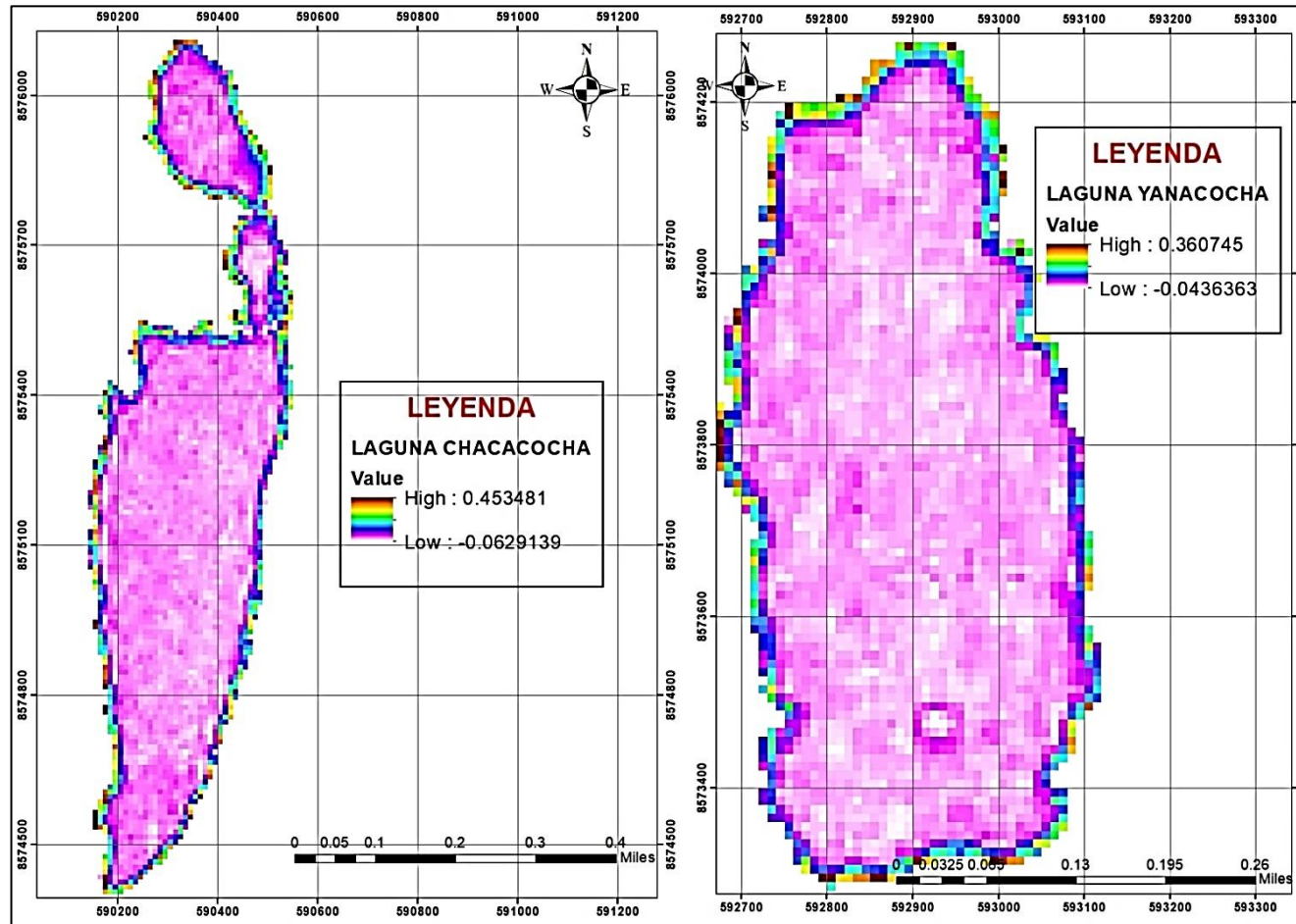
En la Figura 17 se evidencia un descenso significativo en las concentraciones de clorofila-a en la laguna Chacacocha, cuyos valores oscilaron entre -0.0945028 y 0.45024. Esta reducción se atribuye directamente al aumento de las precipitaciones registradas en la zona durante ese período, las cuales contribuyeron a diluir los nutrientes y mejorar la calidad del agua. Sin embargo, persiste un ligero incremento en las concentraciones de clorofila-a en la zona norte, lo que sugiere la posible influencia de factores locales, como aportes de nutrientes desde fuentes externas o una menor circulación de agua en esa área. A pesar de la mejora general, este fenómeno puntual requiere atención para garantizar la recuperación completa del ecosistema.

En el caso de la laguna Yanacocha, los datos muestran una respuesta similar pero más uniforme ante el aumento de las precipitaciones, con una disminución generalizada de las concentraciones de clorofila-a, el cual las concentraciones oscilaron entre -0.0512455 a 0.365412 en todo el cuerpo de agua. Lo más destacable es la notable mejoría observada en la zona norte, área que tradicionalmente presentaba los valores más elevados, lo que sugiere una efectiva renovación de las masas de agua y una reducción en la carga de nutrientes. No obstante, el análisis detallado revela que en la periferia de la laguna, especialmente en las zonas de menor profundidad cercanas a la orilla, persisten concentraciones elevadas de clorofila-a. Estas áreas que actúan como zonas de transición entre el sistema terrestre y acuático, son particularmente sensibles a la acumulación de sedimentos y materia orgánica arrastrada por escorrentía superficial. La persistencia de estos focos, aunque de magnitud reducida, subraya la importancia de implementar medidas de manejo integrado de cuencas para controlar los aportes difusos de nutrientes y garantizar así la sostenibilidad a largo plazo de la recuperación observada.

En la investigación de Bucheli et al. (2021) sobre el lago Hong, se observó un incremento en la concentración de clorofila-a, con valores entre 20 y más de 50 $\mu\text{g/L}$ en zonas específicas, lo que evidenció una transición hacia un estado eutrófico generalizado. En contraste, en la laguna Yanacocha y Chacacocha este comportamiento no se presentó, ya que el aumento de precipitaciones durante el año redujo las concentraciones de clorofila-a.

Figura 18

Mapa temático de la concentración de clorofila-a en las lagunas Chacacocha y Yanacocha correspondiente al año 2025



Nota: Abreviaciones utilizadas: (High = Alta), (Low = Baja) y (Value = Valor).

La Figura 18 evidencia una marcada reducción en las concentraciones de clorofila-a en la laguna Chacacocha durante 2025, con casi toda su superficie mostrando valores mínimos (representados en tonalidades cercanas al blanco). Este descenso sostenido responde directamente a las intensas lluvias registradas, que al mantener un flujo constante de agua dulce, limitaron drásticamente el desarrollo algal y la producción de clorofila.

En la laguna Yanacocha también se registró una disminución general de clorofila-a, aunque con una particularidad destacable: la aparición de un anillo circular rosado en el sector sur. Esta formación podría estar asociada a procesos locales como surgencias de aguas subterráneas, patrones de circulación específicos o acumulación diferencial de sedimentos. A diferencia de la laguna de Chacacocha, esta característica morfológica indica que, pese a la mejoría general, persisten dinámicas internas que generan variabilidad espacial en la calidad del agua.

Del análisis se verifico que las concentraciones de clorofila-a se estabilizaron de lo que iba en aumento de eutrofización se uniformizo y ahora se encuentra estable las concentraciones de clorofila-a en ambas lagunas.

El estudio de Yang et al., (2025), respalda el uso de imágenes satelitales para estimar parámetros de calidad del agua, incluida la clorofila-a, en ambientes fluviales amazónicos. Sus resultados confirman el potencial de los sensores remotos para detectar variaciones espaciales y temporales asociadas a la productividad algal, en este caso se encontraron valores menores a 5 mg/m³.

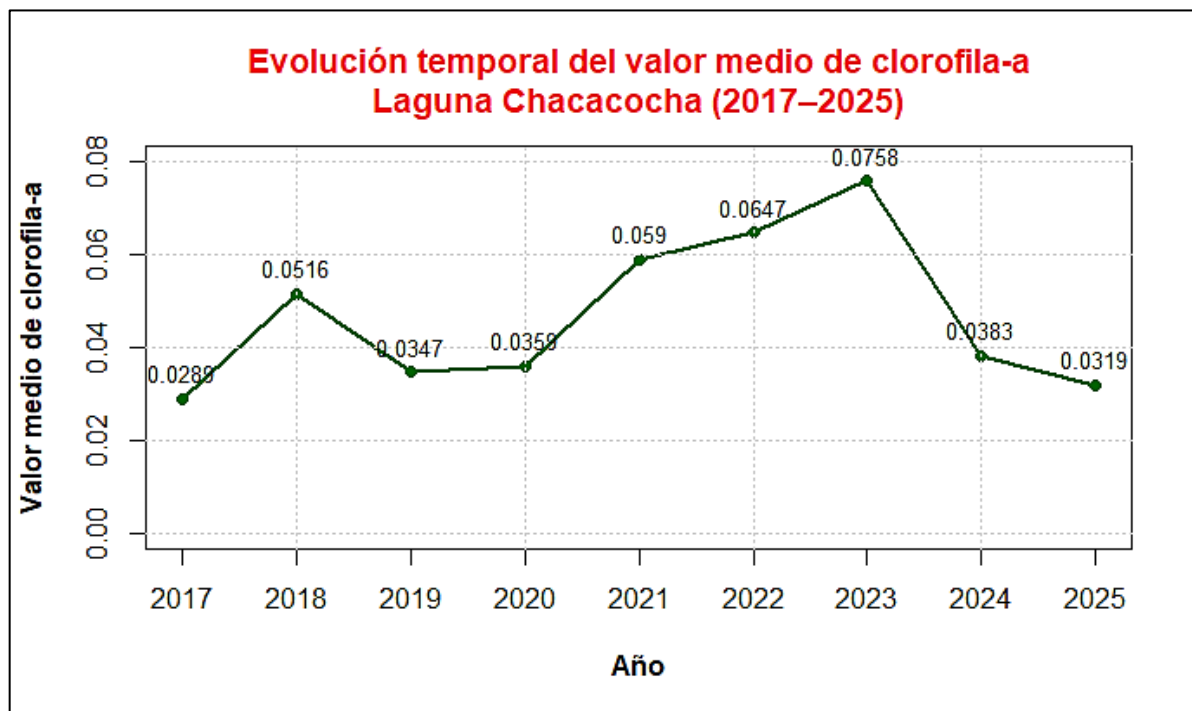
4.3. Determinación de la variabilidad temporal de la concentración de clorofila-a en las lagunas de Chacacocha y Yanacocha a través de un gráfico de línea que abarque el período 2017-2025.

Con el objetivo de analizar la variabilidad temporal de la concentración promedio de clorofila-a, se elaboraron dos gráficos de líneas para las lagunas Chacacocha y Yanacocha, correspondientes al periodo 2017–2025. Estos gráficos permitieron identificar patrones y tendencias en los niveles de clorofila-a, evidenciando posibles procesos de eutrofización. El análisis facilitó la comprensión de los cambios en la calidad del agua y su relación con factores climáticos o antrópicos, aportando información relevante para el monitoreo y la gestión sostenible de los ecosistemas acuáticos en la provincia de Huanta, región Ayacucho.

Laguna Chacacocha

Figura 19

Gráfico de línea que muestra la evolución del promedio de concentración de clorofila-a en la laguna Chacacocha durante el periodo 2017–2025.



Nota: Elaboración propia

Los resultados obtenidos muestran una variación significativa en las concentraciones de clorofila-a en la laguna Chacacocha durante el periodo de estudio, evidenciando una estrecha relación con los patrones de precipitación y el volumen de agua. Durante los años con marcada disminución de precipitaciones, particularmente en 2023, se registraron los valores más altos de clorofila-a, alcanzando 0.0758, lo cual significa que en este año se produjo el mayor proceso de eutrofización en la laguna Chacacocha. Este comportamiento puede atribuirse a que la reducción del espejo de agua generó un efecto de concentración de nutrientes y la exposición de sedimentos ricos en materia orgánica, creando condiciones favorables para la proliferación de fitoplancton.

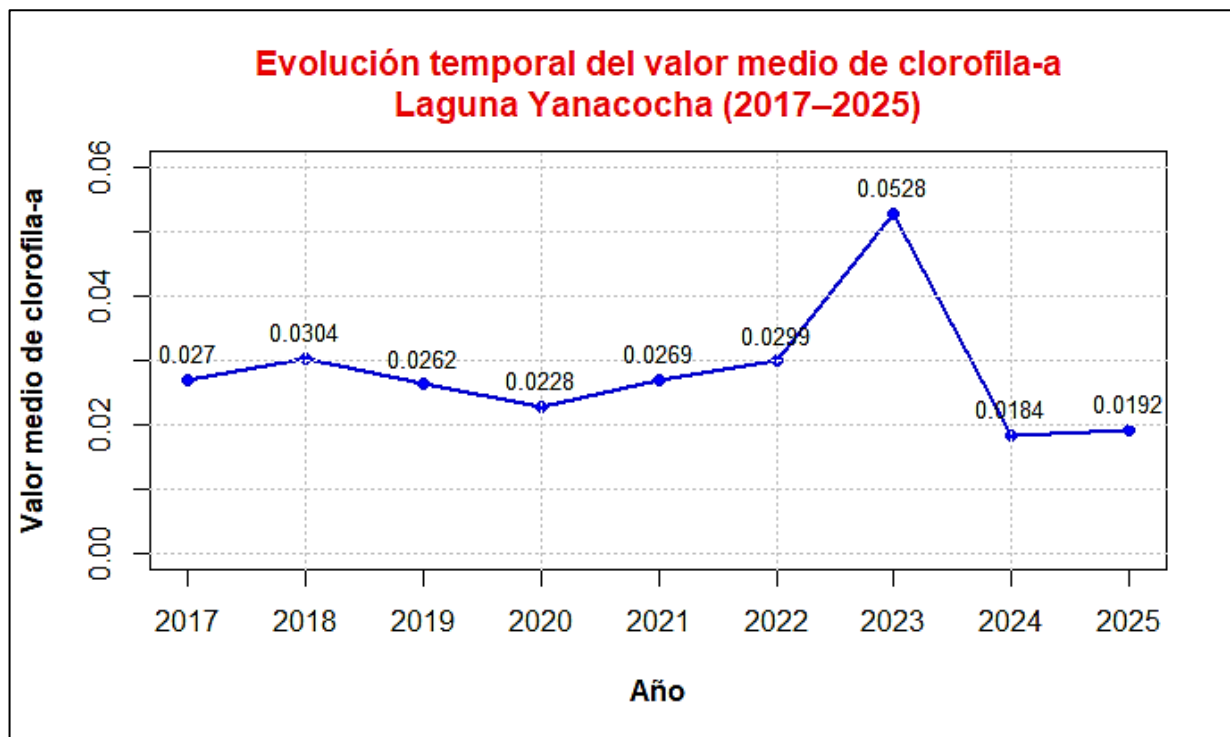
En contraste, durante los años con mayores precipitaciones como 2017, se observaron las concentraciones más bajas de clorofila-a (0.0319), este valor representa el menor proceso de eutrofización de los años estudiado para la laguna Chacacocha. En estas condiciones, el aumento del volumen de agua generó efectos de dilución de nutrientes, mayor turbidez que limitó la penetración de luz y procesos de estratificación térmica que restringieron el mezclado vertical.

Estos hallazgos son particularmente relevantes, ya que demuestran cómo los cambios en los patrones climáticos pueden alterar significativamente los procesos ecológicos en cuerpos de agua, afectando su calidad y dinámica trófica, donde en el (ANEXO 3) se muestra de forma panorámicamente los diferentes patrones de concentración de la clorofila-a en los mapas temáticos generados. Los resultados sugieren la necesidad de considerar estos factores en el diseño de estrategias de monitoreo y gestión de ecosistemas acuáticos en contextos de variabilidad climática.

Laguna Yanacocha

Figura 20

Gráfico de línea que muestra la evolución del promedio de concentración de clorofila-a en la laguna Yanacocha durante el periodo 2017–2025.



Nota: Elaboración propia

La Laguna Yanacocha presentó su pico máximo de clorofila-a con un valor de (0.0528) en 2023 durante una sequía prolongada, donde la menor profundidad y mayor disponibilidad de luz estimularon el crecimiento algal. Por el contrario, en 2024 se registró el valor mínimo de la concentración de clorofila-a con un valor de (0.0184) tras lluvias intensas que diluyeron nutrientes y mantuvieron mezcla constante en la columna de agua.

De la comparación de los valores entre ambas lagunas, la laguna Chacacocha mostró la mayor concentración con un valor de 0.0758 en el año 2023, superando a Yanacocha, mientras que esta última tuvo el valor más bajo con 0.0184 en el año 2019. Esta diferencia evidencia respuestas distintas frente a variaciones climáticas, destacando la necesidad de enfoques específicos para cada ecosistema acuático.

V. CONCLUSIONES

- El análisis de las imágenes Sentinel-2 mediante los softwares ENVI 5.6 y ArcGIS demostró ser una herramienta eficiente y con mayor exactitud para el procesamiento de datos espectrales. Los resultados confirmaron que el índice Chlorophyll Index (Chl Index) presenta una excelente adaptabilidad a las características específicas de la zona de estudio, proporcionando estimaciones confiables de las concentraciones de clorofila-a en los cuerpos de agua analizados. Esta metodología combinada permitió optimizar el procesamiento digital de imágenes y validar la aplicabilidad del índice seleccionado para el monitoreo de estos ecosistemas.
- El análisis de los mapas temáticos reveló una clara tendencia temporal en la distribución de clorofila-a en las lagunas Chacacocha y Yanacocha. Durante el período 2017-2020 se observaron concentraciones relativamente estables, manteniéndose dentro de rangos característicos para cada sistema. Sin embargo, a partir de 2021 se registró un incremento progresivo en los niveles de clorofila-a, alcanzando sus valores máximos históricos en 2022 y especialmente en 2023 en ambas lagunas, lo que refleja un cambio significativo en sus condiciones tróficas. Esta tendencia ascendente se revirtió durante 2024 y 2025, cuando el aumento de las precipitaciones generó una estabilización de las concentraciones, demostrando así la estrecha relación entre el régimen pluviométrico y la dinámica de la productividad primaria en estos ecosistemas acuáticos
- El análisis temporal reveló diferencias significativas en los promedios de concentración entre ambas lagunas: en Chacacocha se registró el valor máximo en el año 2023 con un valor de 0.0758 y el mínimo valor fue en el año 2017 con 0.0289, mientras que Yanacocha presentó su pico máximo en el 2023 con un valor de 0.0528 y su valor más bajo en 2024 con 0.0184. Estos resultados demuestran que, aunque ambas lagunas alcanzaron sus concentraciones máximas durante el mismo año (2023), los cuales están asociados a condiciones climáticas extremas, Chacacocha mostró una mayor amplitud en su variabilidad interanual (0.0289-0.0758) comparada con Yanacocha (0.0184-0.0528), lo que sugiere diferencias en su sensibilidad a factores ambientales y capacidad de respuesta ante factores climáticos.

VI. RECOMENDACIONES

- Implementar un programa de monitoreo periódico utilizando imágenes Sentinel-2 y el índice Chlorophyll Index (Chl Index) para evaluar cambios estacionales e interanuales en las concentraciones de clorofila-a.
- Estudiar la relación entre las fluctuaciones de clorofila-a y variables climáticas (precipitación, temperatura, evaporación) para entender mejor los patrones observados.
- Implementar los mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos (MERESE), para la conservación y almacenamiento del agua en la cuenca alta de las lagunas de Chacaqocha y Yanacocha.
- Desarrollar un estudio específico sobre cómo sequías prolongadas (como las de 2022-2023) y lluvias intensas afectan la dinámica trófica, analizando no solo clorofila-a sino también nutrientes (N, P) y comunidades fitoplanctónicas.
- Complementar los datos de clorofila-a con análisis microscópicos para identificar especies algales dominantes y su relación con la eutrofización.
- Fortalecer la participación comunitaria y la capacitación de actores locales en el monitoreo y gestión de la calidad del agua, promoviendo la educación ambiental y la corresponsabilidad en la conservación de las lagunas.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Añamuro, H. (2024). Análisis de la evolución espacio-temporal de la concentración de clorofila-a del agua del Lago Titicaca en el periodo 1990–2020, utilizando imágenes Landsat [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional UNAP. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/22053>
- Avila, A. P. (2019). *Análisis y clasificación de firmas espectrales utilizando técnicas de aprendizaje automático* [Tesis de maestría, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica]. Repositorio INAOE. <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1009/1677>
- Baltodano, A., Agramont, A., Lekarkar, K., Spyrakos, E., Reutilizan, E., & Van Griensven, A. (2024). Exploración de productos globales de teledetección para la evaluación de la calidad del agua: estudio de caso del lago de Nicaragua. *Aplicaciones de la Teledetección: Sociedad y Medio Ambiente*, 36, 101331. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101331>
- Barba Álvarez, R., De la Lanza-Espino, G., Contreras Ramos, A., & González Mora, I. (2013). Insectos acuáticos indicadores de calidad del agua en México: Casos de estudio, ríos Copalita, Zimatán y Coyula, Oaxaca. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84(1), 381-383. <https://doi.org/10.7550/rmb.31037>
- Barrenechea, J. M., Guigou, B., Gallego, F., Barbieri, A., Smith, B., Fernández, M., Fernández, V., & Pahlevan, N. (2024). Monitoring Uruguay's freshwaters from space: An assessment of different satellite image processing schemes for chlorophyll-a estimation. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 33, 101079. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101079>
- Bautista, J. D. (2020). *Influencia de la temperatura superficial en la dinámica espacio-temporal de la cobertura nival en los nevados Portuguesa y Razuhuilca, Ayacucho* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. <https://acortar.link/r82kuC>

- Bucheli, L. A., Rojas, B. F., & Mafla, F. (2021). Monitoreo de la calidad del agua mediante clorofila-a aplicando imágenes satelitales en el Humedal Ramsar, lago Guamués. *Ingeniare*, 17(31), 21–31. <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.31.8935>
- Bustamante Mejia, Y. (2021). *Evaluación de la calidad del agua utilizando macroinvertebrados bentónicos como indicadores biológicos en el río Yanayacu, Chota-Cajamarca 2019* [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Forestal y Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de Chota]. Repositorio UNACH. <https://hdl.handle.net/20.500.14142/146>
- Calderon Quintanilla, A. D., & Barcena Quispe, M. A. (2023). Calidad de agua para el consumo humano y percepción local de la población de la microcuenca de Palccaro, distrito de Tambobamba, región Apurímac, 2022 [Tesis de licenciatura, Universidad Continental. Cusco, Perú. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/13856>
- Cao, C., Bai, Y., Peng, K., Han, B., & Zhang, Y. (2025). Regionalization of hydrological cycle changes in 31 source catchments of Yellow River Basin considering multiple hydrological variables. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 59, 102340. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102340>
- Catalina, Á. (2015). *Utilización de medidas de fluorescencia de la clorofila para monitorizar el estado nutricional y estimar el potencial enológico en viñedos afectados por clorosis férrica* [Tesis doctoral, Universidad de Valladolid]. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/16657>
- Ccora Repuello, B. (2022). Evaluación de la calidad del agua para consumo humano de la localidad de Acobamba [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Huancavelica]. <https://repositorio.unh.edu.pe/items/6edb2b31-0803-4f68-af85-8dcc3365a3d8>
- Comisión Europea. (2018). El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial: El componente espacio Copernicus. Proyecto cofinanciado por la Comisión Europea mediante el acuerdo 2018/SI2.810140/04.

- Cruz, H. Y. (2018). *Diversidad de fitoplancton marino en las zonas litorales de Pacasmayo y Magdalena de Cao* [Tesis para optar el título de Biólogo Pesquero, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio UNITRU. <https://hdl.handle.net/20.500.14414/10847>
- Delgado, L. E., & Marín, V. H. (2021). Determinación de zonas de alta concentración de clorofila-s en la región norte de los fiordos y canales australes (Crucero CIMAR 9 Fiordos) por medio de sensoramiento remoto. *Ciencia y Tecnología del Mar*, 29(2), 87–94. Comité Oceanográfico Nacional. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62429205>
- Exley, G., Armstrong, A., Page, T., & Jones, I. D. (2021). Floating photovoltaics could mitigate climate change impacts on water body temperature and stratification. *Solar Energy*, 219, 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.076>
- Geng, X., Zhou, Y., Yang, F., He, B., Liu, H., Yu, K., Feng, Q., Zhang, Y., Kou, J., & Du, Y. (2025). Remotely sensed water color and eutrophication in a downstream lake: Long-term dynamic and driving factors in Hong Lake, China. *Ecological Indicators*, 177, 113783. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113783>
- Gómez Delgado, I. (2025). *Determinación de la cantidad de nitrógeno y clorofila en el cultivo de alfalfa mediante teledetección con drones y comparación con otras técnicas* [Trabajo de fin de máster, Universidad de Valladolid]. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/75513>
- Gómez-Gutiérrez, A., Miralles, M. J., Corbella, I., García, S., Navarro, S., & Llebaria, X. (2016). La calidad sanitaria del agua de consumo: Calidad y seguridad del agua potable. *Gaceta Sanitaria*, 30(Suplemento 1), 63-68. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2016.04.012>
- Gonzales Campos, P. P., Solano Soplín, R. P., & Garzon Flores, A. (2019). Análisis del estado trófico mediante teledetección y datos “in situ” en la laguna de Paca, Jauja – Junín 2019 (Tesis de licenciatura). Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/49682>

- Guan, Y., Qiang, Y., Li, B., Zhang, N., Xiao, Y., & Lu, W. (2025). Evaluación de los impactos ambientales integrados y las características tipológicas de la contaminación y la escasez del agua en las ciudades chinas. *Journal of Hydrology*, 66, 133662. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133662>
- Guimaraes Pérez, L. X. (2022). Evaluación de la calidad del agua para consumo humano en el Asentamiento Humano San Isidro, Callería – Ucayali, 2020 [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ucayali]. <https://repositorio.unu.edu.pe/items/ed3804df-1e2b-4fa6-b2e5-d65e583fb7c8>
- Kowe, P., Ncube, E., Magidi, J., Ndambuki, J. M., Rwasoka, D. T., Gumindoga, W., Maviza, A., Mavaringana, M. J. P., & Kakanda, E. T. (2023). Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la calidad del agua mediante datos de teledetección: Un estudio de caso del lago Manyame. *Científico Africano*, 21, e01877. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01877>
- Lima, G. M. (2024). *Contaminación del suelo agrícola por agroquímicos industriales de la comunidad de Villa Sicata del distrito de Ilave – 2023* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada San Carlos]. Repositorio Institucional ALCIRA. <https://acortar.link/tHmBFr>
- Lusheng, C., Shuangshuang, L., & Xianfeng, L. (2025). Mapeo mejorado de aguas superficiales mediante imágenes satelitales de teledetección basadas en la optimización del umbral de Otsu y la selección efectiva del índice de agua de teledetección. *Revista de Hidrología*. En prensa. <https://doi.org/10.1016/j.jhidrol.2025.132771>
- Mallqui, J. F., Miguel, Y., & Reyes, S. L. (2022). *Análisis espacio-temporal de la calidad de agua del río Mantaro influenciada por las aguas residuales del año 2004–2008 y 2015–2019* [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. Facultad de Ingeniería, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental. <https://acortar.link/aUYx1q>
- Merchán, Z. C. (2018). *Identificación espacio-temporal de clorofila-a mediante imágenes de satélite en sistemas acuáticos* [Trabajo de grado, Universidad Pedagógica y

Tecnológica de Colombia]. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Ambiental.
<https://acortar.link/1a2wXR>

Moran, A. I. (2014). *Algoritmos para la corrección radiométrica de imágenes de satélite* [Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio Institucional.
<https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/436>

Nieto, N. (2011). La gestión del agua: Tensiones globales y latinoamericanas. *Política y Cultura*, (36), 157–176.

Ore, Y. (2016). *Caracterización hidrológica de la microcuenca del río Huanta - Huanta - Ayacucho - 2016* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Pandey, M., Thakur, R. R., Nandi, D., Bera, D. K., Beuria, R., Kumari, M., Kasawnea, A. M., & Zhran, M. (2025). Geospatial monitoring of environmental sustainability: A remote sensing-based approach for assessing mining-induced impacts in Eastern India. *Results in Engineering*, 20, 104692. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104692>

Quezada García, M. (2020). *Uso de imágenes satelitales para determinar los parámetros de calidad del agua en los ríos amazónicos Neshuya y Aguaytía - Perú* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Agraria La Molina.
<https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/5eb916a8-cf95-4ce2-b0ab-f56b5acf7fa5>

Quispe, D., Calienes, R., Tam, J., Graco, M., Ledesma, J., Flores, G., Correa, D., & Quispe, C. (2010). Análisis comparativo entre clorofila-a satelital e *in situ* en el ecosistema de afloramiento peruano, entre 1998–2007. *Ecología Aplicada*, 9(2), 57–65. <https://doi.org/10.21704/rea.v9i2.457>

Valderrama, P. (2010). *Inspección geológica a las lagunas Razuwillca (Provincia de Huanta, Departamento de Ayacucho)* [Informe técnico]. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico – INGEMMET, Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico.

- Yang, J., Xu, B., Wu, B., Zhao, R., Liu, L., Li, F., Ai, X., Li, L., & Yang, Z. (2025). Fusión dinámica de clorofila basada en algoritmos de aprendizaje automático y teledetección de alto rendimiento para la predicción del rendimiento del algodón. *Field Crops Research*, 333, 110057. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.110057>
- Zhao, Y., He, X., Pan, S., Bai, Y., Wang, D., Li, T., Gong, F., & Zhang, X. (2024). Satellite retrievals of water quality for diverse inland waters from Sentinel-2 images: An example from Zhejiang Province, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 130, 104048. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104048>

VIII. ANEXOS

ANEXO 1

MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES Y DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
<p>INTERROGANTE GENERAL</p> <p>➤ ¿Cuál es la distribución espacio-temporal de la clorofila-a mediante imágenes satelitales de las lagunas de Razuhuillca en Huanta, Ayacucho 2017-2025?</p> <p>INTERROGANTES ESPECÍFICOS</p>	<p>OBJETIVO GENERAL</p> <p>➤ Evaluar la distribución espacio-temporal de la clorofila-a mediante imágenes satelitales de las lagunas de Razuhuillca en Huanta,</p>	<p>HIPÓTESIS GENERAL</p> <p>La distribución espacio-temporal de la clorofila-a en las lagunas de Razuhuillca, evaluada mediante imágenes satelitales Sentinel-2 entre los años 2017 al 2025, muestra una variabilidad significativa asociada a procesos de eutrofización y cambios ambientales.</p> <p>HIPÓTESIS ESPECÍFICAS</p>	<p>VARIABLE INDEPENDIENTE:</p> <p>Espacio-temporal</p> <p>DIMENSIONES</p> <ul style="list-style-type: none"> - Concentración de pigmento fotosintético 	<ul style="list-style-type: none"> - Concentración estimada de clorofila-a (Satélite Sentinel-2) - Variación 	<p>TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN</p> <p>(tipo aplicada – nivel descriptivo)</p> <p>DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN</p> <p>El diseño de la investigación es no</p>

<p>PE1: ¿Cómo pueden ser adquiridas y procesadas las imágenes satelitales Sentinel-2 para detectar la concentración de clorofila-a en las lagunas de Chacacocha y Yanacocha entre los años 2017 al 2025?</p> <p>PE2: ¿Qué patrones espaciales de distribución presenta la clorofila-a en las lagunas de Chacacocha y Yanacocha, según los mapas temáticos generados a partir de imágenes Sentinel-2 entre 2017 al 2025?</p>	<p>Ayacucho 2017-2025</p> <p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</p> <p>OE1: Adquirir y procesar imágenes satelitales Sentinel-2 para determinar la presencia de clorofila-a en las lagunas de Chacacocha y Yanacocha del 2017 al 2025</p> <p>OE2: Generar mapas temáticos de la distribución de la clorofila-a, mediante píxeles espectrales en</p>	<p>HE1: Las imágenes satelitales Sentinel-2 permiten adquirir y procesar la presencia de clorofila-a en las lagunas de Chacacocha y Yanacocha del 2017 al 2025</p> <p>HE2: Los mapas temáticos generados a partir de píxeles espectrales evidencian patrones diferenciados en la distribución espacial de la clorofila-a en las lagunas de Chacacocha y Yanacocha del 2017 al 2025</p> <p>HE3: La concentración de clorofila-a en las lagunas de Chacacocha y Yanacocha presenta una tendencia temporal variable de los años 2017 al 2025</p>	<p>- Calidad del agua</p> <p>VARIABLE DEPENDIENTE Clorofila-a</p> <p>DIMENSIONES</p> <p>- Temporalidad</p>	<p>interanual de la concentración</p> <p>- Estimación del nivel trófico</p> <p>- Distribución espacial de la concentración</p> <p>- Años de análisis (2017, 2018, 2019,</p>	<p>experimental – longitudinal</p> <p>POBLACIÓN:</p> <p>La población de estudio está conformada por la red de lagunas del sistema Razuhuillca, ubicada en la provincia de Huanta, región Ayacucho</p>
---	---	---	--	---	--

<p>PE3: ¿Cómo ha variado temporalmente la concentración de clorofila-a en las lagunas de Chacacocha y Yanacocha durante el periodo 2017–2025?</p>	<p>las lagunas de Chacacocha y Yanacocha del 2017 al 2025.</p> <p>OE3: Determinar la tendencia temporal variable de la concentración de clorofila-a en las lagunas de Chacacocha y Yanacocha de los años 2017 al 2025.</p>		<p>- Espacialidad</p> <p>- Teledetección</p>	<p>2020, 2021, 2022, 2023, 2024 y 2025)</p> <p>- Sensor óptico utilizado (Sentinel-2)</p> <p>- Índices espectrales aplicados (por ejemplo: NDVI, índice de clorofila)</p> <p>- Resolución espacial (10–20 m)</p>	<p>MUESTRA</p> <p>La muestra está constituida por las lagunas Chacacocha y Yanacocha</p>
---	--	--	--	--	---

ANEXO 2



ANEXO 3

Mapas temáticos sobre la concentración de clorofila-A para los años del 2017 - 2025

