



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**“Análisis Multitemporal de Lagunas Altoandinas del Macizo del
Cajas Mediante Teledetección”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:
INGENIERO AMBIENTAL

Autor:
ALEX PATRICIO PARRA URGILES

Director:
Mgt. EDWIN JAVIER ZÁRATE HUGO

CUENCA, ECUADOR

2025

DEDICATORIA

*A mis padres, por siempre haber estado presentes y confiar en mis capacidades, y a mis
ñaños, por ser mi motivación para continuar en la vida y no rendirme.*

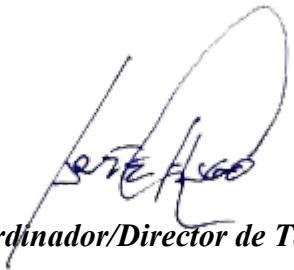
AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis, el Mgt. Edwin Zárate, por depositar su confianza en mí para el desarrollo de este y otros proyectos, además de su guía inconmensurable en todo momento. A la Biol. Mose Santillán, por contribuir con sugerencias y retroalimentación en distintas fases del proyecto, siendo de gran ayuda en momentos de incertidumbre.

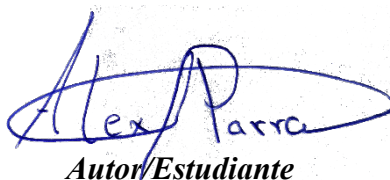
RESUMEN

El estudio destaca la relevancia ecológica, hídrica y energética de las lagunas altoandinas del Macizo del Cajas, así como su vulnerabilidad a procesos como la eutrofización. Estos cuerpos de agua generan servicios ecosistémicos clave en el ciclo hidrológico, por lo que requieren monitoreo continuo. Se analiza la dinámica temporal (2017 - 2024) de 89 lagunas, evaluando los cambios en su superficie y la vegetación mediante teledetección. Se emplearon imágenes Sentinel-2 con correcciones atmosféricas y topográficas, reproyección y ajuste del área. Mediante segmentación supervisada se delimitó el área de cada laguna y se calcularon índices espectrales normalizados: NDWI, como método de validación de los datos de segmentación supervisada y NDVI. Las series temporales se suavizaron con un filtro de Kalman y se aplicaron la prueba de Mann-Kendall para detectar tendencias, y el coeficiente de Spearman para analizar correlaciones. Los resultados indican que aproximadamente el 30 % de las lagunas presenta una tendencia individual significativa de reducción del área entre 2017 y 2024. En cuanto al NDVI, el 30,34 % de las lagunas mostró una tendencia significativa creciente, el 2,25 % decreciente, y el 67,41 % restante no presentó cambios significativos. Por último, los análisis de correlación de Spearman revelan que en el 55,06 % de los casos existe una relación inversa entre NDVI y área: cuando aumenta el NDVI en las lagunas, disminuye el área y viceversa, el 44,94 % restante no mostró correlaciones estadísticamente significativas.

Palabras clave: lagunas altoandinas, dinámica lacustre, análisis multitemporal, teledetección, NDVI.



Cordinador/Director de Tesis



Autor/Estudiante

ABSTRACT

The study underscores the ecological, hydrological, and energetic relevance of the high-Andean lakes in the Macizo del Cajas, as well as their vulnerability to processes such as eutrophication. These water bodies supply key ecosystem services within the hydrological cycle and therefore require continuous monitoring. Temporal dynamics (2017 – 2024) of 89 lakes were assessed by quantifying changes in surface area and surrounding vegetation through remote sensing. Atmospherically and topographically corrected Sentinel-2 imagery was re-projected and clipped to the study area. Each lake was delineated via supervised segmentation, and two normalized spectral indices were computed: The Normalized Difference Water Index (NDWI) to validate the segmentation results, and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). The resulting time series were smoothed with a Kalman filter; the Mann–Kendall test was applied to detect trends, and Spearman’s rank correlation coefficient to evaluate associations. Results indicate that approximately 30 % of the lakes exhibit a significant individual trend of surface area reduction between 2017 and 2024. Regarding NDVI, 30.34 % of the lakes show a significant increasing trend, 2.25 % a decreasing trend, and the remaining 67.41 % no significant change. Finally, Spearman correlation analysis reveals an inverse relationship between NDVI and lake area in 55.06 % of the cases higher NDVI values coincide with smaller water surfaces and vice versa whereas 44.94 % of the lakes show no statistically significant correlation.

Keywords: high Andean lakes, lake dynamics, multitemporal analysis, remote sensing, NDVI.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	3
1.1.1. Objetivo General.....	3
1.1.2. Objetivos Específicos	3
CAPÍTULO II	4
METODOLOGÍA	4
2.1. Área de estudio	4
2.2. Preprocesamiento	5
2.2.1. Fuente de datos	5
2.2.2. Criterios de descarga.....	5
2.2.3. Ajuste al área de estudio	5
2.2.4. Proyección de sistema de coordenadas	6
2.2.5. Correcciones topográficas.....	6
2.3. Procesamiento.....	8
2.3.1. Segmentación Supervisada (Random Forest)	8
2.3.2. Calculo de índices espectrales (NDVI).....	10
RESULTADOS	12
3.1. Análisis de los índices de Exactitud Global y Kappa	12
3.2. Análisis de la dinámica del área por laguna	13
3.3. Análisis de la tendencia del NDVI	15
3.4. Correlaciones	16
CAPÍTULO IV	17
DISCUSIÓN	17
REFERENCIAS.....	19

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Ecuación de corrección topográfica por el método de Minnaert	7
Tabla 2	Medidas de concordancia para datos categóricos. Fuente: Landis y Koch (1977).	9
Tabla 3	Formula del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).	11
Tabla 4	Exactitud global e índice Kappa derivados de matrices de confusión para imágenes.	12

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Área de estudio y distribución de lagunas en el Macizo del Cajas.	5
Fig. 2 Definición y recorte del área de interés. area of interest (AOI)	6
Fig. 3 Aplicación de la corrección topográfica de Minnaert en una imagen Sentinel - 2.	7
Fig. 4 Proceso de clasificación supervisada por el método de Random Forest.	10
Fig. 5 Estadístico de tendencias tau para el área de cada laguna, codificado por color según su p-valor.	14
Fig. 6 Estadístico de tendencias tau para los valores de NDVI de cada laguna. codificado por color según su p-valor.	15
Fig. 7 Estadístico de correlación de spearman para los valores de Área con respecto al NDVI de cada laguna, codificado por color según su p-valor.	16

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I. <u>I</u> nterventario georreferenciado de lagunas altoandinas: elevación, coordenadas y área (ha)	24
Anexo II. <u>M</u> atrices de confusión por fecha de adquisición para el conjunto de prueba (30 %)	27
ANEXO III. <u>R</u> esultados del test de Mann–Kendall para la dinámica temporal del área por laguna	29
ANEXO IV. <u>R</u> esultados del test de Mann–Kendall para la dinámica temporal del NDVI por laguna	31
Anexo V. <u>R</u> esultados del análisis de correlación de Spearman entre área y NDVI por laguna	33

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Las lagunas constituyen una fuente esencial de servicios ecosistémicos. Entre los servicios de regulación, destaca su capacidad para liberar agua en distintas épocas del año; esta, luego de un proceso de potabilización, abastece a las comunidades aledañas. Un claro ejemplo es la subcuenca del río Tomebamba, que nace en el macizo y alimenta la Planta de Tratamiento de Agua El Cebollar, convirtiendo al sector en un punto estratégico para la ciudad de Cuenca (ETAPA EP, 2012). La importancia de estos cuerpos de agua va más allá de lo local y se extiende a la seguridad energética nacional. Los ríos Yanuncay y Tomebamba, originados en el macizo, se unen a los ríos Tarqui y Machángara para formar el río Cuenca, parte de la cuenca alta del Paute, responsable de aproximadamente el 40 % de la energía hidroeléctrica del Ecuador (MAE y ETAPA EP, 2018). Por ello, es fundamental proteger este sistema hídrico vital tanto para las comunidades como para el país. Además, estas lagunas sirven de hábitat para una notable diversidad biológica. En sus márgenes se desarrollan ecosistemas frágiles como páramos, humedales, manglares y sistemas marino costeros, considerados pilares de la riqueza natural del Ecuador (ETAPA EP, 2011). Su valor cultural y científico también es relevante: ofrecen funciones protectoras, educativas, paisajísticas y recreativas, además de sostener procesos ecológicos que equilibran el ambiente (ETAPA EP, s. f.).

Sin embargo, estas lagunas enfrentan amenazas como la eutrofización, este es un problema central en ecosistemas acuáticos sensibles. Se define como el enriquecimiento excesivo de nutrientes que provoca un crecimiento de producción primaria. El fósforo es el elemento más importante para la ecología de lagos, dado que su deficiencia limita la productividad de estos ecosistemas, y su aporte excesivo conduce a la eutrofización (Hutchinson, 1957, p. 727). Este proceso, impulsado principalmente por actividades agrícolas y urbanas, ha acelerado en gran medida la filtración de N y P a través de la interfaz tierra-agua y su transporte hacia los cuerpos de agua, degradando los ecosistemas de agua dulce y provocando pérdida de biodiversidad (Withers et al., 2014, p. 5854). Además, factores abióticos como el aumento de temperatura debido al cambio climático influyen en la eutrofización: según Oleksy et al. (2020), “este calentamiento podría haber mejorado directamente el uso de nutrientes y la producción primaria” en lagos de montaña, promoviendo así condiciones que favorecen el crecimiento de producción primaria.

Ante este desafío, Los sensores de teledetección satelital se han convertido en una fuente de monitoreo para la obtención de datos aplicados a cartografiar la cubierta terrestre, la gestión forestal, la detección de cambios ambientales y la monitorización de los recursos hídricos, lo que revolucionó el monitoreo de lagos. Originalmente desarrollado para el monitoreo de aguas oceánicas, el análisis de imágenes multiespectrales ahora permite extraer parámetros como la concentración de clorofila-a, sólidos suspendidos y carbono disuelto en cuerpos de agua dulce (Llodrà-Llabrés et al., 2023, p. 2). En particular, la combinación de índices de agua como el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) con algoritmos de segmentación ha demostrado ser eficaz para delinear la superficie de lagunas y otros cuerpos de agua a lo largo de series temporales (Amgoth Ashok et al., 2021, p. 1).

A su vez, el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se ha consolidado como un indicador indirecto del vigor vegetal, como lo muestra el estudio de Pettorelli et al. (2005) al monitorear cambios en la vegetación terrestre y acuática a distintas escalas espacio-temporales. El NDVI calcula el contraste espectral entre el infrarrojo cercano y el rojo visible, capturando la absorción de luz por la clorofila (Rouse et al., 1973). Así, aun cuando el NDVI no cuantifica directamente la clorofila-a ni los niveles tróficos, su uso como indicador indirecto permite evaluar la respuesta ecosistémica frente a cambios en el régimen hídrico y climático, como lo confirmó el reciente trabajo de León, Jara y Zárate (2024), que encontró una correlación positiva entre la clorofila a y el NDVI en lagunas altoandinas.

Las lagunas del Macizo del Cajas representan un valor estratégico para la región, el cantón Cuenca y el Ecuador. ETAPA EP (s. f.) señala que “el PNC constituye un complejo sistema lagunar de alta importancia, abastece agua potable a la ciudad de Cuenca, sustenta sistemas biológicos únicos y es fuente del Tomebamba y Yanuncay, que alimentan embalses hidroeléctricos”. Por ello, es indispensable monitorear la evolución temporal de estas lagunas. Estudios de teledetección demuestran que las superficies lacustres son altamente dinámicas: “Entre 1984 y 2015, el agua superficial permanente ha desaparecido de un área de casi 90 000 km², aproximadamente equivalente al tamaño del lago Superior; aunque en otros lugares se han formado nuevos cuerpos de agua superficial permanente que cubren 184 000 km²” (Pekel et al., 2016), o el estudio de (Javier Silva et al., 2021, p. 302). De igual forma, Javier Silva et al. (2021, p. 302) observaron que “los resultados obtenidos indican que existe una correlación alta e inversa de 97% para las variables (área de vegetación y napa freática) y directa de 49% (área de vegetación y precipitación), y los resultados obtenidos por la prueba de independencia entre

variables comprueban nuestra hipótesis”. Estos antecedentes subrayan la capacidad de la teledetección para revelar tendencias hidrológicas, climáticas y ecológicas en sistemas lacustres sensibles.

La presente investigación se enfoca en 89 lagunas del Macizo del Cajas (ubicadas mayormente en el Parque Nacional Cajas), abarcando el periodo 2017 - 2024. Se emplean imágenes ópticas Sentinel-2 para extraer, mediante técnicas de segmentación (método Random Forest), la superficie lacustre de cada laguna en múltiples fechas (imágenes). A su vez, se calculan valores de NDVI medio para examinar posibles variaciones temporales de la producción primaria en ellas. Con estos datos, se analizarán las posibles tendencias del área lacustre en la escala temporal propuesta y se evaluará la posible correlación entre la extensión de las lagunas y el NDVI.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo General

Analizar la dinámica temporal de la superficie lacustre en las lagunas del Macizo del Cajas mediante técnicas de segmentación usando imágenes satelitales, con el fin de evaluar posibles tendencias de cambio y correlaciones entre datos.

1.1.2. Objetivos Específicos

Recopilar y realizar el preprocesamiento de las imágenes satelitales (reproyección, corrección topográfica y ajuste al área de estudio) para mejorar la calidad de los datos.

Determinar índices espectrales (NDWI y NDVI) y aplicar técnicas de segmentación supervisada.

Desarrollar un análisis descriptivo de las distintas bases de datos generadas, identificando posibles tendencias y correlaciones.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio

El Macizo del Cajas comprende, al norte; con el río Cañar; al sur, con el río Jubones; al este, con las estribaciones del valle interandino, y, al oeste, con el golfo de Guayaquil, y cuenta con una extensión de 976 600,92 ha, de las cuales 892 161,52 ha pertenecen a territorio continental y 88 439,4 ha pertenecen al ecosistema marino (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, s. f.). Este forma parte de cuatro provincias: Azuay, Cañar, El Oro y Guayas. Además, cuenta con ecosistemas que van desde los páramos a 4 450 msnm hasta la franja costera (ETAPA, s. f.). El área de estudio no solo es importante por su gran diversidad biológica, sino también porque en la región se genera “cerca del 51 % de la hidroenergía del país” (ETAPA, s. f.). Esta investigación se enfoca en lagunas altoandinas con una altitud superior a 3 000 msnm, ubicadas, en su mayoría, en un núcleo central dentro del Parque Nacional Cajas y varias dispersas tanto al norte como al sur (véase Fig. 1). En la investigación se consideraron varios criterios de delimitación, entre los cuales están la elevación, la superficie y la periodicidad de imágenes satelitales para cada laguna, obteniendo 89 lagunas con características morfológicas propias, como se observa en el Anexo 1.

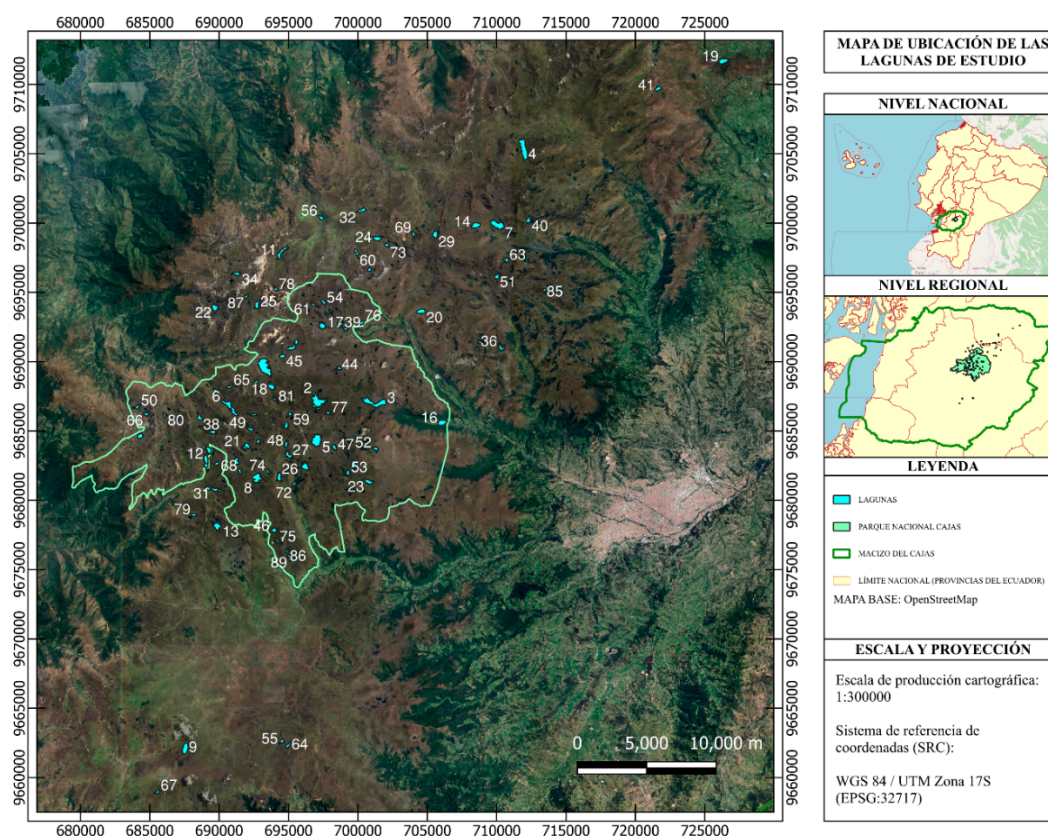


Fig. 1 *Área de estudio y distribución de lagunas en el Macizo del Cajas, Fuente: Mapa base ©OpenStreetMap (OSM). Divisiones político-administrativas: INEC; red hidrográfica: IERSE. Los círculos numerados indican las lagunas muestreadas; la tabla de correspondencia ID se encuentra en el Anexo 1.*

2.2. Preprocesamiento

2.2.1. Fuente de datos

Para la elaboración de esta investigación se obtuvieron imágenes multiespectrales del repositorio Copernicus Browser gestionado por la Comisión Europea en conjunto con la Agencia Espacial Europea (ESA), correspondientes a las imágenes Sentinel-2 nivel L2A, con una resolución espacial de 10 m (<https://browser.dataspace.copernicus.eu>). Este conjunto de datos espectrales ya contiene correcciones: según el documento técnico de la Agencia Espacial Europea (ESA, 2021), las imágenes de nivel L2A incluyen correcciones atmosféricas que transforman los productos de nivel L1C en reflectancia de fondo de atmósfera (BOA) mediante el modelo de transferencia radiativa libRadtran y tablas de búsqueda (LUT) específicas para los sensores de Sentinel 2. Sin embargo, fue necesario aplicar una corrección topográfica para reducir los efectos de la pendiente y la relación de aspecto, evitando posibles errores en la segmentación en áreas de alto relieve.

2.2.2. Criterios de descarga

Para la obtención de las imágenes satelitales se establecieron varios criterios de descarga. Primero, para la ubicación se utilizó la herramienta “crear un área de interés” del visor Copernicus Browser, con la que se ajustó los límites del área del Macizo del Cajas, Como criterio final, en cuanto a la temporalidad, se buscó la fecha más antigua con datos consistentes (2017), para fijarla como punto de partida hasta la fecha de análisis de esta investigación (2024).

2.2.3. Ajuste al área de estudio

Una forma de optimizar los recursos computacionales durante el procesamiento de los datos espectrales y evitar desfases tanto en las dimensiones como en la integración de recursos externos como modelos digitales de elevación (*digital elevation model*, DEM), necesarios para un tratamiento posterior, las imágenes fueron recortadas al área de las lagunas de interés (véase Fig. 2). El redimensionamiento se realizó empleando las siguientes coordenadas en la proyección Universal Transverse Mercator (UTM): X mínima = 681 195, Y mínima = 9 655 735; X máxima = 730 215, Y máxima = 9 717 145, lo que abarca un área manejable de 300 104,44 ha en comparación a la original.

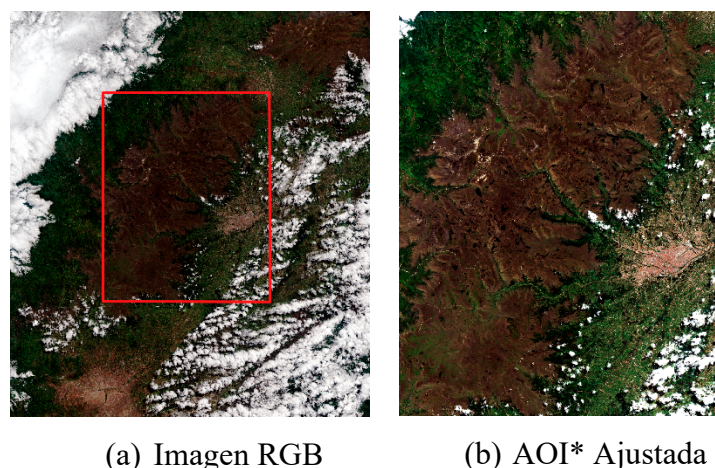


Fig. 2 Definición y recorte del área de interés. *area of interest (AOI)*

2.2.4. Proyección de sistema de coordenadas

Para gestionar correctamente todos los insumos del proyecto, como rásteres, shapefiles y DEM, es fundamental que todos compartan un mismo sistema de coordenadas; de lo contrario, pueden producirse desalineaciones de capas, cálculos sesgados y errores de topología. En este estudio, todos los insumos se proyectaron en el sistema EPSG: 32717 (WGS 84 / UTM zona 17S), elegido porque el área de estudio se encuentra en el hemisferio sur, entre los 84° y 78° Oeste según la división UTM. En el caso de que algún insumo, por ejemplo, el DEM no estaba reproyectado en su repositorio de origen, se lo proyectó manualmente con la herramienta “Cambiar SR” de QGIS, lo que garantizó coherencia y precisión en el análisis.

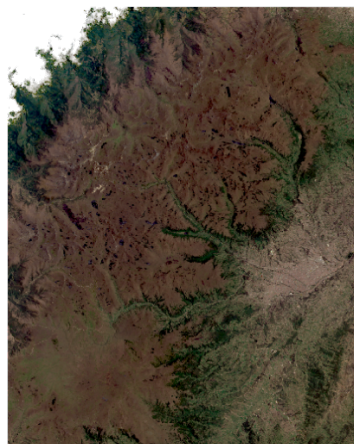
2.2.5. Correcciones topográficas

Las imágenes utilizadas en el estudio, Sentinel-2 Colección L2A, traen consigo correcciones atmosféricas propias de cada repositorio que disminuyen los efectos de la radiación atmosférica; sin embargo, fue necesario realizar una corrección topográfica ya que, según Santini y Palombo (2022), “en entornos montañosos, la corrección atmosférica debe incluir un nivel de corrección topográfica para compensar los efectos de la topografía que afectan fuertemente la señal remota”, lo que disminuye el efecto del relieve en las imágenes y mejora la precisión de los datos. Para ello se utilizó un script en R basado en el método de corrección Minnaert, método que fue diseñado originalmente para evaluar la rugosidad del regolito lunar (Minnaert, 1941) y que posteriormente se ha aplicado ampliamente a la corrección topográfica de imágenes terrestres (Sánchez-Llull et al., 2025) (véase Fig. 3). La

fórmula implementada en el script para la corrección de Minnaert, junto a sus componentes, se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1 Ecuación de corrección topográfica por el método de Minnaert

Formula	Componentes	Descripción
$J = c(\cos i)^k(\cos \epsilon)^{k-1}$	J	Brillo o intensidad específica que emite la superficie
	c	Constante empírica ligada al albedo del material
	i	Ángulo de incidencia entre la normal y el rayo solar ($\cos i$)
	e	Ángulo de emisión entre la normal y la dirección del sensor ($\cos \epsilon$)
	k	Éxponente de Minnaert ($0 \leq k \leq 1$) que describe la rugosidad / no-lambertianidad de la superficie



(a) Vista RGB



(b) Vista RGB corregida
(Método de Minnaert)

Fig. 3 Aplicación de la corrección topográfica de Minnaert en una imagen Sentinel-2.

2.3. Procesamiento

2.3.1. Segmentación Supervisada (Random Forest)

Se aplicó una clasificación supervisada utilizando el algoritmo Random Forest (Breiman, 2001) para delimitar el espejo de agua de las lagunas altoandinas. Para el conjunto de entrenamiento se delinearon manualmente cinco clases: agua, bosque, páramo, nubes e infraestructura sobre las 33 imágenes Sentinel-2 analizadas. Para evitar errores debido a la variabilidad de condiciones entre imágenes se evitó la reutilización de un único set de entrenamiento, se crearon polígonos de entrenamiento específicos para cada imagen, con ~ 30 polígonos por clase y un número variable de píxeles por polígono, permitiendo la variabilidad espectral de cada imagen. Este tamaño muestral cumple la regla práctica de disponer de al menos 10 muestras por variable predictora (Foody, 2002). Como predictores se usaron las bandas 2 (azul, 490 nm), 3 (verde, 560 nm), 4 (rojo, 665 nm), 8 (NIR, 842 nm), 11 (SWIR-1, 1 610 nm) y 12 (SWIR-2, 2 190 nm) de Sentinel-2, seleccionadas por su capacidad para diferenciar agua, vegetación y suelo. Además, se incorporó el NDWI, índice diseñado para realzar cuerpos de agua y minimizar la influencia de la vegetación (McFeeters, 1996), en consonancia con el objetivo principal de segmentar con precisión las lagunas de otros elementos del entorno altoandino.

Con el fin de implementar la segmentación supervisada, se elaboró un script en R que emplea el algoritmo random forest sobre las imágenes satelitales. Del total de polígonos disponibles, el 70 % se destinó al ajuste del modelo y el 30 % como conjunto de prueba para validación interna. Para garantizar la reproducibilidad, se fijó una semilla (37); posteriormente, se homogeneizaron las resoluciones mediante una grilla de 10 m para las bandas SWIR 1 y SWIR 2, cuya resolución nativa es de 20 m. Las bandas se apilaron en una capa multibanda con la función `c()` del paquete `terra` (Hijmans et al., 2025) y el modelo se entrenó con 250 árboles de decisión mediante `randomForest()` del paquete `randomForest` (Liaw & Wiener, 2002), tras evaluar distintos tamaños de bosque y seleccionar el punto en que la precisión dejaba de incrementarse de forma significativa frente al costo computacional.

El rendimiento del modelo se evaluó prediciendo el conjunto de prueba con la función `predict()` de la librería `randomForest`, generando la matriz de confusión con `table()` de R base, y calculando, a partir de ella, los índices de exactitud global y Kappa. Para la exactitud global, se consideró como referencia el estándar propuesto por Congalton y Green (2009), quienes

sugieren que un valor superior a 0,85 es aceptable para clasificaciones de uso y cobertura del suelo y para el índice Kappa, se utilizó la escala de interpretación de Landis y Koch (1977) (véase Tabla 2) para interpretar los resultados obtenidos. Los ráster resultantes se vectorizaron con la herramienta “Poligonizar (ráster a vectorial)” de QGIS; a continuación, se filtraron únicamente los polígonos de agua mediante clasificación por atributos. Tomando como referencia la capa hidrográfica de lagunas del Parque Nacional Cajas (IERSE, 2017), se depuró la cobertura irrelevante aplicando un buffer de 50 m y superponiendo capas con la herramienta “Intersección” de QGIS, lo que permitió descartar falsas detecciones, como sombras o espejos de agua menores. Por último, se corrigieron contornos y se eliminaron fragmentos aislados mediante edición manual, obteniéndose para cada año un mapa depurado de las áreas de agua, listo para el análisis multitemporal de la superficie lacustre.

Tabla 2 *Medidas de concordancia para datos categóricos. Fuente: Landis y Koch (1977).*

Estadística Kappa	Grado de Concordancia
< 0.00	Pobre
0.00 – 0.20	Leve
0.21 – 0.40	Regular
0.41 – 0.60	Moderado
0.61 – 0.80	Sustancial
0.81 – 1.00	Casi Perfecto

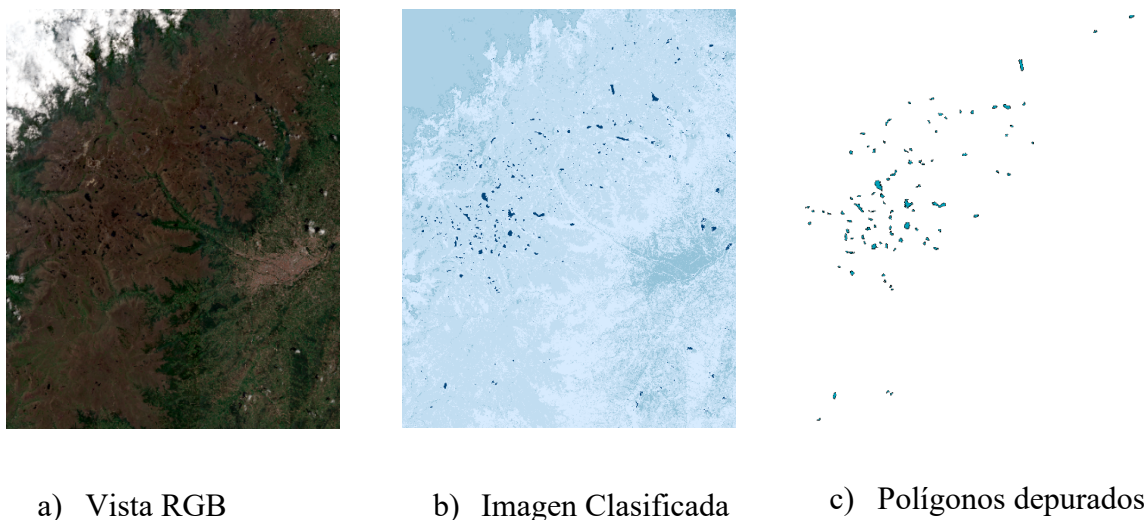


Fig. 4 *Proceso de clasificación supervisada por el método de Random Forest.*

2.3.2. Calculo de índices espectrales (NDVI)

Una vez depurados los mapas de las lagunas, se utilizaron para extraer los valores del índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI), ya que este índice mide la actividad fotosintética de la vegetación, como la clorofila presente en algas y plantas acuáticas, lo cual es importante para analizar las tendencias y posibles procesos de eutrofización de las lagunas a lo largo del tiempo. Diversos estudios han demostrado una correlación entre el NDVI y la clorofila presente en cuerpos de agua. Según Acharya y Ashwini (2019), los índices de vegetación, como el NDVI, están directamente asociados con la presencia de clorofila, lo que permite estimar la productividad del fitoplancton y detectar procesos de eutrofización en lagunas. De forma similar, León y Zárate (2024) encontraron que existe un vínculo entre la clorofila a de una masa de agua y el índice NDVI, lo que respalda su uso como indicador de la presencia de clorofila en lagunas altoandinas.

Para ello, se generó un script en R en el que se calculó el NDVI usando la fórmula correspondiente (véase Tabla 4), con sus respectivas bandas para Sentinel-2. Una vez hecho esto, utilizando la función `crop()` de la librería `terra` (Hijmans et al., 2025), se recortaron los mapas de NDVI según los límites de los polígonos de laguna. A continuación, con la función `pblapply()` de la librería `pbapply` (Solymos, 2023), se recorrió cada polígono individual y, en cada iteración, la función `extract()` de `terra` devolvió un data frame con los valores de NDVI de los píxeles contenidos en el área de dicho polígono.

En este proceso, se asignó un valor de peso a cada píxel, el cual representa la proporción entre el área de intersección del polígono y el área total del píxel, generando así un valor entre 0 y 1.

Para evitar sesgos introducidos por píxeles que solo cubren una pequeña fracción del polígono, se filtraron aquellos con un peso inferior a 0,5, eliminándolos del cálculo. Finalmente, sobre los valores restantes se calculó la media de los valores de NDVI para cada polígono (laguna) en cada imagen.

Tabla 3 *Formula del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).*

Satélite	Formula	Bandas	Descripción
Sentinel 2	NDVI	NIR = Banda 8	Sensible a los pigmentos de clorofila.
	$\frac{BANDA\ NIR - BANDA\ ROJA}{BANDA\ NIR + BANDA\ ROJA}$	ROJA = Banda 4	

2.4 Análisis estadístico

2.4.1. Consolidación de datos

Los valores de área y NDVI de cada laguna, extraídos de los shapefiles vectorizados y del cálculo del índice se agruparon en un libro de Excel para facilitar el análisis descriptivo posterior, manteniendo 4 columnas importantes: ID, Denominación, Valor (área o NDVI) y Fecha. Es importante mantener la coherencia entre los datos de los libros para un mejor manejo de los datos en R.

2.4.2. Estimación de Datos mediante el Filtro de Kalman

Con el fin de estimar valores faltantes en las series temporales, tanto del NDVI como del área, se generó un script en R en el que se empleó la función `na_kalman()` del paquete `imputeTS` (Moritz y Bartz-Beielstein, 2017). Esta función aplica el filtro de Kalman a toda la serie de datos de cada una de las lagunas, imputando y suavizando los valores faltantes a partir del análisis de las tendencias y la dinámica de los datos.

2.4.3. Análisis de tendencias con el test de Mann-kendall

A fin de evaluar la tendencia no paramétrica de Mann–Kendall, se empleó un script en R que utiliza la función `MannKendall()` del paquete `Kendall` (McLeod, 2011). Este método no paramétrico evalúa si en la serie temporal existe una tendencia monótona de incremento o de disminución a lo largo del tiempo, resultando apropiado para datos que no siguen una distribución normal. Calcula el coeficiente tau, que indica si la serie es creciente (valores positivos) o decreciente (valores negativos), y el p-valor, que se considera significativo si $p < 0,05$ y no significativo si $p > 0,05$.

2.4.4. Calculo de correlaciones por el método de Spearman

Finalmente, para determinar las correlaciones entre el NDVI promedio y el área de la superficie lacustre, se utilizó la función `cor.test(..., method = "spearman")` de R Base para calcular el coeficiente rho (ρ) y el p-valor (p). Se considera que existe una correlación positiva significativa cuando $\rho > 0$ y $p < 0,05$, lo cual indica que al aumentar el NDVI, el área de la laguna también aumenta, y viceversa. Por otro lado, la correlación es negativa y significativa cuando $\rho < 0$ y $p < 0,05$, es decir, que un incremento en el NDVI se asocia con una disminución en el área y viceversa. Finalmente, si $p > 0,05$, la correlación se clasifica como no significativa, lo que significa que no existe una relación estadísticamente significativa entre el NDVI y el área.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

3.1. Análisis de los índices de Exactitud Global y Kappa

Una vez aplicada la segmentación supervisada por el método Random Forest en cada una de las imágenes, se obtuvieron valores superiores a 0.85 para la exactitud global y superiores a 0.81 para kappa en todos los casos (véase Tabla 3), derivados de sus respectivas matrices de confusión (véase Anexo II).

Tabla 4 *Exactitud global e índice Kappa derivados de matrices de confusión para imágenes.*

Fecha	Exactitud Global	Índice Kappa
2017-06-06	1	1
2017-07-16	1	1
2017-08-20	1	1
2017-11-18	0.9545	0.9402
2018-02-26	0.95	0.9371
2018-04-12	0.8718	0.8224
2018-07-01	0.9	0.8726
2018-07-16	0.9524	0.9398
2019-05-17	1	1
2019-06-26	1	1
2019-08-30	1	1
2019-12-13	0.9565	0.9444
2020-01-07	1	1
2020-02-06	1	1
2020-02-11	1	1
2020-06-10	1	1
2020-08-04	0.92	0.8975

2020-08-24	0.9615	0.9505
2020-11-02	1	1
2021-07-05	0.9565	0.9451
2021-12-27	1	1
2022-05-21	0.96	0.9487
2022-08-14	0.963	0.9524
2022-08-24	1	1
2022-09-08	1	1
2022-09-13	1	1
2023-06-20	0.9048	0.8793
2023-08-19	0.9545	0.9375
2023-08-24	0.9091	0.8857
2024-01-26	1	1
2024-09-12	0.9583	0.9446
2024-11-11	0.92	0.8988
2024-12-01	0.9615	0.9511

3.2. Análisis de la dinámica del área por laguna

A pesar de que el análisis total del área del espejo de agua de las lagunas se puede observar que existe una tendencia a decrecer aunque no significativa, sin embargo si se analiza las lagunas individualmente (vease Fig. 5) se determina que el 69.66 % tiene una tendencia estadísticamente no significativa, pero el restante 30.34 % si tiene una tendencia clara a decrecer los valores de tau fluctúa entre - 0.54 y - 0.24 con una significancia que varía entre 1.0726×10^{-5} y 0.049.

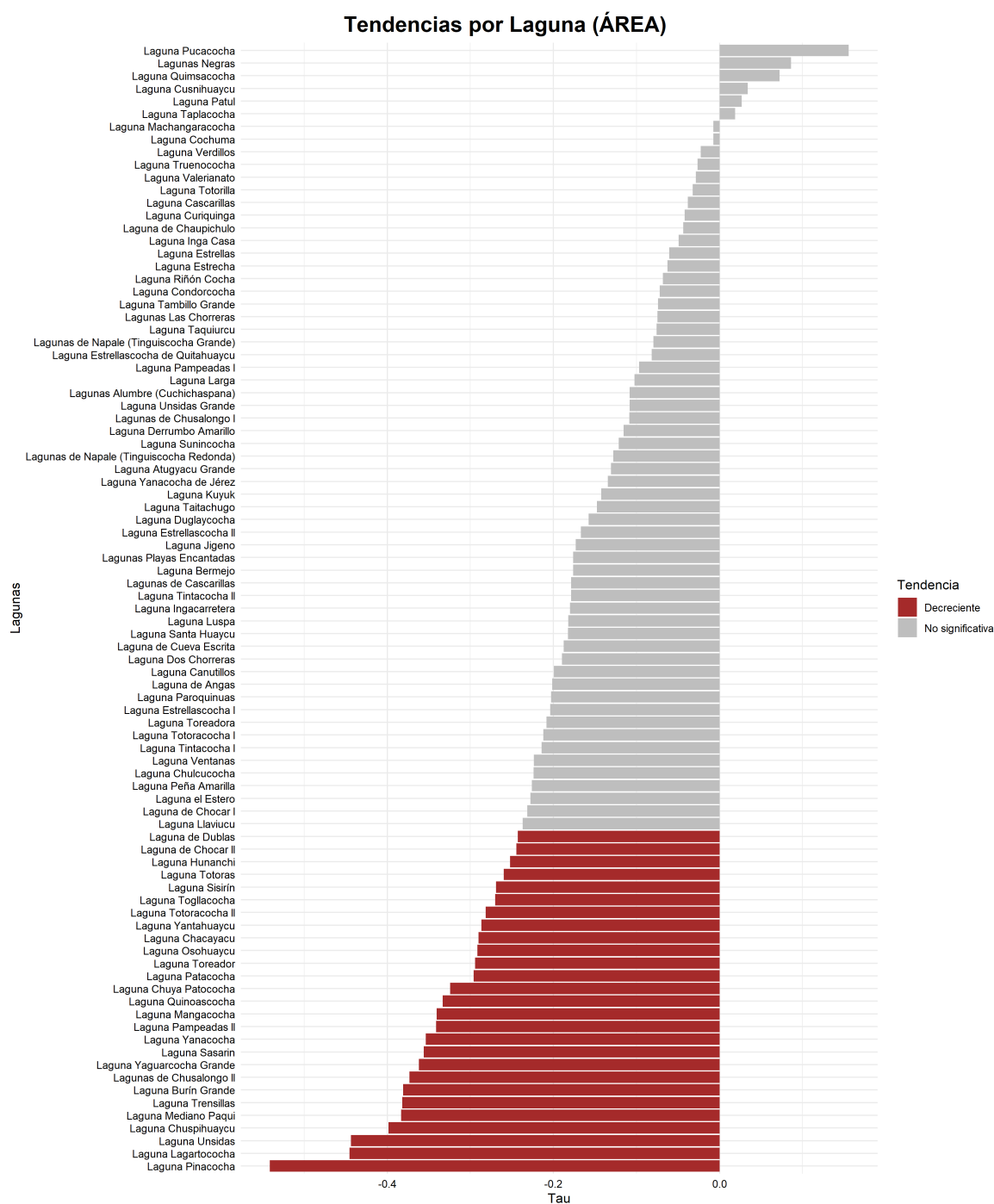


Fig. 5 Estadístico de tendencias tau para el área de cada laguna, codificado por color según su p-valor. Para los valores numéricos de tau y p-valores, véase el Anexo III.

3.3. Análisis de la tendencia del NDVI

La evaluación de la evolución del NDVI en cada laguna (véase Fig. 6) se determina que el 30,34 % de las lagunas experimentó un aumento significativo en sus valores de NDVI ($p < 0,05$), mientras que el 2,25 % presentó una disminución significativa ($p < 0,05$). El 67,41 % restante no evidenció cambios estadísticamente significativos ($p > 0,05$), lo que indica estabilidad en la producción primaria en las lagunas a lo largo del período de estudio.

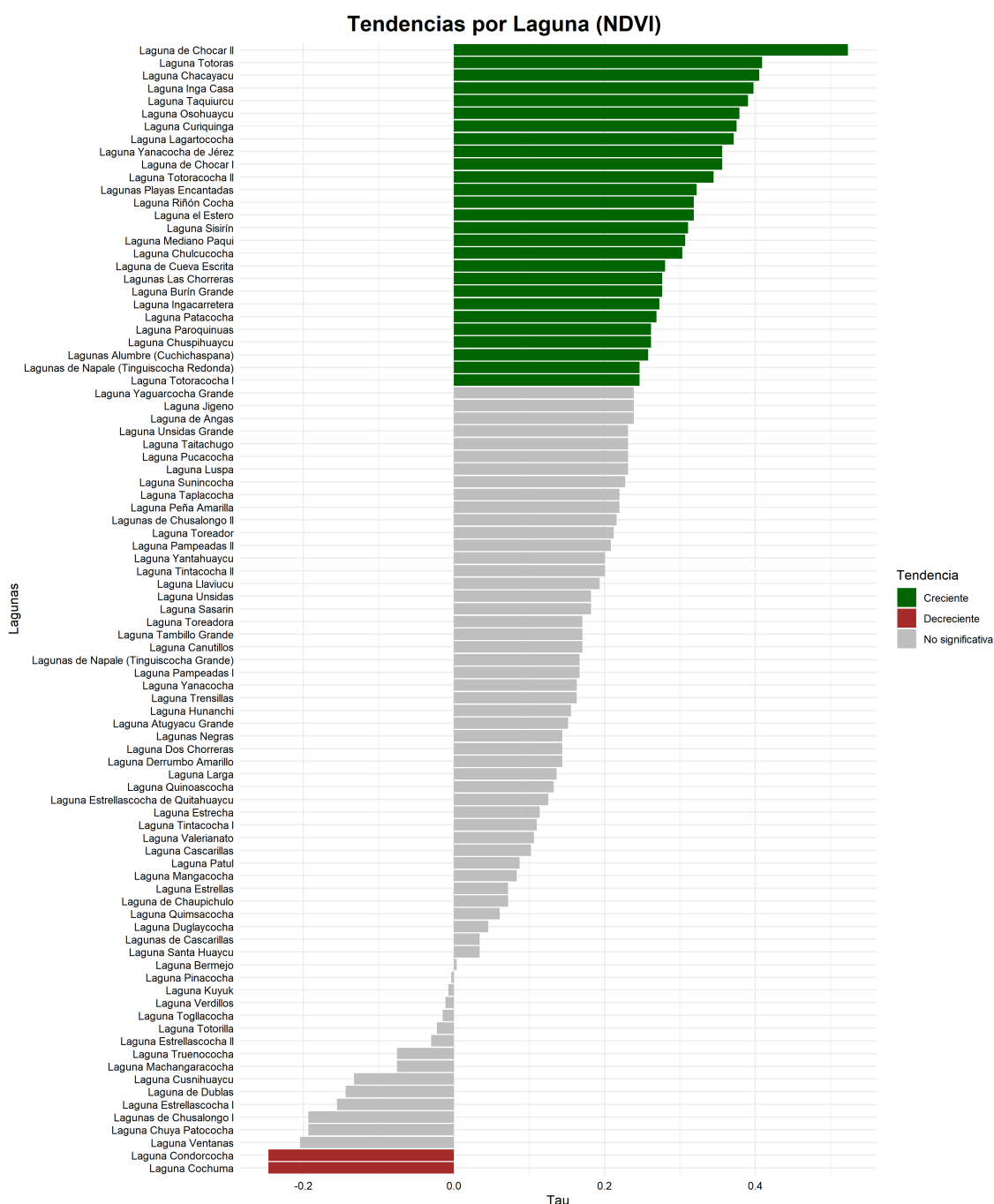


Fig. 6 Estadístico de tendencias tau para los valores de NDVI de cada laguna. codificado por color según su p-valor. Para los valores numéricos de tau y p-valores, véase el Anexo IV.

3.4. Correlaciones

Los coeficientes de correlación de Spearman entre NDVI y área (véase Fig. 7) muestran que en el 55,06 % de los casos existe una relación inversa significativa ($p < 0; p < 0,05$): cuando el NDVI aumenta, el área de la laguna tiende a disminuir, y viceversa. En el 44,94 % restante no se encontraron correlaciones estadísticamente significativas ($p > 0,05$), lo que sugiere ausencia de asociación clara entre ambas variables en esos casos.

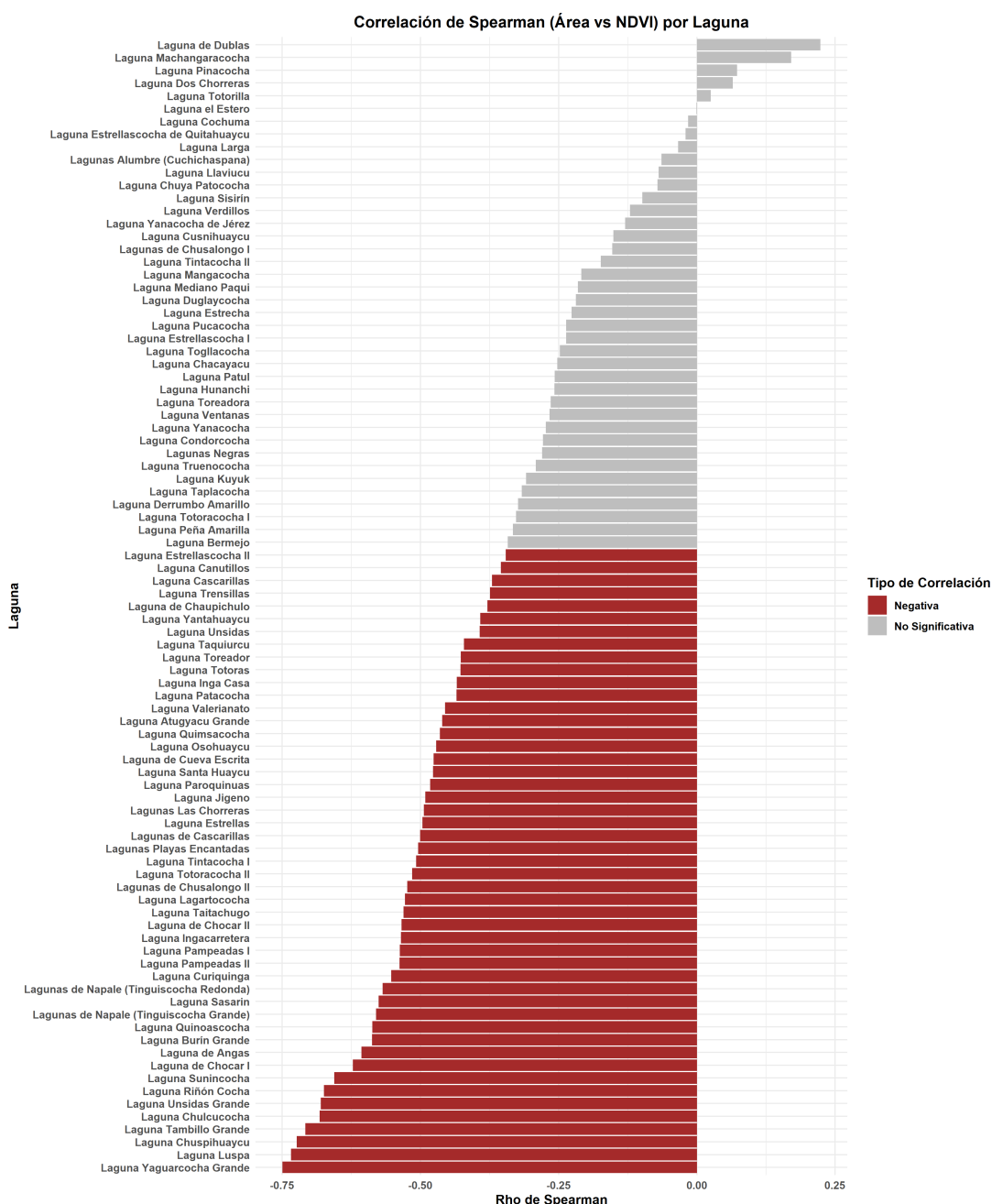


Fig. 7 Estadístico de correlación de spearman para los valores de Área con respecto al NDVI de cada laguna, codificado por color según su p-valor. Para los valores numéricos de tau y p-valores, véase el Anexo V.

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN

El análisis individual de las 89 lagunas altoandinas del Macizo del Cajas evidenció que aproximadamente el 30,3 % de ellas presentó una reducción estadísticamente significativa de su área (τ entre $-0,54$ y $-0,24$; $p < 0,05$). Se identificaron 27 lagunas con disminuciones estadísticamente significativas de área. Entre ellas destacan Osohuaycu, Lagartococha, Quinoascocha y Burín Grande por su tamaño, accesibilidad y servicios ecosistémicos (Ministerio del Ambiente, 2018). Son las que más recursos reciben para su estudio; sin embargo, deberían destinarse recursos y esfuerzos de conservación futuros para las restantes 23 lagunas que presentan esta tendencia clara a disminuir, ya que en conjunto concentran aproximadamente 233 ha de superficie. La desaparición de esta extensión implicaría perder una porción considerable del volumen total de agua del ecosistema, mientras que el 69,7 % restante no mostró cambios significativos (Fig. 5). Según el Plan Nacional del Agua (Ministerio del Ambiente, 2014), los recursos de agua superficial se generan a partir de la precipitación y la escorrentía superficial, sin aportes subterráneos apreciables.

Al mismo tiempo, el NDVI promedio calculado indicó que el 30,3 % de las lagunas aumentó, siendo estas 27 lagunas que mostraron tendencias significativamente crecientes en su NDVI medio. Las más destacadas con NDVI creciente fueron Osohuaycu, Lagartococha, Burín Grande y Riñón Cocha. Este resultado sugiere existe un proceso de eutrofización, que podría ser natural o inducida, en ausencia de impactos antrópicos, la posible eutrofización de las lagunas ocurre en escalas de miles de años, según Cortés et al. (2021) encontraron que los lagos someros, con gran proporción de agua expuesta a sedimentos, son especialmente vulnerables a la resuspensión interna de nutrientes y, por tanto, a procesos eutróficos acelerados. Congressional Research Service (2020) afirma que, incluso pequeños aumentos de fósforo pueden conducir a aumentos muy rápidos en el crecimiento de algas. En un 2,3 % del total de lagunas se observa que el NDVI disminuye; estos casos pueden ser considerados anómalos, que merecen atención, las lagunas Cóndorcocha y Cochuma mostraron NDVI decreciente, lo que puede indicar que factores como contaminantes externos y puntuales para el área podrían afectar la producción primaria. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de estudios in situ para interpretar adecuadamente las dinámicas de estos lagos. Finalmente, un 67,4 % no tuvo cambios estadísticamente significativos (Fig. 6). Estos incrementos del NDVI son indicativos

de procesos de eutrofización. Estudios en lagunas del Cajas han demostrado que el NDVI se correlaciona positivamente con la concentración de clorofila-a (León y Zárate, 2024).

Además, al analizar las correlaciones entre el NDVI y el área, en el 55,1 % de los cuerpos de agua se observó una correlación inversa significativa ($\rho < 0$; $p < 0,05$) (Fig. 7). Es decir, en esas lagunas, el aumento de la biomasa de productores primarios reflejado en el NDVI está relacionado con una disminución de la superficie y profundidad de agua. Este patrón coincide con observaciones en otros lagos de montaña. Van Colen et al. (2017) registraron que, en la laguna Yahuarcocha (Ecuador), las floraciones de cianobacterias se intensifican con niveles poco profundos de agua. En contraste, el 44,9 % restante, correspondiente a lagunas con mayor área, no mostró una relación NDVI/área significativa.

Los datos presentados en este estudio podrían deberse a varios factores, entre los cuales está el cambio climático. En lagunas altoandinas ya se han registrado aumentos de temperatura del aire y del agua, acompañados por descensos en el nivel lacustre (Michelutti et al., 2015). Esto implica menor precipitación neta y mayor evaporación en las zonas altas, tendiendo a reducir las láminas de agua de las lagunas. Además, fenómenos como El Niño regulan la disponibilidad hídrica, lo que puede aumentar la precipitación en regiones andinas, y La Niña puede intensificar la sequedad estacional.

Otro factor que puede influir son las actividades antropogénicas, como el pastoreo de ganado. Un estimador semicuantitativo de la abundancia de ganado en las inmediaciones fue el mejor predictor de las concentraciones de clorofila-a en 30 lagunas del Parque Nacional Cajas, lo que sugiere que la intensificación del pastoreo podría deteriorar la calidad del agua y favorecer procesos de eutrofización (Van Colen et al., 2018). Otro factor es el turismo, como lo demuestra Senetra et al. (2020): los lagos alpinos presentan una alta sensibilidad trófica, de modo que incluso pequeños aportes de compuestos biogénicos pueden alterar su equilibrio ecológico, y nuestros resultados muestran que la presión turística potencia el crecimiento de vegetación sumergida al enriquecer el agua con nutrientes, un proceso típico de eutrofización. Las lagunas altoandinas son ecosistemas estratégicos de alta biodiversidad y servicios hídricos esenciales. La reducción de su área implica la pérdida de hábitat para especies endémicas, anfibios y aves migratorias.

REFERENCIAS

Acharya, S. K., & Ashwini, T. P. (2019). A study on estimation of phytoplankton-chlorophyll level in lakes by NDVI sensor based system. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 7(10), Article NCRACES-2019. <https://www.ijert.org/a-study-on-estimation-of-phytoplankton-chlorophyll-level-in-lakes-by-ndvi-sensor-based-system>

Amgoth Ashok, R., Rani, H. P., & Jayakumar, K. V. (2021). Monitoring of dynamic wetland changes using NDVI and NDWI based landsat imagery. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 23, 100547. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100547>

Congalton, R. G., & Green, K. (2009). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices* (2^a ed.). CRC Press

Cooke, G. D., Welch, E. B., Peterson, S. A., & Nichols, S. A. (2005). *Restoration and management of lakes and reservoirs* (3^a ed.). CRC Press.

European Space Agency. (2024). *Sen2Cor: Sentinel-2 Level 2A Processor* [Software]. <https://step.esa.int/main/snap-supported-plugins/sen2cor/>

ETAPA. (2018). *Actualización del plan de manejo del Parque Nacional Cajas* [Informe técnico]. ETAPA

ETAPA. (s. f.). Un territorio creador de valores para el desarrollo sostenible declarado por la UNESCO el 29 de mayo de 2013 [Nota informativa]. Recuperado el 19 de mayo de 2025 de <https://www.etapa.net.ec/gestion-ambiental/desarrollo-sustentable/macizo-del-cajas/>

ETAPA EP. (2011). *Propuesta para la declaratoria de la reserva de biósfera dirigida a la UNESCO denominada: Área de Biósfera Macizo del Cajas* [Informe técnico]. ETAPA EP

ETAPA EP. (2012). *Propuesta para la declaratoria de la Reserva de Biósfera dirigida a la UNESCO denominada: Área de Biósfera Macizo del Cajas* [Informe técnico]. ETAPA EP

ETAPA EP. (s. f.). Parque Nacional Cajas [Sección web]. En *Gestión Ambiental – ETAPA EP*. Recuperado el 19 de mayo de 2025 de <https://www.etapa.net.ec/gestion-ambiental/parque-nacional-cajas/>

ETAPA EP. (s. f.). *Parque Nacional Cajas*. Recuperado el 1 de junio de 2025, de <https://www.etapa.net.ec/gestion-ambiental/parque-nacional-cajas/>

Hijmans, R. J., Etten, J., Cheng, J., Mattiuzzi, M., Sumner, M., Greenberg, J. A., Lamigueiro, O. P., Bevan, A., Racine, E. B., Shortridge, A., & Hijmans, M. J. (2021). *terra: Spatial data analysis* (versión 1.5-12) [Paquete de R]. The Comprehensive R Archive Network (CRAN). <https://cran.r-project.org/package=terra>

Hijmans, R. J. (2025). *terra: Spatial data analysis* (versión 1.8-42) [Paquete de R]. The Comprehensive R Archive Network (CRAN). <https://cran.r-project.org/package=terra>

Hutchinson, G. E. (1957). *A Treatise on Limnology: Biology of Lakes and Rivers (Vol. 1, Part 2: Chemistry of Lakes, cap. "The Phosphorus Cycle in Lakes", pp. 727–751)*. John Wiley & Sons.

Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador. (2017). *Mapa hidrológico* [Archivo vectorial shapefile].

Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2012). *Clasificador Geográfico Estadístico – DPA* [Archivo vectorial shapefile]. Recuperado de https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Geografia_Estadistica/Micrositio_geoportal/

Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159–174. <https://doi.org/10.2307/2529310>

León Jara, M. P., & Zárate Hugo, E. J. (2024). *Caracterización bio-óptica de lagunas del Macizo del Cajas mediante la determinación de niveles de clorofila e índice de vegetación normalizado (NDVI)* [Tesis de grado, Universidad del Azuay]. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/14547/1/20065.pdf>

Liaw, A., & Wiener, M. (2002). Classification and Regression by randomForest. *R News*, 2(3), 18–22. Recuperado de <https://cran.r-project.org/doc/Rnews/>

Llodrà-Llabrés, J., Martínez-López, J., Postma, T., Pérez-Martínez, C., & Alcaraz-Segura, D. (2023). Retrieving water chlorophyll-a concentration in inland waters from

Sentinel-2 imagery: Review of operability, performance and ways forward. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 125, 103605. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103605>

McFeeters, S. K. (1996). The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

McLeod, A. I. (2011). *Kendall: Kendall rank correlation and Mann-Kendall trend test* [Paquete de R]. CRAN. <https://cran.r-project.org/package=Kendall>

Michelutti, N., Wolfe, A. P., Cooke, C. A., Hobbs, W. O., Vuille, M., & Smol, J. P. (2015). *Climate change forces new ecological states in tropical Andean lakes*. **PLOS ONE**, 10(2), e0115338.

Ministerio del Ambiente. (2014). *Plan Nacional de la Gestión Integrada e Integral de los Recursos Hídricos de las Cuencas y Microcuencas Hidrográficas de Ecuador*. <https://suia.ambiente.gob.ec/files/MEMORIA%20PLAN%20NACIONAL%20DEL%20AGUA.pdf>

Ministerio del Ambiente. (2018). *Acuerdo 001 Anexo Parque Nacional Cajas* [PDF]. Recuperado de <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/03/ACUERDO-001-ANEXO-PAQUE-NACIONAL-CAJAS.pdf>

Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (s. f.). *El Macizo del Cajas es la quinta reserva de biosfera del Ecuador* [Nota de prensa]. Recuperado el 19 de mayo de 2025 de <https://www.ambiente.gob.ec/el-macizo-del-cajas-es-la-quinta-reserva-de-biosfera-del-ecuador/>

Ministerio del Ambiente. (2018). *Actualización del Plan de Manejo del Parque Nacional Cajas: Documento final*. Ministerio del Ambiente del Ecuador. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/03/ACUERDO-001-ANEXO-PAQUE-NACIONAL-CAJAS.pdf>

Minnaert, M. (1941). The reciprocity principle in lunar photometry. *The Astrophysical Journal*, 93, 403–410. <https://doi.org/10.1086/144279>

Moritz, S., & Bartz-Beielstein, T. (2017). *imputeTS: Time series missing value imputation in R*. *The R Journal*, 9(2), 199–211. <https://doi.org/10.32614/RJ-2017-019>

Oleksy, I. A., Baron, J. S., Leavitt, P. R., & Spaulding, S. A. (2020). Nutrients and warming interact to force mountain lakes into unprecedented ecological states. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 287(20200304). <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.0304>

OpenStreetMap contributors. (2025). *Mapa del Ecuador* [Mapa]. OpenStreetMap. Recuperado el 27 de marzo de 2025 de <https://www.openstreetmap.org>

Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503–510. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>

Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418–422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>

QGIS Development Team. (2025). *QGIS Geographic Information System* (versión 3.36) [Software]. Open Source Geospatial Foundation. <https://qgis.org>

Rouse, J. W., Jr., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation (Progress Report RSC-1978-1; NASA N73-26315). Remote Sensing Center, Texas A&M University.

Santini, F., & Palombo, A. (2022). Impact of topographic correction on PRISMA, Sentinel-2 and Landsat-8 images. *Remote Sensing*, 14(16), 3903. <https://doi.org/10.3390/rs14163903>

Solymos, P., Zawadzki, Z., & Bengtsson, H. (2023). *pbapply: Adding progress bar to “apply” functions* (versión 1.7-2) [Paquete de R]. The Comprehensive R Archive Network (CRAN). <https://cran.r-project.org/package=pbapply>

Van Colen, W., Portilla, K., Oña, T., Wyseure, G., Goethals, P., Velarde, E., & Muylaert, K. (2017). Limnology of the neotropical high elevation shallow lake Yahuarcocha (Ecuador) and challenges for managing eutrophication using biomanipulation. *Limnologica*, 67, 37-44.

Van Colen, W., Mosquera, P. V., Hampel, H., & Muylaert, K. (2018). *Link between cattle and the trophic status of tropical high mountain lakes in páramo grasslands in Ecuador*. *Limnology and River Management*, 23, 303-312. <https://doi.org/10.1111/lr.12237>

Withers, P. J. A., Neal, C., Jarvie, H. P., & Doody, D. G. (2014). Agriculture and eutrophication: Where do we go from here? *Sustainability*, 6(9), 5853–5875. <https://doi.org/10.3390/su6095853>.

ANEXO I

Inventario georreferenciado de lagunas altoandinas: elevación, coordenadas y área (ha)

ID	Denominación	Elevación	Coordenada	Coordenada	Área
		msnm	Este (X)	Norte (Y)	(ha)
L001	Laguna Luspa	3787	693270.33	9689577.7	77.31
L002	Laguna Osohuaycu	3855	697085.03	9687092.76	66.33
L003	Laguna Taitachugo	3501	701268.17	9686856.96	56.57
L004	Laguna Machangaracocha	3840	711927.27	9705411.28	52.32
L005	Laguna Lagartococha	3980	697034.95	9684326.31	46.52
L006	Laguna Sunincocha	3880	690764.53	9686723.42	40.44
L007	Laguna Taplacocha	3700	710036.73	9699856.8	36.78
L008	Laguna Ventanas	3911	692710.81	9681598.54	34.16
L009	Laguna Truenococha	3906	687559.17	9662086.84	24.72
L010	Laguna Larga	3940	695360.59	9691052.53	23.13
L011	Laguna Sisirín	3980	694490.71	9697968.59	23.00
L012	Laguna de Dublas	3880	689050.28	9682848.34	21.67
L013	Laguna Jigeno	4033	689852.58	9678138.49	20.91
L014	Laguna Chulcucocha	3834	708486.2	9699845.08	19.37
L015	Laguna Hunanchi	3820	696185.39	9682437.29	19.25
L016	Laguna Llaviucu	3140	706044.55	9685612.83	19.00
L017	Laguna Toreadora	3910	697424.98	9692619.26	18.46
L018	Laguna Canutillos	3876	693756.91	9688211.99	18.29
L019	Laguna el Estero	3612	726318.2	9711705.89	18.26
L020	Laguna Dos Chorreras	3690	704552.41	9693639.09	16.66
L021	Laguna Inga Casa	3997	691953.41	9683921.61	16.02
L022	Lagunas Playas Encantadas	4071	689685.47	9693906.97	15.20
L023	Laguna Totoracocha I	3585	700752.51	9681333.19	15.15
L024	Laguna Unsidas Grande	3825	701369.01	9698889.38	14.90
L025	Laguna Pampeadas I	4116	692713.44	9694107.87	14.27
L026	Laguna Tintacocha I	3663	694320.43	9681692.03	14.23
L027	Laguna Verdillos	3780	694971.35	9683264.19	14.14
L028	Laguna Duglaycocha	3914	689258.22	9683636.74	13.98
L029	Laguna Yanacocha	3732	705569.37	9699186.02	13.83

L030	Laguna Cascarillas	4003	691228.45	9682850.89	13.02
L031	Lagunas de Napale (Tinguiscocha Grande)	3938	689728.71	9680774.21	12.93
L032	Laguna Sasarin	4020	700269.75	9700918.85	12.41
L033	Laguna Estrellas	3990	684293.16	9684645.72	12.15
L034	Laguna Estrellascocha de Quitahuaycu	4149	691258.14	9696360.67	11.85
L035	Laguna de Chocar I	3690	699681.62	9682580.02	11.52
L036	Laguna Pucacocha	3750	710305.74	9691021.63	11.52
L037	Laguna Peña Amarilla	3900	694841.29	9685381.46	11.20
L038	Laguna Atugyacu Grande	4000	688568.13	9685970.77	11.18
L039	Laguna Totoras	3820	698708.66	9692706.96	10.74
L040	Laguna Pinacocha	3860	712287.7	9700212.23	10.63
L041	Laguna Chuya Patococha	3762	721628.05	9709703.01	10.53
L042	Laguna Quinoascocha	3920	692452.94	9686180.04	10.45
L043	Laguna Valeriano	4040	689508.81	9684925.45	10.43
L044	Laguna Burín Grande	3866	698523.56	9689472.55	10.30
L045	Laguna Togllacocha	3860	694522.96	9690387.61	10.18
L046	Laguna Estrellascocha I	3819	693963.11	9677841.11	10.08
L047	Laguna de Chocar II	3870	698301.81	9683813.68	10.07
L048	Laguna Estrecha	3810	694833.29	9684049.74	9.97
L049	Laguna de Cueva Escrita	4040	692223.92	9685146.18	9.53
L050	Laguna Yantahuaycu	4071	684051.15	9686717.64	9.34
L051	Laguna Cusnihuaycu	3940	710018.22	9696134.36	9.31
L052	Laguna Chuspihuaycu	3475	701287.83	9683718.51	9.22
L053	Laguna Tintacocha II	3710	699292.1	9681999.77	9.05
L054	Laguna Toreador	3930	697530.63	9694291.43	8.75
L055	Laguna Quimsacocha	3778	694517.36	9662599.58	8.51
L056	Laguna Patul	3630	697345.4	9700396.17	8.31
L057	Laguna Derrumbo Amarillo	4000	692814.86	9684243.1	8.18
L058	Laguna Tambillo Grande	3838	689748.84	9687870.14	8.14
L059	Lagunas Alumbre (Cuchichaspana)	3940	695071.42	9686182.15	8.02
L060	Laguna de Chaupichulo	3875	699918.33	9697898.82	7.99
L061	Laguna Riñón Cocha	4021	696815.2	9694090.05	7.98
L062	Laguna Trensillas	4000	692625.41	9688509.12	7.88

L063	Laguna Mediano Paqui	3820	710703.15	9697346.05	7.86
L064	Laguna Bermejo	3819	694966.68	9662314.04	7.75
L065	Lagunas Las Chorreras	4081	690763.59	9688169.54	7.44
L066	Laguna Santa Huaycu	4024	684745.36	9686204.6	7.24
L067	Laguna Condorcocha	3829	685550.98	9658935.87	7.15
L068	Lagunas de Cascarillas	4014	691485.91	9682108.14	7.15
L069	Laguna Kuyuk	3930	704018.59	9699218.72	6.83
L070	Laguna Curiquinga	3850	708843.06	9691367.57	6.71
L071	Lagunas de Napale (Tinguiscocha Redonda)	3953	689192.94	9680871.38	6.67
L072	Laguna Patacocha	3620	695401.72	9681174.29	6.56
L073	Laguna Unsidas	3845	702070.84	9698418.21	6.51
L074	Laguna Ingacarretera	3860	693521.87	9682056.02	6.43
L075	Laguna Estrellascocha II	3780	694171.6	9677099.18	6.42
L076	Laguna Taquiurcu	3780	700288.13	9692814.26	6.39
L077	Laguna Totorascocha II	3944	697843.43	9686306.39	6.23
L078	Laguna Cochuma	4199	694055.44	9695268.92	6.16
L079	Laguna Yaguarcocha Grande	3842	688172.06	9678934.45	6.07
L080	Laguna Totorilla	4064	686066.76	9686140.48	6.03
L081	Laguna Mangacocha	3960	694008.18	9687293.22	5.97
L082	Laguna Paroquinuas	3790	699121.26	9692369.24	5.85
L083	Laguna Yanacocha de Jérez	4082	686887.87	9685881.26	5.78
L084	Lagunas Negras	3980	700827.59	9696650.98	5.76
L085	Laguna Chacayacu	3860	713450.76	9695143.98	5.74
L086	Lagunas de Chusalongo I	3772	694897.64	9676355.78	5.69
L087	Laguna Pampeadas II	4219	691956.78	9694698.42	5.66
L088	Laguna de Angas	4031	689836.41	9682641.16	5.62
L089	Lagunas de Chusalongo II	3741	695073.59	9675978.05	5.27

Anexo II

Matrices de confusión por fecha de adquisición para el conjunto de prueba (30 %)

2017-06-06	2017-07-16	2017-08-20	2017-11-18	2018-02-26	2018-04-12
1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5
5 0 0 0 0	1 0 0 0 0	4 0 0 0 0	5 0 0 0 0	4 0 0 0 0	2 0 0 0 0
0 5 0 0 0	0 3 0 0 0	0 3 0 0 0	0 6 0 0 0	0 3 0 0 0	0 6 0 0 0
0 0 4 0 0	0 0 9 0 0	0 0 6 0 0	0 0 6 0 0	0 0 5 0 0	2 0 16 0 0
0 0 0 2 0	0 0 0 2 0	0 0 0 2 0	0 1 0 3 0	0 0 0 4 0	0 1 0 4 0
0 0 0 0 2	0 0 0 0 4	0 0 0 0 4	0 0 0 0 1	0 0 0 1 3	0 0 0 1 6
2018-07-01	2018-07-16	2019-05-17	2019-06-26	2019-08-30	2019-12-13
1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5
3 0 0 0 0	5 0 0 0 0	7 0 0 0 0	5 0 0 0 0	6 0 0 0 0	6 0 0 0 0
0 3 0 0 0	0 4 0 0 0	0 4 0 0 0	0 3 0 0 0	0 5 0 0 0	0 5 0 0 0
0 0 6 0 0	0 0 3 0 0	0 0 4 0 0	0 0 3 0 0	0 0 3 0 0	0 0 2 0 0
0 0 0 4 0	0 0 0 3 0	0 0 0 6 0	0 0 0 5 0	0 0 0 6 0	0 0 0 5 0
0 0 0 2 2	0 0 0 1 5	0 0 0 0 2	0 0 0 0 5	0 0 0 0 4	0 0 0 1 4
2020-01-07	2020-02-06	2020-02-11	2020-06-10	2020-08-04	2020-08-24
1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5
6 0 0 0 0	6 0 0 0 0	6 0 0 0 0	6 0 0 0 0	6 0 0 0 0	6 0 0 0 0
0 4 0 0 0	0 3 0 0 0	0 5 0 0 0	0 5 0 0 0	2 4 0 0 0	0 5 0 0 0
0 0 4 0 0	0 0 3 0 0	0 0 6 0 0	0 0 3 0 0	0 0 6 0 0	0 0 2 0 0
0 0 0 6 0	0 0 0 7 0	0 0 0 3 0	0 0 0 4 0	0 0 0 2 0	0 0 0 5 0
0 0 0 0 3	0 0 0 0 4	0 0 0 0 5	0 0 0 0 5	0 0 0 0 5	0 0 0 1 7
2020-11-02	2021-07-05	2021-12-27	2022-05-21	2022-08-14	2022-08-24
1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5
4 0 0 0 0	6 0 0 0 0	7 0 0 0 0	6 1 0 0 0	6 1 0 0 0	6 0 0 0 0
0 3 0 0 0	0 5 0 0 0	0 4 0 0 0	0 6 0 0 0	0 6 0 0 0	0 5 0 0 0
0 0 4 0 0	0 0 3 0 0	0 0 5 0 0	0 0 6 0 0	0 0 5 0 0	0 0 5 0 0
0 0 0 5 0	0 0 0 4 1	0 0 0 6 0	0 0 0 3 0	0 0 0 2 0	0 0 0 6 0
0 0 0 0 5	0 0 0 0 4	0 0 0 0 2	0 0 0 0 3	0 0 0 0 7	0 0 0 0 2

<u>2022-09-08</u>	<u>2022-09-13</u>	<u>2023-06-20</u>	<u>2023-08-19</u>	<u>2023-08-24</u>	<u>2024-01-26</u>
<u>1 2 3 4 5</u>	<u>1 2 3 4 5</u>	<u>1 2 3 4 5</u>	<u>1 2 3 4 5</u>	<u>1 2 3 4 5</u>	<u>1 2 3 4 5</u>
5 0 0 0 0	7 0 0 0 0	5 0 0 0 0	3 1 0 0 0	4 1 0 0 0	6 0 0 0 0
0 5 0 0 0	0 6 0 0 0	0 3 0 0 0	0 2 0 0 0	0 3 0 0 0	0 3 0 0 0
0 0 4 0 0	0 0 6 0 0	0 0 4 0 0	0 0 8 0 0	0 0 5 0 0	0 0 3 0 0
0 0 0 7 0	0 0 0 1 0	0 0 0 5 0	0 0 0 7 0	0 0 0 5 0	0 0 0 7 0
0 0 0 0 1	0 0 0 0 5	0 0 0 2 2	0 0 0 0 1	0 0 0 1 3	0 0 0 0 4

<u>2024-09-12</u>	<u>2024-11-11</u>	<u>2024-12-01</u>
<u>1 2 3 4 5</u>	<u>1 2 3 4 5</u>	<u>1 2 3 4 5</u>
2 0 0 0 0	5 2 0 0 0	7 0 0 0 0
1 4 0 0 0	0 6 0 0 0	0 6 0 0 0
0 0 2 0 0	0 0 4 0 0	0 0 3 0 0
0 0 0 7 0	0 0 0 4 0	0 0 0 5 0
0 0 0 0 8	0 0 0 0 4	0 0 0 1 4

ANEXO III

Resultados del test de Mann–Kendall para la dinámica temporal del área por laguna

ID	Denominación	Tau	P - Valor	Tendencia
L001	Laguna Luspa	-0.18216	0.140934	No significativa
L002	Laguna Osohuaycu	-0.29167	0.017757	Decreciente
L003	Laguna Taitachugo	-0.14773	0.232842	No significativa
L004	Laguna Machangaracocha	-0.00759	0.962916	No significativa
L005	Laguna Lagartococha	-0.4455	0.000288	Decreciente
L006	Laguna Sunincocha	-0.12121	0.328991	No significativa
L007	Laguna Taplacocha	0.018939	0.889095	No significativa
L008	Laguna Ventanas	-0.22348	0.069856	No significativa
L009	Laguna Truenococha	-0.02652	0.840364	No significativa
L010	Laguna Larga	-0.10247	0.411418	No significativa
L011	Laguna Sisirín	-0.26894	0.02891	Decreciente
L012	Laguna de Dublas	-0.24288	0.049038	Decreciente
L013	Laguna Jigeno	-0.17317	0.162881	No significativa
L014	Laguna Chulcucocha	-0.22391	0.069788	No significativa
L015	Laguna Hunanchi	-0.25213	0.040805	Decreciente
L016	Laguna Llaviucu	-0.23697	0.054664	No significativa
L017	Laguna Toreadora	-0.20833	0.09124	No significativa
L018	Laguna Canutillos	-0.19943	0.106962	No significativa
L019	Laguna el Estero	-0.2277	0.065143	No significativa
L020	Laguna Dos Chorreras	-0.18975	0.124952	No significativa
L021	Laguna Inga Casa	-0.04924	0.698489	No significativa
L022	Lagunas Playas Encantadas	-0.1763	0.153967	No significativa
L023	Laguna Totoracocha I	-0.21212	0.085454	No significativa
L024	Laguna Unsidas Grande	-0.10826	0.385395	No significativa
L025	Laguna Pampeadas I	-0.09668	0.43845	No significativa
L026	Laguna Tintacocha I	-0.21422	0.082638	No significativa
L027	Laguna Verdillos	-0.02281	0.86459	No significativa
L028	Laguna Duglaycocha	-0.15765	0.203729	No significativa
L029	Laguna Yanacocha	-0.35361	0.004133	Decreciente
L030	Laguna Cascarillas	-0.03802	0.768349	No significativa
L031	Lagunas de Napale (Tinguiscocha Grande)	-0.07955	0.525252	No significativa
L032	Laguna Sasarin	-0.35606	0.003762	Decreciente
L033	Laguna Estrellas	-0.06072	0.630913	No significativa
L034	Laguna Estrellascocha de Quitahuaycu	-0.08152	0.515148	No significativa
L035	Laguna de Chocar I	-0.2315	0.060755	No significativa
L036	Laguna Pucacocha	0.155303	0.209462	No significativa
L037	Laguna Peña Amarilla	-0.22602	0.067378	No significativa
L038	Laguna Atugyacu Grande	-0.13081	0.291999	No significativa
L039	Laguna Totoras	-0.25972	0.035075	Decreciente
L040	Laguna Pinacocha	-0.54131	1.07E-05	Decreciente
L041	Laguna Chuya Patococha	-0.32417	0.008429	Decreciente
L042	Laguna Quinoascocha	-0.33333	0.006698	Decreciente
L043	Laguna Valerianato	-0.02844	0.828249	No significativa
L044	Laguna Burín Grande	-0.38104	0.00194	Decreciente

L045	Laguna Togllacocha	-0.26996	0.028833	Decreciente
L046	Laguna Estrellascocha I	-0.20401	0.100111	No significativa
L047	Laguna de Chocar II	-0.24455	0.047309	Decreciente
L048	Laguna Estrecha	-0.0628	0.61981	No significativa
L049	Laguna de Cueva Escrita	-0.18768	0.128854	No significativa
L050	Laguna Yantahuaycu	-0.2868	0.020072	Decreciente
L051	Laguna Cusnihuaycu	0.034091	0.792238	No significativa
L052	Laguna Chuspihuaycu	-0.39848	0.001199	Decreciente
L053	Laguna Tintacocha II	-0.17871	0.149395	No significativa
L054	Laguna Toreador	-0.2944	0.016987	Decreciente
L055	Laguna Quimsacocha	0.072106	0.566353	No significativa
L056	Laguna Patul	0.026566	0.840327	No significativa
L057	Laguna Derrumbo Amarillo	-0.11564	0.352487	No significativa
L058	Laguna Tambillo Grande	-0.07407	0.555861	No significativa
L059	Lagunas Alumbre (Cuchichaspana)	-0.10826	0.385356	No significativa
L060	Laguna de Chaupichulo	-0.04385	0.73296	No significativa
L061	Laguna Riñón Cocha	-0.06818	0.587609	No significativa
L062	Laguna Trensillas	-0.38177	0.001935	Decreciente
L063	Laguna Mediano Paqui	-0.3833	0.001839	Decreciente
L064	Laguna Bermejo	-0.1763	0.153967	No significativa
L065	Lagunas Las Chorreras	-0.07465	0.555386	No significativa
L066	Laguna Santa Huaycu	-0.18251	0.140806	No significativa
L067	Laguna Condorcocha	-0.07197	0.566446	No significativa
L068	Lagunas de Cascarillas	-0.17871	0.149362	No significativa
L069	Laguna Kuyuk	-0.14245	0.251382	No significativa
L070	Laguna Curiquinga	-0.04183	0.744773	No significativa
L071	Lagunas de Napale (Tinguiscocha Redonda)	-0.12774	0.305998	No significativa
L072	Laguna Patacocha	-0.29602	0.016296	Decreciente
L073	Laguna Unsidas	-0.44361	0.000338	Decreciente
L074	Laguna Ingacarretera	-0.18009	0.145213	No significativa
L075	Laguna Estrellascocha II	-0.16698	0.17755	No significativa
L076	Laguna Taquiurcu	-0.0759	0.54556	No significativa
L077	Laguna Totoracocha II	-0.28137	0.022681	Decreciente
L078	Laguna Cochuma	-0.0076	0.962907	No significativa
L079	Laguna Yaguarcocha Grande	-0.36191	0.003381	Decreciente
L080	Laguna Totorilla	-0.03235	0.804088	No significativa
L081	Laguna Mangacocha	-0.34063	0.005782	Decreciente
L082	Laguna Paroquinuas	-0.20284	0.100465	No significativa
L083	Laguna Yanacocha de Jérez	-0.1346	0.278037	No significativa
L084	Lagunas Negras	0.085963	0.494859	No significativa
L085	Laguna Chacayacu	-0.29005	0.018501	Decreciente
L086	Lagunas de Chusalongo I	-0.10868	0.385128	No significativa
L087	Laguna Pampeadas II	-0.34128	0.00577	Decreciente
L088	Laguna de Angas	-0.20152	0.10359	No significativa
L089	Lagunas de Chusalongo II	-0.37323	0.002603	Decreciente

ANEXO IV

Resultados del test de Mann–Kendall para la dinámica temporal del NDVI por laguna

ID	Denominación	Tau	P - Valor	Tendencia
L001	Laguna Luspa	0.231061	0.060817	No significativa
L002	Laguna Osohuaycu	0.378788	0.002047	Creciente
L003	Laguna Taitachugo	0.231061	0.060817	No significativa
L004	Laguna Machangaracocha	-0.07576	0.545656	No significativa
L005	Laguna Lagartococha	0.371212	0.002516	Creciente
L006	Laguna Sunincocha	0.227273	0.065207	No significativa
L007	Laguna Taplacocha	0.219697	0.074772	No significativa
L008	Laguna Ventanas	-0.20455	0.097337	No significativa
L009	Laguna Truenococha	-0.07576	0.545656	No significativa
L010	Laguna Larga	0.136364	0.271287	No significativa
L011	Laguna Sisirín	0.310606	0.01155	Creciente
L012	Laguna de Dublas	-0.14394	0.245203	No significativa
L013	Laguna Jigeno	0.238636	0.05277	No significativa
L014	Laguna Chulcucocha	0.30303	0.013754	Creciente
L015	Laguna Hunanchi	0.155303	0.209462	No significativa
L016	Laguna Llaviucu	0.193182	0.117598	No significativa
L017	Laguna Toreadora	0.170455	0.167894	No significativa
L018	Laguna Canutillos	0.170455	0.167894	No significativa
L019	Laguna el Estero	0.318182	0.009666	Creciente
L020	Laguna Dos Chorreras	0.143939	0.245203	No significativa
L021	Laguna Inga Casa	0.397727	0.001202	Creciente
L022	Lagunas Playas Encantadas	0.32197	0.00883	Creciente
L023	Laguna Totoracocha I	0.246212	0.045632	Creciente
L024	Laguna Unsidas Grande	0.231061	0.060817	No significativa
L025	Laguna Pampeadas I	0.166667	0.177654	No significativa
L026	Laguna Tintacocha I	0.109848	0.377138	No significativa
L027	Laguna Verdillos	-0.01136	0.938248	No significativa
L028	Laguna Duglaycocha	0.045455	0.721562	No significativa
L029	Laguna Yanacocha	0.162879	0.18783	No significativa
L030	Laguna Cascarillas	0.102273	0.41153	No significativa
L031	Lagunas de Napale (Tinguiscocha Grande)	0.166667	0.177654	No significativa
L032	Laguna Sasarin	0.181818	0.141029	No significativa
L033	Laguna Estrellas	0.07197	0.566446	No significativa
L034	Laguna Estrellascocha de Quitahuaycu	0.125	0.313869	No significativa
L035	Laguna de Chocar I	0.356061	0.003762	Creciente
L036	Laguna Pucacocha	0.231061	0.060817	No significativa
L037	Laguna Peña Amarilla	0.219697	0.074772	No significativa
L038	Laguna Atugyacu Grande	0.151515	0.22093	No significativa
L039	Laguna Totoras	0.409091	0.000864	Creciente
L040	Laguna Pinacocha	-0.00379	0.987638	No significativa
L041	Laguna Chuya Patococha	-0.19318	0.117598	No significativa
L042	Laguna Quinoascocha	0.132576	0.285018	No significativa
L043	Laguna Valerianato	0.106061	0.394107	No significativa
L044	Laguna Burín Grande	0.276515	0.02466	Creciente

L045	Laguna Togllacocha	-0.01515	0.91363	No significativa
L046	Laguna Estrellascocha I	-0.1553	0.209462	No significativa
L047	Laguna de Chocar II	0.522727	2.04E-05	Creciente
L048	Laguna Estrecha	0.113636	0.360627	No significativa
L049	Laguna de Cueva Escrita	0.280303	0.022746	Creciente
L050	Laguna Yantahuaycu	0.200758	0.103756	No significativa
L051	Laguna Cusnihuaycu	-0.13258	0.285018	No significativa
L052	Laguna Chuspihuaycu	0.261364	0.033776	Creciente
L053	Laguna Tintacocha II	0.200758	0.103756	No significativa
L054	Laguna Toreador	0.212121	0.085454	No significativa
L055	Laguna Quimsacocha	0.060606	0.630995	No significativa
L056	Laguna Patul	0.087121	0.485647	No significativa
L057	Laguna Derrumbo Amarillo	0.143939	0.245203	No significativa
L058	Laguna Tambillo Grande	0.170455	0.167894	No significativa
L059	Lagunas Alumbre (Cuchichaspana)	0.257576	0.036461	Creciente
L060	Laguna de Chaupichulo	0.07197	0.566446	No significativa
L061	Laguna Riñón Cocha	0.318182	0.009666	Creciente
L062	Laguna Trensillas	0.162879	0.18783	No significativa
L063	Laguna Mediano Paqui	0.306818	0.01261	Creciente
L064	Laguna Bermejo	0.003788	0.987638	No significativa
L065	Lagunas Las Chorreras	0.276515	0.02466	Creciente
L066	Laguna Santa Huaycu	0.034091	0.792238	No significativa
L067	Laguna Condorcocha	-0.24621	0.045632	Decreciente
L068	Lagunas de Cascarillas	0.034091	0.792238	No significativa
L069	Laguna Kuyuk	-0.00758	0.962925	No significativa
L070	Laguna Curiquinga	0.375	0.00227	Creciente
L071	Lagunas de Napale (Tinguiscocha Redonda)	0.246212	0.045632	Creciente
L072	Laguna Patacocha	0.268939	0.02891	Creciente
L073	Laguna Unsidas	0.181818	0.141029	No significativa
L074	Laguna Ingacarretera	0.272727	0.026712	Creciente
L075	Laguna Estrellascocha II	-0.0303	0.816215	No significativa
L076	Laguna Taquiurcu	0.390152	0.001491	Creciente
L077	Laguna Totoracocha II	0.344697	0.00504	Creciente
L078	Laguna Cochuma	-0.24621	0.045632	Decreciente
L079	Laguna Yaguarcocha Grande	0.238636	0.05277	No significativa
L080	Laguna Totorilla	-0.02273	0.864665	No significativa
L081	Laguna Mangacocha	0.083333	0.505245	No significativa
L082	Laguna Paroquinuas	0.261364	0.033776	Creciente
L083	Laguna Yanacocha de Jérez	0.356061	0.003762	Creciente
L084	Lagunas Negras	0.143939	0.245203	No significativa
L085	Laguna Chacayacu	0.405303	0.000966	Creciente
L086	Lagunas de Chusalongo I	-0.19318	0.117598	No significativa
L087	Laguna Pampeadas II	0.208333	0.09124	No significativa
L088	Laguna de Angas	0.238636	0.05277	No significativa
L089	Lagunas de Chusalongo II	0.215909	0.079969	No significativa

Anexo V

Resultados del análisis de correlación de Spearman entre área y NDVI por laguna

ID	Denominación	Rho	P - Valor	Correlación
L001	Laguna Luspa	-0.73396	2.95E-06	Negativa
L002	Laguna Osohuaycu	-0.47159	0.006088	Negativa
L003	Laguna Taitachugo	-0.53041	0.001744	Negativa
L004	Laguna Machangaracocha	0.170789	0.340536	No Significativa
L005	Laguna Lagartococha	-0.52807	0.00184	Negativa
L006	Laguna Sunincocha	-0.65575	5.22E-05	Negativa
L007	Laguna Taplacocha	-0.31684	0.072824	No Significativa
L008	Laguna Ventanas	-0.26671	0.133334	No Significativa
L009	Laguna Truenococha	-0.29144	0.099993	No Significativa
L010	Laguna Larga	-0.03409	0.850474	No Significativa
L011	Laguna Sisirín	-0.09893	0.582526	No Significativa
L012	Laguna de Dublas	0.223596	0.210177	No Significativa
L013	Laguna Jigeno	-0.49131	0.004094	Negativa
L014	Laguna Chulcucocha	-0.68215	2.05E-05	Negativa
L015	Laguna Hunanchi	-0.25769	0.147363	No Significativa
L016	Laguna Llaviucu	-0.06918	0.70114	No Significativa
L017	Laguna Toreadora	-0.26437	0.136872	No Significativa
L018	Laguna Canutillos	-0.35464	0.042861	Negativa
L019	Laguna el Estero	-0.00067	0.997778	No Significativa
L020	Laguna Dos Chorreras	0.065174	0.717767	No Significativa
L021	Laguna Inga Casa	-0.43449	0.012157	Negativa
L022	Lagunas Playas Encantadas	-0.50422	0.002772	Negativa
L023	Laguna Totoracocha l	-0.32721	0.063573	No Significativa
L024	Laguna Unsidas Grande	-0.68048	2.18E-05	Negativa
L025	Laguna Pampeadas l	-0.53743	0.001481	Negativa
L026	Laguna Tintacocha l	-0.50802	0.002875	Negativa
L027	Laguna Verdillos	-0.12083	0.502969	No Significativa
L028	Laguna Duglaycocha	-0.21892	0.220068	No Significativa
L029	Laguna Yanacocha	-0.27327	0.123861	No Significativa
L030	Laguna Cascarillas	-0.37085	0.033614	Negativa
L031	Lagunas de Napale (Tinguiscocha Grande)	-0.58055	0.000503	Negativa
L032	Laguna Sasarin	-0.57587	0.000569	Negativa
L033	Laguna Estrellas	-0.49632	0.003688	Negativa
L034	Laguna Estrellascocha de Quitahuaycu	-0.02072	0.909074	No Significativa
L035	Laguna de Chocar l	-0.62233	0.000153	Negativa
L036	Laguna Pucacocha	-0.2363	0.184902	No Significativa
L037	Laguna Peña Amarilla	-0.33289	0.058912	No Significativa
L038	Laguna Atugyacu Grande	-0.4609	0.007484	Negativa
L039	Laguna Totoras	-0.42781	0.013673	Negativa
L040	Laguna Pinacocha	0.072527	0.687388	No Significativa
L041	Laguna Chuya Patococha	-0.0712	0.693788	No Significativa
L042	Laguna Quinoascocha	-0.5869	0.000424	Negativa
L043	Laguna Valeriano	-0.45542	0.00774	Negativa
L044	Laguna Burín Grande	-0.58757	0.000416	Negativa

L045	Laguna Togllacocha	-0.24804	0.163989	No Significativa
L046	Laguna Estrellascocha I	-0.23634	0.185453	No Significativa
L047	Laguna de Chocar II	-0.53409	0.001601	Negativa
L048	Laguna Estrecha	-0.22679	0.204373	No Significativa
L049	Laguna de Cueva Escrita	-0.47627	0.005551	Negativa
L050	Laguna Yantahuaycu	-0.39208	0.024028	Negativa
L051	Laguna Cusnihuaycu	-0.15107	0.39982	No Significativa
L052	Laguna Chuspihuaycu	-0.7236	4.31E-06	Negativa
L053	Laguna Tintacocha II	-0.17367	0.333754	No Significativa
L054	Laguna Toreador	-0.42684	0.013239	Negativa
L055	Laguna Quimsacocha	-0.46491	0.006931	Negativa
L056	Laguna Patul	-0.25702	0.148444	No Significativa
L057	Laguna Derrumbo Amarillo	-0.32353	0.066742	No Significativa
L058	Laguna Tambillo Grande	-0.70817	4.02E-06	Negativa
L059	Lagunas Alumbre (Cuchichaspana)	-0.06401	0.723421	No Significativa
L060	Laguna de Chaupichulo	-0.37891	0.029665	Negativa
L061	Laguna Riñón Cocha	-0.67447	2.71E-05	Negativa
L062	Laguna Trensillas	-0.37433	0.032579	Negativa
L063	Laguna Mediano Paqui	-0.21524	0.228063	No Significativa
L064	Laguna Bermejo	-0.34191	0.052073	No Significativa
L065	Lagunas Las Chorreras	-0.4939	0.003488	Negativa
L066	Laguna Santa Huaycu	-0.47727	0.005442	Negativa
L067	Laguna Condorcocha	-0.27841	0.116661	No Significativa
L068	Lagunas de Cascarillas	-0.50054	0.003011	Negativa
L069	Laguna Kuyuk	-0.30882	0.080688	No Significativa
L070	Laguna Curiquina	-0.55307	0.000843	Negativa
L071	Lagunas de Napale (Tinguiscocha Redonda)	-0.56863	0.000555	Negativa
L072	Laguna Patacocha	-0.43483	0.012085	Negativa
L073	Laguna Unsidas	-0.39301	0.023665	Negativa
L074	Laguna Ingacarretera	-0.53543	0.001552	Negativa
L075	Laguna Estrellascocha II	-0.34559	0.049477	Negativa
L076	Laguna Taquiurcu	-0.42112	0.015346	Negativa
L077	Laguna Totoracocha II	-0.51529	0.002149	Negativa
L078	Laguna Cochuma	-0.01571	0.931189	No Significativa
L079	Laguna Yaguarcocha Grande	-0.74956	5.17E-07	Negativa
L080	Laguna Totorilla	0.024902	0.890592	No Significativa
L081	Laguna Mangacocha	-0.20909	0.24289	No Significativa
L082	Laguna Paroquinuas	-0.48262	0.004889	Negativa
L083	Laguna Yanacocha de Jérez	-0.13001	0.469275	No Significativa
L084	Lagunas Negras	-0.2801	0.114382	No Significativa
L085	Laguna Chacayacu	-0.25267	0.155612	No Significativa
L086	Lagunas de Chusalongo I	-0.15325	0.394502	No Significativa
L087	Laguna Pampeadas II	-0.53798	0.001242	Negativa
L088	Laguna de Angas	-0.60655	0.000183	Negativa
L089	Lagunas de Chusalongo II	-0.52367	0.001763	Negativa