



Universidad de Concepción  
Facultad de Ciencias Ambientales  
Ingeniería Ambiental

**Análisis de la relación entre la vegetación, temperatura y precipitación en las cuencas del Lago Conguillío y Laguna Verde utilizando el Índice de Diferencias Normalizadas de Vegetación (NDVI)**

Habilitación presentada para optar al título de

**Ingeniera Ambiental**

**Javiera Belén Silva Olave**

CONCEPCIÓN (Chile), 2025



Universidad de Concepción  
Facultad de Ciencias Ambientales  
Ingeniería Ambiental

**Análisis de la relación entre la vegetación, temperatura y precipitación en las cuencas del Lago Conguillío y Laguna Verde utilizando el Índice de Diferencias Normalizadas de Vegetación (NDVI)**

Habilitación presentada para optar al título de

**Ingeniera Ambiental**

**Alumno:** Javiera Belén Silva Olave

**Profesor(es) guía:** Dr. Victor Parra Ramírez

Dr. Pedro Arriagada Sanhueza

CONCEPCIÓN (Chile), 2025

**“Análisis de la relación entre la vegetación, temperatura y precipitación en las cuencas del Lago Conguillío y Laguna Verde utilizando el índice de Diferencias Normalizadas de Vegetación (NDVI)”**

**Profesor Guía: Dr. Victor Parra Ramírez**



**Profesor Guía: Dr. Pedro Arriagada Sanhueza**



**Profesor Comisión: Dr. Alberto Araneda Castillo**



**CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA**

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad: (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción: (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima: (En Escala de 5,7 a 7,0)

**Concepción, septiembre 2025**

## Índice

Resumen .....	1
Abstract .....	2
1. Introducción .....	3
Hipótesis o Pregunta de investigación.....	4
Objetivo General .....	4
Objetivos Específicos .....	4
2. Antecedentes.....	4
3. Metodología.....	12
4. Resultados.....	18
5. Discusión .....	33
6. Conclusiones .....	38
7. Referencias bibliográficas.....	40
8. Anexos .....	48

## Índice de Figuras

Figura 1. <i>Pilas de imágenes multiespectrales e hiperespectrales.</i> .....	8
Figura 2. <i>El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) refleja la actividad fotosintética (a); la variación del NDVI en un área cultivada refleja el estado de las plantas (b).</i> .....	10
Figura 3. <i>Ubicación del área de estudio.</i> .....	13
Figura 4. <i>Interpretación de los valores que entrega el coeficiente de correlación de Pearson (r).</i> .....	18
Figura 5. <i>Variación anual del área total del NDVI en Lago Conguillío (a) y Laguna Verde (b) entre 2005 y 2020.</i> .....	21
Figura 6. <i>Evolución espaciotemporal del NDVI en primavera para las cuencas del Lago Conguillío y Laguna Verde (2005–2024).</i> .....	23
Figura 7. <i>Evolución espaciotemporal del NDVI en verano para las cuencas del Lago Conguillío y Laguna Verde (2005–2024).</i> .....	24
Figura 8. <i>Comportamiento de la temperatura sobre el área total del NDVI en la cuenca del Lago Conguillío (a) y Laguna Verde (b) durante las estaciones de primavera y verano entre 2005-2020.</i> .....	26
Figura 9. <i>Comportamiento de la precipitación sobre el área total del NDVI en Lago Conguillío (a) y Laguna Verde (b) durante las estaciones de primavera y verano entre 2005-2020.</i> ..	27
Figura 10. <i>Correlación de Pearson entre la temperatura media y la cobertura de vegetación según su densidad en Lago Conguillío (a) y Laguna Verde (b).</i> .....	28
Figura 11. <i>Correlación de Pearson entre la precipitación y la cobertura de vegetación según su densidad en Lago Conguillío (a) y Laguna Verde (b).</i> .....	30
Figura 12. <i>Análisis de Componentes Principales (PCA) en Lago Conguillío (a) y Laguna Verde (b).</i> .....	32

## **Índice de Tablas**

Tabla 1. <i>Rangos de valores de NDVI y su interpretación según la literatura.</i> .....	10
Tabla 2. <i>Características de los satélites empleados en el estudio.</i> .....	14
Tabla 3. <i>Clasificación cualitativa de la vegetación según rangos de NDVI.</i> .....	15
Tabla 4. <i>Ubicación de los puntos con datos grillados dentro de las áreas de estudio.</i> .....	17
Tabla 5. <i>Disponibilidad temporal de imágenes satelitales por estación, mes y año (2005–2020).</i> .....	19

## Resumen

La Cordillera de los Andes alberga una notable biodiversidad y múltiples lagos de alto valor ecológico, los cuales presentan una elevada vulnerabilidad frente al cambio climático. Estos sistemas hídricos, frecuentemente localizados en áreas protegidas, enfrentan condiciones ambientales adversas que dificultan su estudio y monitoreo. Por ello, resulta fundamental aplicar metodologías indirectas para su análisis, como el estudio de la vegetación, estrechamente relacionada con procesos clave del balance hídrico, como la evapotranspiración. Bajo este contexto, se analizó la relación entre la cobertura vegetal y las variables climáticas de temperatura y precipitación en las cuencas del Lago Conguillío y Laguna Verde, ubicadas en el Parque Nacional Conguillío, Región de la Araucanía.

El análisis se centró en la estación de primavera (septiembre, noviembre, diciembre) y verano (diciembre, enero, febrero), entre los años 2005 y 2020, utilizando el Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) como indicador de la cobertura vegetal. La metodología consistió en el procesamiento de imágenes satelitales (Landsat 4-5, Landsat 8-9 y Sentinel 2) mediante el programa de información geográfica QGIS. A partir del NDVI se definieron 3 categorías de vegetación: (1) vegetación densa, (2) vegetación moderada y (3) vegetación dispersa. Adicionalmente, se realizó el Análisis de Correlación de Pearson y Análisis de Componentes Principales (PCA) a través del software R.

Los resultados mostraron una correlación positiva fuerte y significativa ( $R = 0,92$ ;  $p = < 2,2e-16$  para Lago Conguillío y  $R = 0,91$ ;  $p = < 2,2e-16$  para Laguna Verde) entre la temperatura media y la vegetación densa, lo que sugiere que un aumento de las temperaturas estivales favorece el desarrollo de coberturas vegetales más consolidadas. Por el contrario, la precipitación evidenció una correlación negativa moderada y significativa ( $R = -0,56$ ;  $p = 2,9e-06$  en Lago Conguillío y  $R = -0,58$ ;  $p = 9,9e-07$  en Laguna Verde) con el NDVI, especialmente durante la primavera, posiblemente debido a la nubosidad persistente, sobresaturación del suelo o cobertura nival. El análisis espaciotemporal permitió identificar un incremento gradual del NDVI en ambas cuencas, específicamente en la estación de primavera, mientras en verano parece no tener variaciones importantes. Finalmente, este estudio deja en evidencia que el uso de índices derivados de imágenes satelitales sigue siendo una herramienta eficaz y ampliamente utilizada, pero debe ser complementada con técnicas de monitoreo robustas y locales.

**Palabras clave:** NDVI, temperatura, precipitación, evapotranspiración, correlación, PCA.

## **Abstract**

The Andes Mountains host remarkable biodiversity and multiple lakes of high ecological value, which exhibit high vulnerability to climate change. These aquatic systems, often located in protected areas, face adverse environmental conditions that hinder their study and monitoring. Therefore, it is essential to apply indirect methodologies for their analysis, such as the study of vegetation, which is closely related to key processes of the water balance, such as evapotranspiration. Within this context, the relationship between vegetation cover and the climatic variables of temperature and precipitation was analyzed in the watersheds of Lake Conguillío and Laguna Verde, located in Conguillío National Park, Araucanía Region.

The analysis focused on the spring (september, november, december) and summer (December, January, February) seasons, between 2005 and 2020, using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) as an indicator of vegetation cover. The methodology consisted of processing satellite images (Landsat 4-5, Landsat 8-9, and Sentinel 2) through the geographic information software QGIS. Based on NDVI, three vegetation categories were defined: (1) dense vegetation, (2) moderate vegetation, and (3) sparse vegetation. Additionally, Pearson Correlation Analysis and Principal Component Analysis (PCA) were performed using R software.

The results showed a strong and significant positive correlation ( $R = 0,92$ ;  $p < 2,2e-16$  for Lake Conguillío and  $R = 0,91$ ;  $p < 2,2e-16$  for Laguna Verde) between average temperature and dense vegetation, suggesting that an increase in summer temperatures favors the development of more consolidated vegetation cover. Conversely, precipitation showed a moderate and significant negative correlation ( $R = -0,56$ ;  $p = 2,9e-06$  in Lake Conguillío and  $R = -0,58$ ;  $p = 9,9e-07$  in Laguna Verde) with NDVI, especially during spring, possibly due to persistent cloudiness, soil oversaturation, or snow cover. The spatiotemporal analysis allowed the identification of a gradual increase in NDVI in both watersheds, with this phenomenon being more evident in spring, while in summer it appeared to show no major variations. Finally, this study highlights that the use of indices derived from satellite imagery remains an effective and widely used tool, but it must be complemented with robust and local monitoring techniques.

**Key words:** NDVI, temperature, precipitation, evapotranspiration, correlation, PCA.

## 1. Introducción

La cordillera de los Andes es uno de los ecosistemas montañosos más importantes de Sudamérica, destacándose por su relevante rol en el ciclo hidrológico. Alberga numerosos glaciares y extensas cubiertas de nieve que actúan como reservorios naturales de agua, proporcionando este recurso de forma gradual a través de la escorrentía glaciar y nival. Siendo fundamentales para la recarga de aguas subterráneas, ríos y lagos, especialmente en temporada seca (Masiokas, 2019). En la Cordillera de los Andes se albergan los lagos Andinos, ecosistemas sensibles que dependen críticamente de estos procesos de acumulación y deshielo. El deshielo de la cordillera no solo sostiene a estos cuerpos de agua, sino que también es esencial para el sustento de la comunidad local, siendo uno de los principales contribuyentes para el riego, industrias y generación de energía (Cordero, 2024).

Por otro lado, la relevancia hidrológica de estos ecosistemas contrasta con su vulnerabilidad frente al cambio climático. Durante las últimas décadas, se ha evidenciado una notable reducción de la cobertura glaciar y nival en gran parte de los Andes. En los Andes Peruanos, los glaciares han perdido hasta un 56 % de su superficie en las últimas seis décadas (Aquino, M., 2023). En Chile, se registró un ascenso de la línea de nieve de entre 9,8 y 15,7 m por año en las cuencas del río Maipo y Aconcagua, proyectándose reducciones del 35 % al 42 % en la cobertura nival hacia 2050 (Dietz, 2025). Estos fenómenos responden a un aumento sostenido de las temperaturas y a la alteración de los patrones de precipitación en distintas zonas de la cordillera, modificando el ciclo hidrológico y afectando la disponibilidad hídrica.

La vegetación responde directamente a la disponibilidad hídrica en el suelo, por lo que su análisis se convierte en una alternativa para estimar de forma indirecta procesos clave como la evapotranspiración, uno de los principales componentes del balance hídrico. En ecosistemas de alta montaña, la vegetación responde con sensibilidad a las variaciones en las condiciones climáticas e hídricas. Sin embargo, el estudio y monitoreo de estos entornos representa un desafío considerable debido a la escasa presencia de estaciones meteorológicas, las condiciones climáticas adversas y la complejidad de acceso, lo que limita la obtención de datos continuos y de largo plazo. En este contexto, el uso de imágenes satelitales y de índices espectrales como el NDVI surge como una alternativa eficaz para observar y cuantificar los cambios en la cobertura vegetal.

Bajo este contexto, el presente estudio se centra en las cuencas del Lago Conguillío y Laguna Verde, ubicados en el Parque Nacional Conguillío, región de La Araucanía. Estos cuerpos de agua andinos han registrado una disminución estimada entre el 25 % y el 30 % de sus niveles hídricos en la última década, fenómeno atribuido principalmente a los efectos del cambio climático (24Horas, 2022). A través del análisis del NDVI y su relación con variables climáticas como la precipitación y la temperatura, se busca identificar tendencias relacionadas con el balance hídrico, la interacción con el cambio climático y la respuesta de la vegetación en estos ecosistemas de alta montaña.

### **Hipótesis o Pregunta de investigación**

Se espera que el aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones se correlacionen negativamente con el NDVI en las cuencas del Lago Conguillío y Laguna Verde, ubicadas en el parque Nacional Conguillío.

### **Objetivo General**

Analizar la relación entre la temperatura, precipitación y vegetación en las cuencas del Lago Conguillío y Laguna Verde, utilizando el NDVI como indicador de cobertura vegetal.

### **Objetivos Específicos**

Clasificar la vegetación espaciotemporal presente en las zonas de estudio a través del indicador NDVI.

Cuantificar la relación entre los valores de NDVI, temperatura y precipitación, mediante la aplicación de técnicas estadísticas.

## **2. Antecedentes**

### **2.1 Impacto del cambio climático en la Cordillera de los Andes y sus lagos**

La Cordillera de los Andes es una de las cadenas montañosas más largas y altas del mundo, con una altitud media de aproximadamente 4.000 metros y una extensión de 7.200 km a lo largo de América del Sur desde Venezuela hasta la Patagonia, atravesando siete países: Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Chile y Argentina. Este ecosistema montañoso alberga una extensa red de glaciares y coberturas de nieve que actúan como reservas naturales de agua dulce. La liberación progresiva de este almacenamiento a través de procesos de escorrentía glaciar y nival, son cruciales para la

recarga de aguas subterráneas, ríos y lagos, especialmente en temporada seca (Masiokas, 2019).

Dentro de esta región se encuentran los lagos Andinos, que además de su alto valor paisajístico, turístico y cultural, constituyen ecosistemas sensibles. Su caudal depende significativamente de la escorrentía glaciar y nival, reguladas por las bajas temperaturas y la altitud de la cordillera, representando las principales fuentes de alimentación (El Comercio, 2012). El deshielo de la cordillera no solo sostiene a estos cuerpos de agua esencial para el sustento de la comunidad local, siendo uno de los principales contribuyentes para el riego, industrias y generación de energía (Cordero, 2024). Esta fuerte dependencia a las condiciones hidrológicas los hace particularmente vulnerables a los efectos del cambio climático, ya que la alteración de los patrones de temperatura y precipitación podrían modificar significativamente los aportes hídricos que los sostienen.

El cambio climático ha provocado alteraciones significativas en las temperaturas y precipitaciones a lo largo de la Cordillera de los Andes, manifestándose de forma diferente según la zona climática, dividida principalmente en los Andes Tropicales (zona norte) y los Andes Meridionales (zona centro sur). En los Andes tropicales, que abarcan países como Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú, la temperatura media aumentó 8 °C durante el siglo XX. Mientras que, en los Andes meridionales, comprendido por los países de Chile y Argentina, se ha registrado un aumento entre 0,2 °C y 0,3 °C cada decenio. En cuanto a la precipitación, resulta difícil realizar proyecciones para toda la cordillera, debido a su heterogeneidad climática. No obstante, modelos climáticos indican un aumento de las precipitaciones durante la estación húmeda y una disminución en la estación seca en los Andes tropicales. Por el contrario, en los Andes meridionales, se prevén reducciones de hasta un 30 % (Schoolmeester, T. et al., 2018).

Esto ha impulsado el retroceso de los glaciares y la cobertura nival. Los glaciares andinos tropicales han experimentado una reducción del 42 % desde 1990, afectando principalmente a países como Perú, Bolivia y Ecuador, que son los que poseen una mayor cantidad de cobertura glaciar. Sin embargo, Chile que posee solo el 0,78% de glaciares tropicales, ha perdido hasta un 47,24 % de esta cobertura (Turpo Cayo et al., 2022). Por otro lado, la Cordillera de los Andes en Chile ha experimentado una reducción del 19 % por década en su cobertura de nieve desde 2001 hasta 2022. Esto ha resultado en reducciones significativas en los caudales, lo que ha afectado considerablemente el abastecimiento a ciudades como Santiago (Cordero et al., 2024).

## 2.2 La vegetación como clave para comprender la evapotranspiración y su impacto en el balance hídrico

Demostrar con precisión los efectos del cambio climático sobre la disponibilidad de los recursos hídricos en ecosistemas montañosos constituye un desafío significativo, ya que los lagos Andinos son especialmente sensibles a cambios mínimos en la temperatura y las precipitaciones (Fuentelba et al., 2021).

Un método fundamental para estudiar los efectos del cambio climático sobre un sistema hidrológico es a través de un balance hídrico. Este se basa en el principio de conservación de masa y permite estimar la entrada y salida de agua en un ecosistema. La representación matemática del balance hídrico se presenta en la Ecuación 1.

$$\frac{dS}{dt} = P - ET - ED - FS - FB \quad (1)$$

- $\frac{dS}{dt}$  = tasa de almacenamiento
- $P$  = precipitación
- $ET$  = evapotranspiración
- $ED$  = escorrentía directa
- $FS$  = flujo subsuperficial
- $FB$  = flujo base

La aplicación de este método puede ser complejo, ya que se requiere de información y datos precisos de sus distintas variables y componentes (procesos), tales como la precipitación, evapotranspiración, escorrentía directa, flujo subsuperficial o flujo base. Una alternativa ante esta dificultad es realizar un análisis temporal de variables o factores vinculados a los procesos involucrados en el balance hídrico y su relación con indicadores ambientales, como, por ejemplo, variaciones en la vegetación (Chang et al., 2015).

La vegetación desempeña un papel fundamental en la evapotranspiración, un proceso esencial para el balance hídrico de un sistema hidrológico, ya que, no solo determina la cantidad de agua que las plantas liberan al ambiente, sino que también refleja la demanda hídrica necesaria para su supervivencia. Variables como la precipitación y la temperatura influyen en las tasas de evapotranspiración, lo que a su vez afecta la disponibilidad de agua en los lagos Andinos (S & Joseph, 2023).

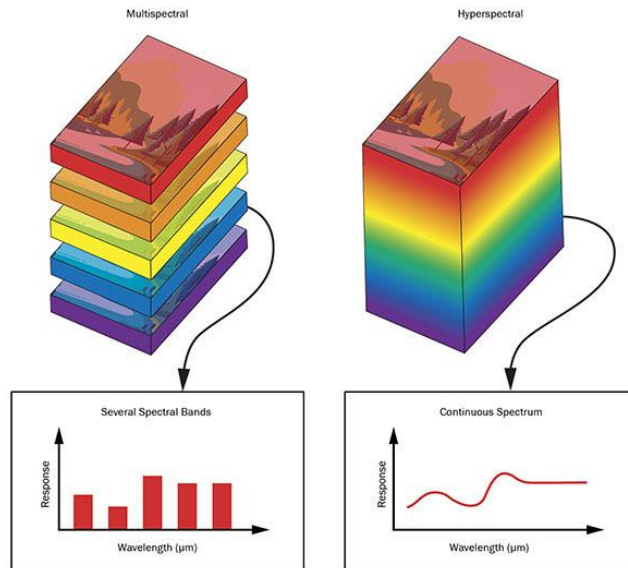
Analizar la vegetación permite de manera indirecta, estimar cambios en la evapotranspiración y su impacto en el balance hídrico. Además, identificar las zonas con mayores demandas hídricas puede aportar información clave sobre la capacidad de adaptación de la vegetación frente a condiciones climáticas cada vez más extremas.

### **2.3 Uso de imágenes satelitales y su potencial para el monitoreo ambiental en zonas de alta montaña**

El monitoreo de lagos Andinos representa un desafío significativo debido a las dificultades de acceso, las condiciones climáticas adversas y las limitaciones logísticas para la recolección de datos en terreno. Bajo esta situación, el uso de imágenes satelitales se destaca como una herramienta eficaz para el monitoreo ambiental.

Estas imágenes permiten capturar datos espectrales en rangos específicos del espectro electromagnético. Esto se debe a que los diferentes componentes de la superficie terrestre, como la vegetación, agua y el suelo, interactúan de manera única con la radiación electromagnética, reflejando o absorbiendo energía según su composición biofísica y la longitud de onda (O'Donohue, D., 2024). Lo que las convierte en una valiosa fuente de información para la construcción, planificación urbana, silvicultura, protección del medioambiente, respuesta a catástrofes, agricultura y otros sectores (Kogut, P., 2023).

Existen distintos tipos de imágenes satelitales según su resolución espectral. Las imágenes multiespectrales (MSI) capturan datos en varias bandas discretas del espectro, mientras que las hiperespectrales (HSI) registran información a lo largo de un continuo de longitudes de onda (Cotten-Martin, J., 2020). La Figura 1 ilustra la diferencia entre ambos tipos de imágenes.



**Figura 1.** Pilas de imágenes multiespectrales e hiperespectrales. Comparación de las pilas de imágenes en MSI, en la que se toman varias imágenes a través de varias regiones de longitud de onda discreta, y HSI, en la que las imágenes se toman en un rango continuo más grande de longitudes de onda.

**Fuente.** Cotten-Martin, J. (2020).

Las imágenes multiespectrales se diferencian de las hiperespectrales, debido a que ofrecen una cobertura espacial más amplia y una mayor disponibilidad de datos históricos, lo que facilita el análisis de tendencias a largo plazo. Además, su costo y accesibilidad son más favorables, ya que satélites como Landsat y Sentinel proporcionan datos gratuitos y de alta calidad, convirtiéndolas en una opción más viable para estudios de monitoreo ambiental (Kogut, P., 2024). Una de sus principales utilidades es la posibilidad de calcular índices espectrales mediante la diferencia en la reflectancia entre bandas específicas del espectro.

## 2.4 Índices espectrales

Existen numerosos índices que utilizan diferentes bandas del espectro electromagnético, cada uno con aplicaciones específicas según el contexto. Por ejemplo, el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI) es ampliamente utilizado para definir y monitorear los cambios en el contenido hídrico de cuerpos de agua superficiales. Este índice se calcula utilizando las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y la verde (GREEN), y ha demostrado ser efectivo para detectar variaciones en el nivel del agua en lagos, ríos y humedales, lo que resulta crucial en estudios hidrológicos y en la gestión de recursos hídricos (McFeeters, 1996; Xu, 2006).

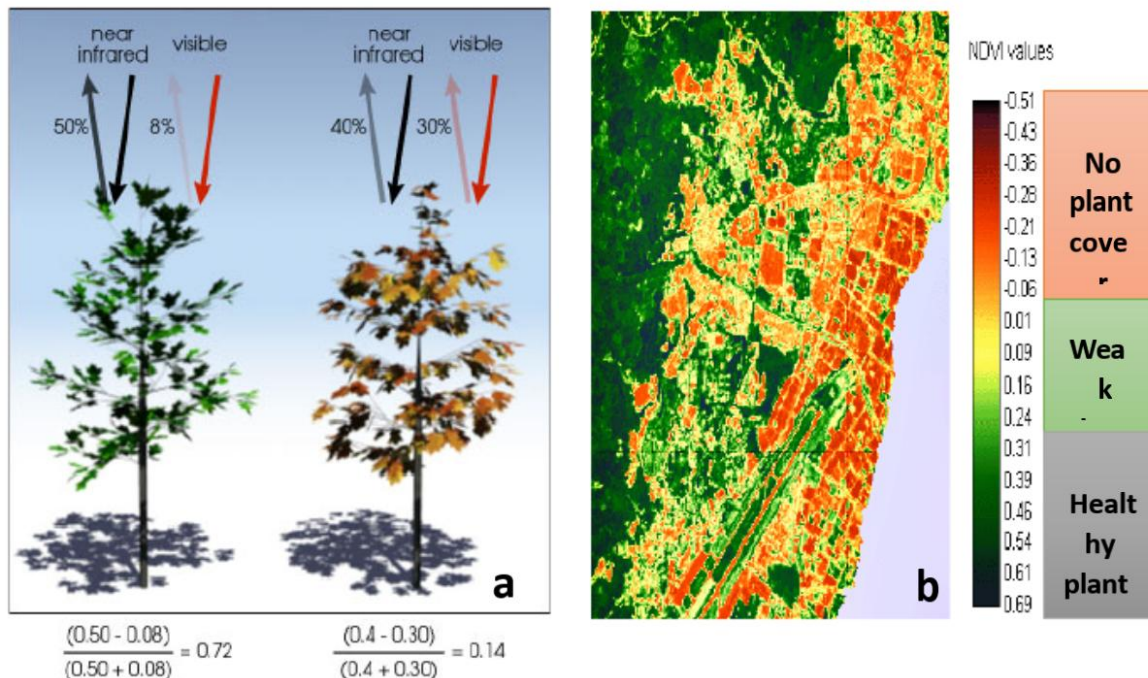
Otro índice relevante es el Índice de Diferencia Normalizada del Borde Rojo (NDRE), el cual mide la clorofila en etapas avanzadas del crecimiento de la vegetación, permitiendo la detección de estrés en fases tempranas del desarrollo. Se basa en la combinación de la banda infrarroja cercana (NIR) y el borde rojo (RED EDGE) del espectro electromagnético. Este índice es útil en la agricultura de precisión, donde la detección temprana de problemas es esencial para optimizar los rendimientos de esta actividad económica (Boiarskii & Hasegawa, 2019).

Por otro lado, el Índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI) se emplea para identificar la presencia de nieve en áreas específicas, utilizando la banda verde (GREEN) e infrarroja de onda corta (SWIR). El NDSI es una herramienta crucial en estudios climatológicos y de cambio climático, ya que facilita el monitoreo de la cobertura de nieve y su distribución (Wang et al., 2022).

## **2.5 Importancia y comportamiento del NDVI como indicador de la vegetación y su relación con variables climáticas**

Entre los diversos índices espectrales que existen, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) es uno de los más efectivos para evaluar la salud, densidad y vigor de la vegetación. Este índice se basa en la capacidad de las plantas para reflejar la luz, especialmente en dos bandas del espectro electromagnético: el infrarrojo cercano (NIR) y la banda roja (RED) (ver Figura 2). Una vegetación sana reflejará más luz en el NIR y absorberá más en el RED. Esto lo convierte en una herramienta útil y económicamente accesible para el monitoreo ambiental, ya que permite identificar cambios en la vegetación con rapidez y precisión (Pettoreli, N., 2013; Martínez Olivares, I. A. de J., 2020).

El NDVI asigna valores numéricos en una escala que varía entre -1 y 1, lo cual facilita la interpretación del tipo de superficie terrestre observado (ver Tabla 1). Valores cercanos a 1 indican vegetación densa y saludable, mientras que valores cercanos a 0 o negativos suelen corresponder a suelos desnudos, cuerpos de agua u otras superficies.



**Figura 2.** El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) refleja la actividad fotosintética (a); la variación del NDVI en un área cultivada refleja el estado de las plantas (b).

**Fuente.** Haggag et al. (2023).

**Tabla 1.** Rangos de valores de NDVI y su interpretación según la literatura.

Valor NDVI	Interpretación
0,9 a 1	Vegetación densa y saludable
0,6 a 0,9	Vegetación moderada
0,3 a 0,6	Vegetación dispersa
0 a 0,3	Área desprovista de vegetación
-1 a 0	Agua

**Fuente.** Bedunkevich, N. (2025).

Hou et al. (2011) realizaron un estudio en una reserva natural montañosa de China (Changbai Mountain Natural Reserve, China), con el objetivo de analizar correlaciones estacionales considerando distintos tipos de vegetación: bosque mixto (700–1.100 m), bosque de coníferas (1.100–1.700 m) y tundra (>2.000 m). Para ello, los autores utilizaron datos del NDVI junto con variables climáticas de temperatura y precipitación. Los resultados mostraron incrementos anuales en el NDVI, con picos durante la primavera y otoño, pero con muy poca variación en verano. Los autores encontraron una correlación más fuerte con

la temperatura ( $R = 0,7311$ ) que con la precipitación ( $R = 0,1442$ ). Además, se evidenció que la sensibilidad del NDVI frente a la temperatura fue mayor en la zona de tundra que en las zonas de bosque conífero y mixto, destacando que la vegetación en altitudes más elevadas responde con mayor intensidad a las variaciones térmicas.

Estudios previos como los de Potter y Brooks (1998) ya habían resaltado la utilidad del NDVI como herramienta para investigar la respuesta de la vegetación ante el cambio climático. Sin embargo, el NDVI como indicador de estas variables no es uniforme, ya que varía según la estación, el tipo de vegetación y el bioma analizado (Sanz et al., 2021).

## **2.6 Importancia de las áreas protegidas y problemática en el área de estudio**

Las áreas protegidas son zonas que están destinadas a la conservación de paisajes escénicos y de especies de flora y fauna de alto valor ecológico y patrimonial, como la araucaria, el coigüe (*Nothofagus dombeyi*), la lenga (*Nothofagus pumilio*), el puma (*Puma concolor*), la guiña (*Leopardus guigna*) y el carpintero negro (*Campephilus magellanicus*) (CONAF, 2024). Además, estas zonas albergan importantes reservorios de agua, que conforman el principal sistema de almacenamiento hídrico, fundamental para el sustento de la biodiversidad local.

Frente a esto, es interesante estudiar el Parque Nacional Conguillío, ubicado en la Región de La Araucanía, ya que dentro de este parque se encuentran el lago Conguillío y la Laguna Verde, ambos cuerpos de agua Andinos, rodeados por densos bosques nativos. Este parque, además, se posiciona como el tercer más visitado de Chile, registrando alrededor de 84 mil visitantes en 2020 (WWF, 2024). Sin embargo, en la última década se ha registrado una preocupante disminución en sus niveles de agua, estimada entre un 25 % y un 30 %, atribuida principalmente a los efectos del cambio climático (24Horas, 2022).

Esta situación ha sido percibida tanto por guardaparques como por visitantes frecuentes, quienes advierten que, de continuar esta tendencia, podría producirse la fragmentación o incluso la desaparición total del espejo de agua del Lago Conguillío. Frente a esto, surge la necesidad de estudiar qué está ocurriendo, considerando tanto factores climáticos como la respuesta de la vegetación que los rodea.

### 3. Metodología

#### 3.1 Área de estudio

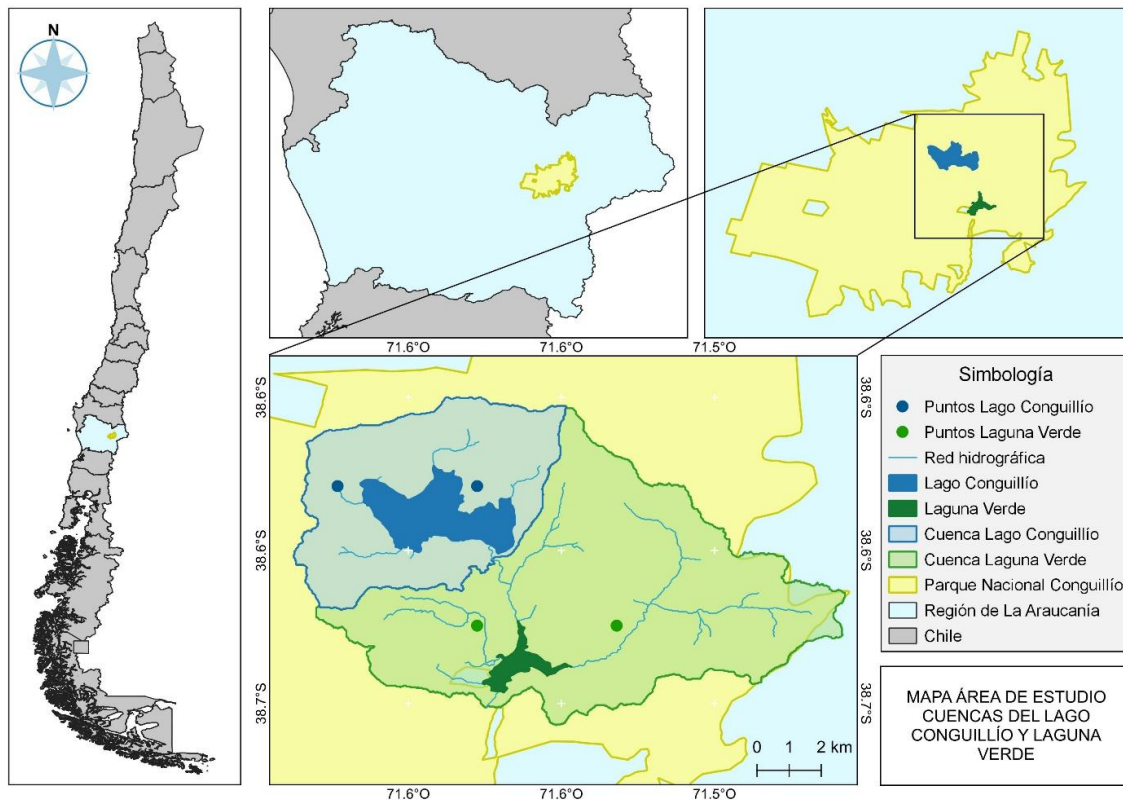
El área de estudio abarca las cuencas del Lago Conguillío y Laguna Verde, las cuales se encuentran en el Parque Nacional Conguillío, Región de La Araucanía (ver Figura 3). Este parque forma parte de la Reserva de la Biósfera Araucarias y se caracteriza por su alto valor ecológico, paisajístico y geológico, albergando una gran diversidad de especies y su moldeado es fuertemente influenciado por actividades volcánicas del completo Llaima-Sierra Nevada (Ladera Sur, 2022; CONAF, 2024).

La Región de La Araucanía presenta dos tipos de clima bien diferenciados. La zona intermedia, ubicada al norte de la región hasta aproximadamente los 39° S de latitud, se caracteriza por precipitaciones distribuidas a lo largo del año y una estación seca que se extiende por tres a cuatro meses durante el verano. En cambio, hacia el sur predomina un clima templado lluvioso con influencia mediterránea (Díaz, 2010). Aunque el área de estudio se sitúa en torno a los 38° S, se encuentra fuertemente influenciada por la altitud de la Cordillera de los Andes, lo que modifica su régimen climático según la altitud, otorgándole características propias de un clima templado de montaña, con mayores precipitaciones y temperaturas más bajas.

En cuanto a las características geológicas del área de estudio, el Lago Conguillío posee una superficie de 750 hectáreas (4.984 hectáreas su cuenca) y se originó a partir de antiguas erupciones del Volcán Llaima, uno de los más activos del país, cuya última erupción se registró en 2009. Este lago presenta una hidrología alimentada por aguas pluviales, subterráneas y por el deshielo del volcán Sierra Nevada. Su entorno está dominado por un denso bosque nativo, dominado principalmente por araucaria (*Araucaria araucana*), una especie emblemática de la región, junto con lenga (*Nothofagus pumilio*) y ñirre (*Nothofagus antártica*), que contribuyen significativamente a la conservación de los ecosistemas altoandinos.

Por otro lado, la Laguna Verde, de aproximadamente 175 hectáreas de superficie (9.174 hectáreas su cuenca) también tiene origen volcánico, producto de erupciones más recientes del Volcán Llaima. Esto se refleja en su entorno, dominados principalmente por escoria volcánica. A diferencia del Lago Conguillío, la Laguna Verde presenta salidas naturales de agua que forman afluentes, los cuales confluyen hacia el río Triful Triful. A su

vez, este río desemboca en el río Allipén, contribuyendo al sistema hidrológico de la región (Sánchez Valenzuela, J. & Calderón, J., 2008; Sandra Fernández-Alberti et al., 2021).



**Figura 3.** Ubicación del área de estudio.

### 3.2. Recopilación de datos satelitales

Se utilizó la plataforma en línea EO Browser, un servicio entregado por Sentinel Hub by PLANET LABS, la cual permite la navegación y comparación de datos satelitales de numerosos satélites, como los Landsat 4-5, Landsat 8-9 y Sentinel-2. Estos satélites cuentan con un amplio registro temporal de imágenes. Para el estudio se seleccionó el periodo comprendido entre 2005 y 2020 durante los meses de las estaciones de primavera y verano, debido a la mayor disponibilidad y calidad de imágenes. En la Tabla 2 se muestra la disponibilidad de datos, la resolución espacial y la numeración de las bandas espectrales de cada satélite empleado en el análisis.

En la plataforma se seleccionó un polígono que abarcó en su totalidad las cuencas del Lago Conguillío y Laguna Verde, además, del rango de tiempo y se aplicó el filtro de cobertura nubosa inferior al 20 % para asegurar la claridad y calidad de las imágenes.

Adicionalmente, se realizó una inspección visual que confirmara la ausencia de nubosidad en el área.

### 3.3 Cálculo del NDVI

Una vez obtenidas las bandas espectrales correspondientes, se procedió al cálculo del NDVI y su clasificación, utilizando la herramienta calculadora ráster del software de Sistema de Información Geográfica (SIG) QGIS. Para el cálculo se aplicó la fórmula estándar del NDVI, que se expresa en la Ecuación 2.

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (2)$$

Dado que la numeración de las bandas varía según el satélite, fue necesario ajustar la fórmula para cada caso. La Tabla 2 resume las fórmulas aplicadas y la correspondencia de bandas espectrales utilizadas para cada uno de los satélites considerados en el estudio.

**Tabla 2.** Características de los satélites empleados en el estudio.

Satélite	Resolución espacial	Disponibilidad de datos	Banda Roja (RED)	Banda Infrarroja Cercana (NIR)	Formula NDVI
Landsat 4-5	30 m	1982 - 2012	B03	B04	$(B04 - B03) / (B04 + B03)$
Landsat 8-9	30 m	2013 - actualidad	B04	B05	$(B05 - B04) / (B05 + B04)$
Sentinel 2	10, 20 y 60m	2015 - actualidad	B04	B08	$(B08 - B04) / (B08 + B04)$

**Fuente.** Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. (2017), Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. (2020), Airbus. (2024).

Posteriormente, los valores de NDVI obtenidos fueron clasificados cualitativamente de acuerdo con rangos definidos en la literatura (ver Tabla 3), con el objetivo de identificar aquellas áreas con mayor densidad de vegetación y, por ende, con una mayor demanda hídrica. Para ello, se utilizó la herramienta Calculadora ráster del software QGIS, aplicando la Ecuación 3 se asignó un valor numérico a cada clase de vegetación. Esta fórmula generó un nuevo ráster con tres categorías representativas: 1 para vegetación dispersa, 2 para vegetación moderada y 3 para vegetación densa.

$$\begin{aligned}
 & ( "RASTER NDVI" \geq 0,9 \text{ AND } "RASTER NDVI" \leq 1 ) * 3 + \\
 & ( "RASTER NDVI" \geq 0,6 \text{ AND } "RASTER NDVI" < 0,9 ) * 2 + \\
 & ( "RASTER NDVI" \geq 0,3 \text{ AND } "RASTER NDVI" < 0,6 ) * 1 \quad (3)
 \end{aligned}$$

**Tabla 3.** Clasificación cualitativa de la vegetación según rangos de NDVI.

Categoría de vegetación	Rango de valores NDVI
Vegetación dispersa	0,3 a 0,6
Vegetación moderada	0,6 a 0,9
Vegetación densa	0,9 a 1

**Fuente.** Bedunkevich, N. (2025).

### 3.4 Reclasificación de la vegetación

Si bien la literatura proporciona rangos generales de NDVI para clasificar la vegetación, fue necesario realizar un proceso de reclasificación para ajustar estos valores a las características específicas del área de estudio. Esto se debe a que los rangos estándar no siempre reflejan con precisión las características de cada zona.

En base a la revisión y comparación de las imágenes satelitales y el conocimiento del área, se definieron nuevos rangos de NDVI que reflejan de manera más precisa la densidad de vegetación observada y otras áreas. En este contexto, se definieron distintas categorías en la simbología del Raster en QGIS: vegetación densa ( $NDVI > 0,7$ ) vegetación moderada ( $0,5 < NDVI < 0,7$ ) vegetación dispersa ( $0,3 < NDVI < 0,5$ ) y áreas desprovistas de vegetación ( $NDVI < 0,3$ ). Las áreas desprovistas de vegetación pueden ser cuerpos de agua, nieve, escoria volcánica o suelos desnudos.

Posteriormente, con el objetivo de identificar diferentes coberturas de vegetación, en particular aquellas áreas con mayor densidad, por su estrecha relación con la evapotranspiración. Repitiendo el paso anterior, a través de la herramienta Calculadora ráster, se aplicó la Ecuación 4.

$$\begin{aligned} & ( "RASTER NDVI" \geq 0.7 \text{ AND } "RASTER NDVI" \leq 1 ) * 3 + \\ & ( "RASTER NDVI" \geq 0.5 \text{ AND } "RASTER NDVI" < 0.7 ) * 2 + \\ & ( "RASTER NDVI" \geq 0.3 \text{ AND } "RASTER NDVI" < 0.5 ) * 1 \end{aligned} \quad (4)$$

Los resultados de la reclasificación se vectorizaron para calcular el área correspondiente a cada categoría de cobertura vegetal (NDVI) y se exportó a Excel. Esto se realizó, con el fin de cuantificar la extensión espacial de las distintas categorías de vegetación (dispersa, moderada y densa), permitiendo comparar su distribución entre los distintos años y estaciones analizadas.

Por otro lado, para completar los períodos sin información satelital o de calidad, se aplicó un proceso de interpolación lineal simple, considerando un total de 9 meses faltantes en la serie. La interpolación se realizó de acuerdo con la Ecuación 5, la cual estima valores intermedios a partir de dos puntos conocidos consecutivos.

En los casos con valores faltantes, estos se estimaron mediante el promedio de los datos adyacentes, ajustando el cálculo según la cantidad de celdas vacías (Ecuación 6). Este procedimiento se aplicó únicamente cuando la ausencia de información correspondía a una o dos celdas consecutivas. Esta forma permitió completar las series temporales de NDVI y asegurar la continuidad necesaria para los análisis posteriores.

$$y = y_a + (x - x_a) \frac{(y_b - y_a)}{(x_b - x_a)} \quad (5)$$

$$NDVI_{interpolado} = \frac{NDVI_{anterior} + NDVI_{posterior}}{n} \quad (6)$$

### 3.5 Análisis espaciotemporal del NDVI

Con el propósito de identificar posibles patrones de cambio en la cobertura vegetal, se utilizó el software QGIS para analizar la evolución del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) entre los años 2005 y 2020, considerando las estaciones de primavera y verano. Como primera etapa, se emplearon todos los datos disponibles para visualizar los cambios del NDVI a lo largo del tiempo y exportando esta información desde QGIS a Excel. Lo que permitió generar gráficos y tablas con las áreas clasificadas por tipos de vegetación (en hectáreas).

Posteriormente, con el objetivo de facilitar un análisis más claro y enfocado, se seleccionaron los años que presentaban una mayor variabilidad en los valores del NDVI: 2005, 2009, 2015 y 2024, este último considerado para representar el estado más reciente de la cobertura vegetal. Para representar las estaciones, se agruparon los meses de septiembre, octubre y noviembre como primavera, y diciembre, enero y febrero como verano. A partir de esto, se utilizó la calculadora ráster para obtener un valor medio de NDVI por estación, generando un único ráster por año y por estación, lo que facilitó la elaboración de mapas comparativos para el análisis espaciotemporal.

### 3.6 Recopilación de datos de temperatura y precipitación

Los datos de temperatura y precipitación fueron extraídos desde la plataforma CR2MET, desarrollada por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), la cual

proporciona información climática grillada (sintética) diaria de una resolución espacial de 0,05° con cobertura nacional correspondientes al periodo de 1960–2021 (Juan P. Boisier, 2023).

Para representar adecuadamente las condiciones climáticas de las áreas de estudio, se seleccionaron cuatro puntos: dos ubicados dentro de la cuenca del Lago Conguillío y dos dentro de la cuenca de Laguna Verde, en la Tabla 4 se indican las coordenadas exactas de cada punto. Entre estos puntos, se calculó un promedio para cada cuenca, con el fin de obtener un valor representativo para cada una de las zonas. A su vez, obteniendo temperaturas medias y precipitaciones acumuladas a escalas mensuales para cada cuenca. Los registros empleados se encuentran en el Anexo 1 y 2.

**Tabla 4.** *Ubicación de los puntos con datos grillados dentro de las áreas de estudio.*

Punto áreas de estudio		Latitud	Longitud
Lago Conguillío	Punto 1	38°37'30,00"S	71°40'30,00"O
	Punto 2	38°37'30,00"S	71°37'30,00"O
Laguna Verde	Punto 1	38°40'30,00"S	71°37'30,00"O
	Punto 2	38°40'30,00"S	71°34'30,00"O

**Fuente.** Juan P. Boisier. (2023).

### 3.7 Análisis de Correlación de Pearson y de Componentes Principales (PCA)

En primer lugar, se realizó un análisis de correlación de Pearson con el objetivo de medir la relación lineal entre dos variables cuantitativas y continuas (Hernández Lalinde et al., 2019). Este coeficiente varía entre -1 y 1, donde valores cercanos a  $\pm 1$  indican una relación fuerte y valores cercanos a 0 una relación débil o inexistente. La interpretación de estos valores se presenta en la Figura 4.



**Figura 4.** Interpretación de los valores que entrega el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ).

**Fuente.** Cuellar et al. (2018).

Posteriormente, se aplicó el Análisis de Componentes Principales (PCA), una técnica estadística multivariante orientada a reducir la dimensionalidad del conjunto de datos. Este análisis permitió conservar la mayor proporción de la varianza explicada por las variables originales, facilitando tanto la visualización como la interpretación de las relaciones entre variables dentro del conjunto de datos (Jolliffe, 2002).

Para llevar a cabo ambos análisis, se utilizó el software R, un lenguaje de programación y un entorno de software libre ampliamente utilizado para el manejo de datos, análisis estadístico y la representación gráfica. Se ingresaron los datos mensuales de temperaturas medias (obtenidas a partir de Tmin/Tmax), precipitaciones, áreas de cobertura vegetal (densa, moderada y dispersa), los cuales se presentan en el Anexo 1 y Anexo 2.

El uso de este software permitió obtener una matriz de correlación para identificar relaciones lineales entre las variables climáticas y la cobertura vegetal. Además, se generaron los gráficos de dispersión para visualizar la dirección de estas variables (Castro, A., 2023). En cuanto al PCA, se obtuvieron los gráficos biplot en ambas cuencas para representar la distribución las variables en las estaciones estudiadas y su contribución en los componentes principales (Gil Martínez, C. 2018).

#### 4. Resultados

En la Tabla 5 se resume la disponibilidad de imágenes satelitales por año y satélite considerados en el estudio. Durante el período 2005–2012, correspondiente a los satélites

Landsat 4-5, se observa una cobertura relativamente baja, con lagunas de datos especialmente concentradas en los años 2007, 2010, 2011 y 2012, tanto en los meses de primavera como de verano. Esta baja continuidad se atribuye principalmente a limitaciones técnicas del sensor, condiciones atmosféricas como nubosidad, alta presencia de nieve y baja frecuencia de revisita del satélite (16 días).

Entre los años 2013 y 2016, el satélite Landsat 8-9 proporcionó una cobertura relativamente más amplia en comparación con los períodos anteriores, sin embargo, no se logró obtener una continuidad total de datos en años consecutivos. Esta limitación fue superada con la incorporación del satélite Sentinel-2, el cual permitió alcanzar una cobertura más completa y constante durante la mayoría de los meses analizados. Esta mejora se debe a los avances tecnológicos implementados en Sentinel-2, por lo que destaca en su alta resolución espacial y capacidad para adquirir imágenes con mayor frecuencia y precisión.

**Tabla 5.** Disponibilidad temporal de imágenes satelitales por estación, mes y año (2005–2020).

Satélite		Landsat 4-5							
Estación	Mes/Año	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Verano	Diciembre	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	Enero	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	Febrero	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Primavera	Septiembre	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	Octubre	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	Noviembre	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde

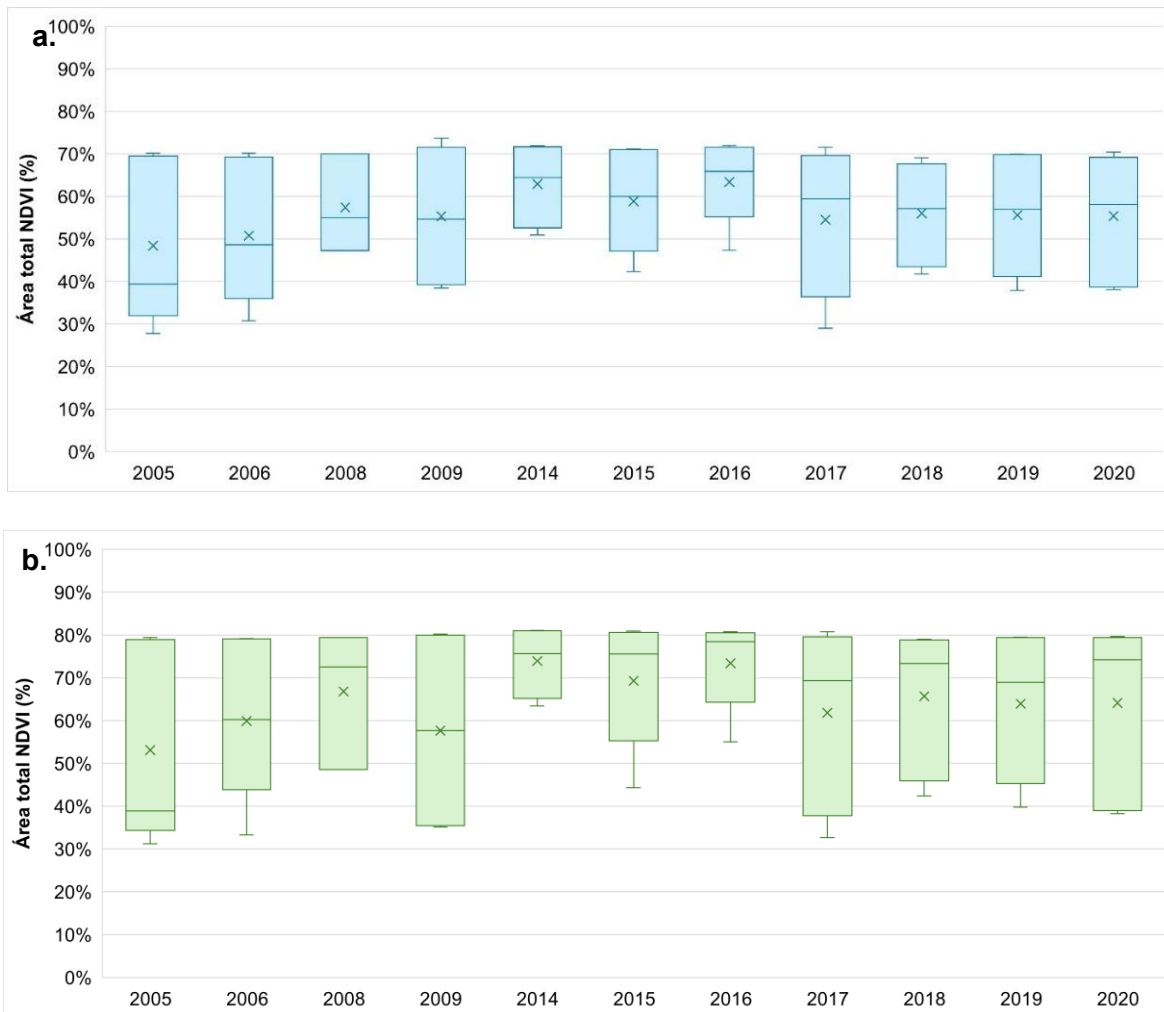
Satélite		Landsat 8-9				Sentinel 2			
Estación	Mes/Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Verano	Diciembre	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	Enero	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	Febrero	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Primavera	Septiembre	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	Octubre	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
	Noviembre	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde

**Nota.** El color verde corresponde al mes con disponibilidad de datos satelitales, mientras que el color rojo indica la ausencia de datos satelitales en el mes estudiado.

## 5.1 Análisis espaciotemporal

Para visualizar la variación del NDVI en los distintos años analizados, se elaboró un gráfico de caja con el área relativa de cada cuenca (Figura 5), agrupados según las categorías de cobertura vegetal (densa, moderada y dispersa). Los datos utilizados para este análisis se detallan en el Anexo 3.

Se observa que la cuenca del Lago Conguillío presenta una cobertura vegetal que alcanza un máximo de aproximadamente 70 % del área total cada año, lo que equivale a 4.984 hectáreas. Mientras que, la cuenca de Laguna Verde muestra una cobertura vegetal más elevada debido al tamaño de su cuenca, con un máximo cercano al 80 % de su total, equivalente a 9.174 hectáreas. En cuanto a la variabilidad anual, ambas cuencas manifiestan un comportamiento similar, con fluctuaciones que oscilan aproximadamente entre 30 % y 70 % en Lago Conguillío, y entre 30 % y 80 % en Laguna Verde.



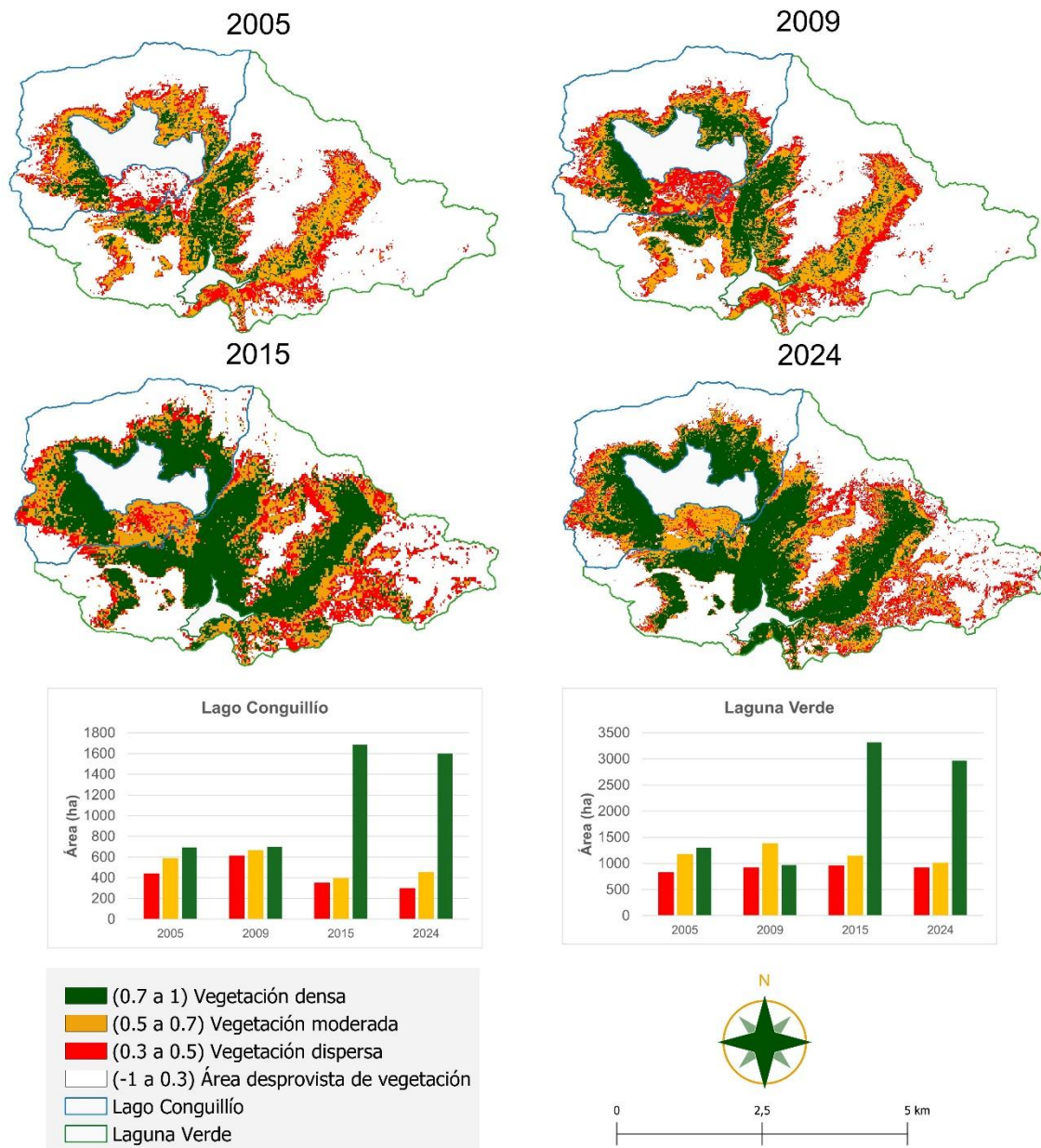
**Figura 5.** Variación anual del área total del NDVI en Lago Conguillío (a) y Laguna Verde (b) entre 2005 y 2020.

La Figura 6 presenta los resultados de la reclasificación para la estación de primavera (septiembre, octubre y noviembre) en los años 2005, 2009, 2015 y 2024, permitiendo observar los cambios en la cobertura vegetal a lo largo del tiempo en ambas cuencas.

En general, se observa un aumento sostenido de las áreas con vegetación densa en ambas cuencas a lo largo del periodo analizado, siendo particularmente notorio en los años 2015 y 2024. Este patrón sugiere una expansión de coberturas vegetales más consolidadas, posiblemente en respuesta a condiciones climáticas favorables para el crecimiento de la vegetación.

En los primeros años del análisis (2005 y 2009), tanto en el Lago Conguillío como en Laguna Verde la cobertura de nieve (color blanco en la Figura 7) es un factor predominante durante la primavera, cubriendo amplias superficies de ambas cuencas. Esto se manifiesta en la extensión considerable de áreas clasificadas como desprovistas de vegetación ( $NDVI < 0,3$ ), particularmente en zonas de mayor altitud o cercanías de cada lago. Sin embargo, a medida que avanza el tiempo (2015 y 2024), estas áreas se reducen visiblemente, sugiriendo menor presencia de nieve o deshielos más tempranos, dando paso a un incremento significativo de la vegetación densa, especialmente en las laderas y sectores intermedios de ambas cuencas.

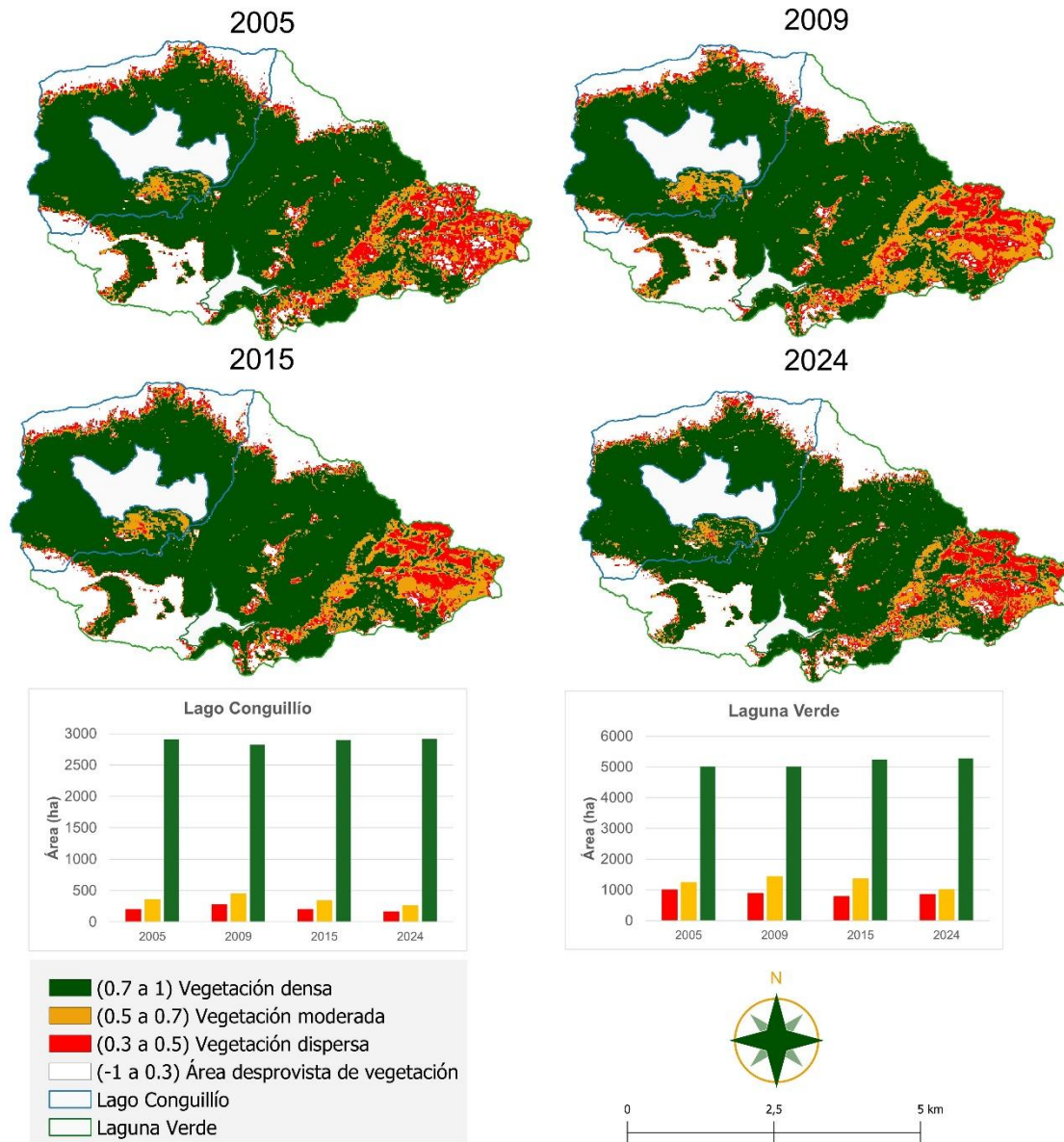
La vegetación moderada y dispersa presentan fluctuaciones más marcadas y tienden a desempeñar un rol transicional, ubicándose en los bordes de las zonas con vegetación densa en ambas cuencas. Estas coberturas son más frecuentes en las inmediaciones del Lago Conguillío, donde se concentra una importante actividad turística, con la presencia de senderos, caminos, zonas de camping y hostales. La actividad humana en esta área podría estar influyendo en la dinámica de estas coberturas intermedias, manteniéndolas en una condición menos estable frente a cambios.



**Figura 6.** Evolución espaciotemporal del NDVI en primavera para las cuencas del Lago Conguillío y Laguna Verde (2005–2024).

A diferencia del comportamiento observado en primavera, la Figura 7 muestra los resultados del NDVI en verano y se evidencia una poca respuesta de la vegetación en sus 3 categorías, manteniéndose relativamente constante entre 2005 y 2024, lo que sugiere condiciones de alta productividad vegetal estival, posiblemente favorecidas por una mayor radiación solar, temperatura y la ausencia de cobertura nival durante este periodo.

Respecto a las áreas desprovistas de vegetación, su presencia es más limitada en comparación con la primavera, y se concentra principalmente en sectores de alta montaña. La reducción de cobertura nival en esta estación y el avance de la vegetación densa explicarían la menor proporción de estas áreas en la estación de verano.

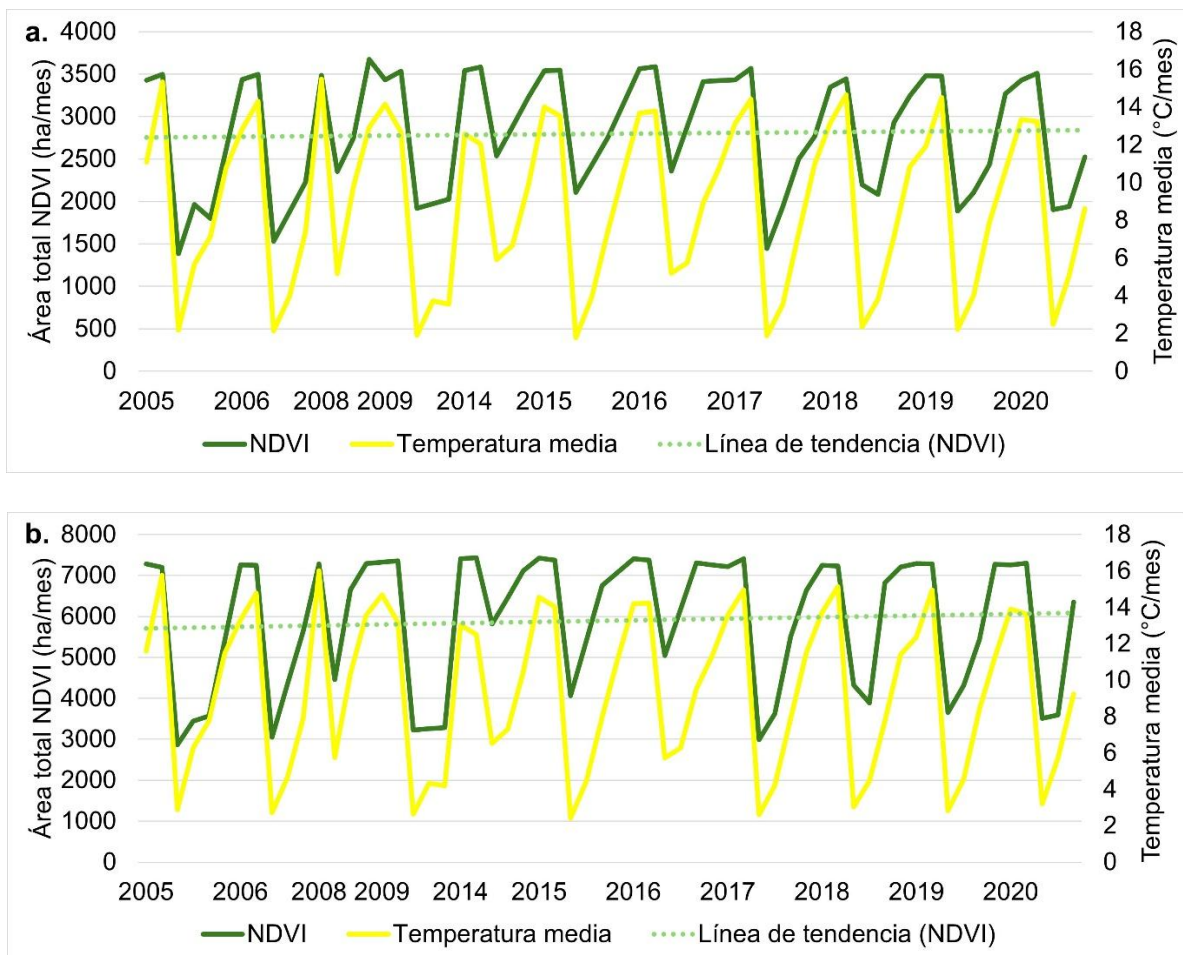


**Figura 7.** Evolución espaciotemporal del NDVI en verano para las cuencas del Lago Conguillío y Laguna Verde (2005–2024).

Como parte de un procedimiento preliminar para anticipar posibles relaciones entre variables, se visualizó la evolución del área total del NDVI en conjunto con la temperatura

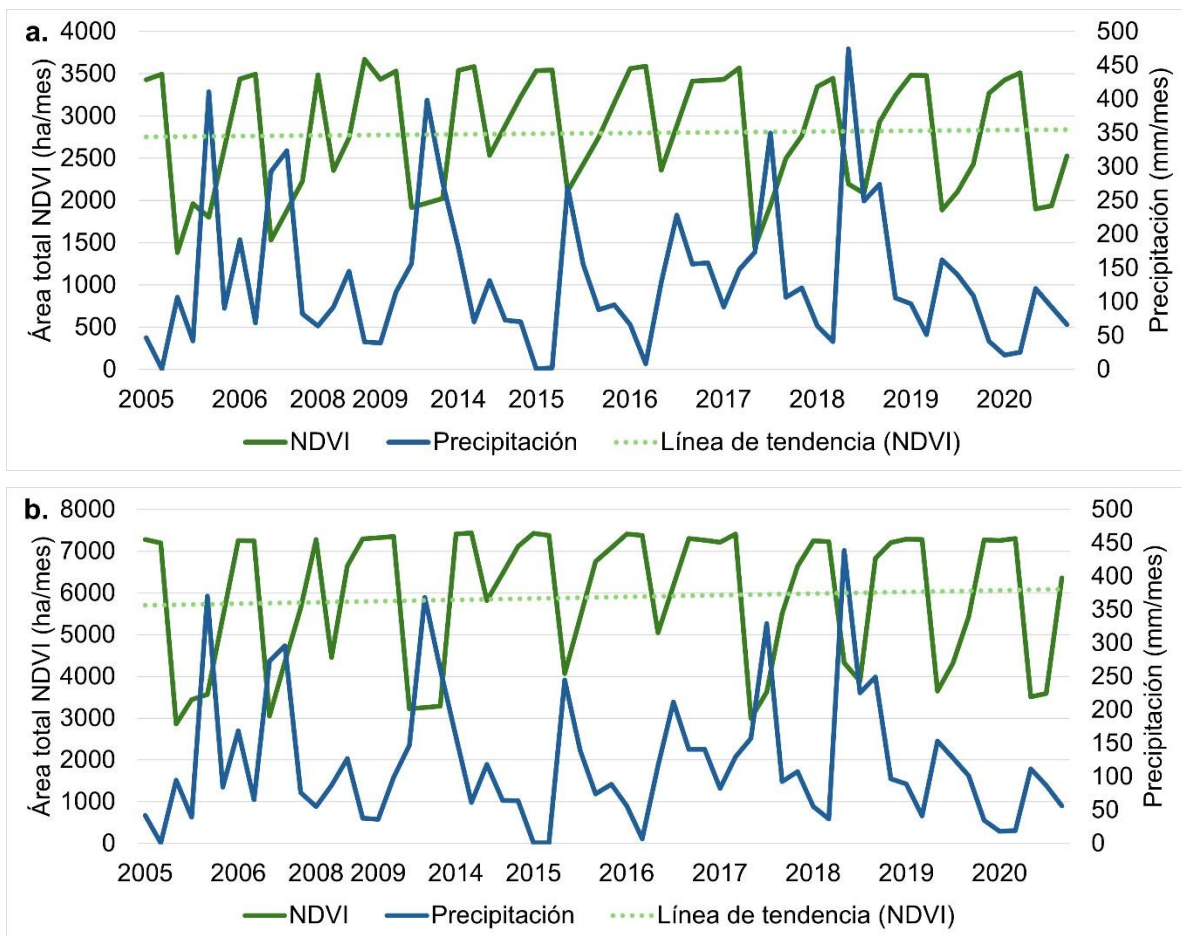
media mensual en las cuencas del Lago Conguillío y Laguna Verde durante las estaciones de primavera y verano, en el periodo 2005-2020. Si bien esto no corresponde un análisis estadístico formal, esta aproximación permite identificar patrones iniciales que podrían inferir futuras correlaciones.

En la Figura 8, se observa como ambas variables presentan un marcado comportamiento estacional, con máximos en los meses más cálidos (diciembre, enero y febrero). En ambas cuencas, el área total de vegetación (NDVI) no solo se mantiene relativamente estable a lo largo del tiempo, sino que también muestra una leve tendencia al aumento, más pronunciada en la cuenca de Laguna Verde. Esta tendencia sugiere una expansión gradual de la cobertura vegetal durante las estaciones más cálidas del año (primavera y verano). De forma visual, se puede advertir cierta dependencia entre los picos de temperatura y el aumento del NDVI, lo que sugiere una posible relación positiva entre ambas variables.



**Figura 8.** Comportamiento de la temperatura sobre el área total del NDVI en la cuenca del Lago Conguillío (a) y Laguna Verde (b) durante las estaciones de primavera y verano entre 2005-2020.

Al contrario de la temperatura, en la Figura 9, la precipitación muestra períodos de mayor y menor precipitación, sin que estas fluctuaciones se reflejen de forma directa en el comportamiento del NDVI. De hecho, se evidencia un aumento del área vegetada incluso en meses con baja precipitación, lo cual sugiere que la vegetación no responde de manera lineal ni inmediata a las variaciones en la precipitación, al menos durante las estaciones de primavera y verano.



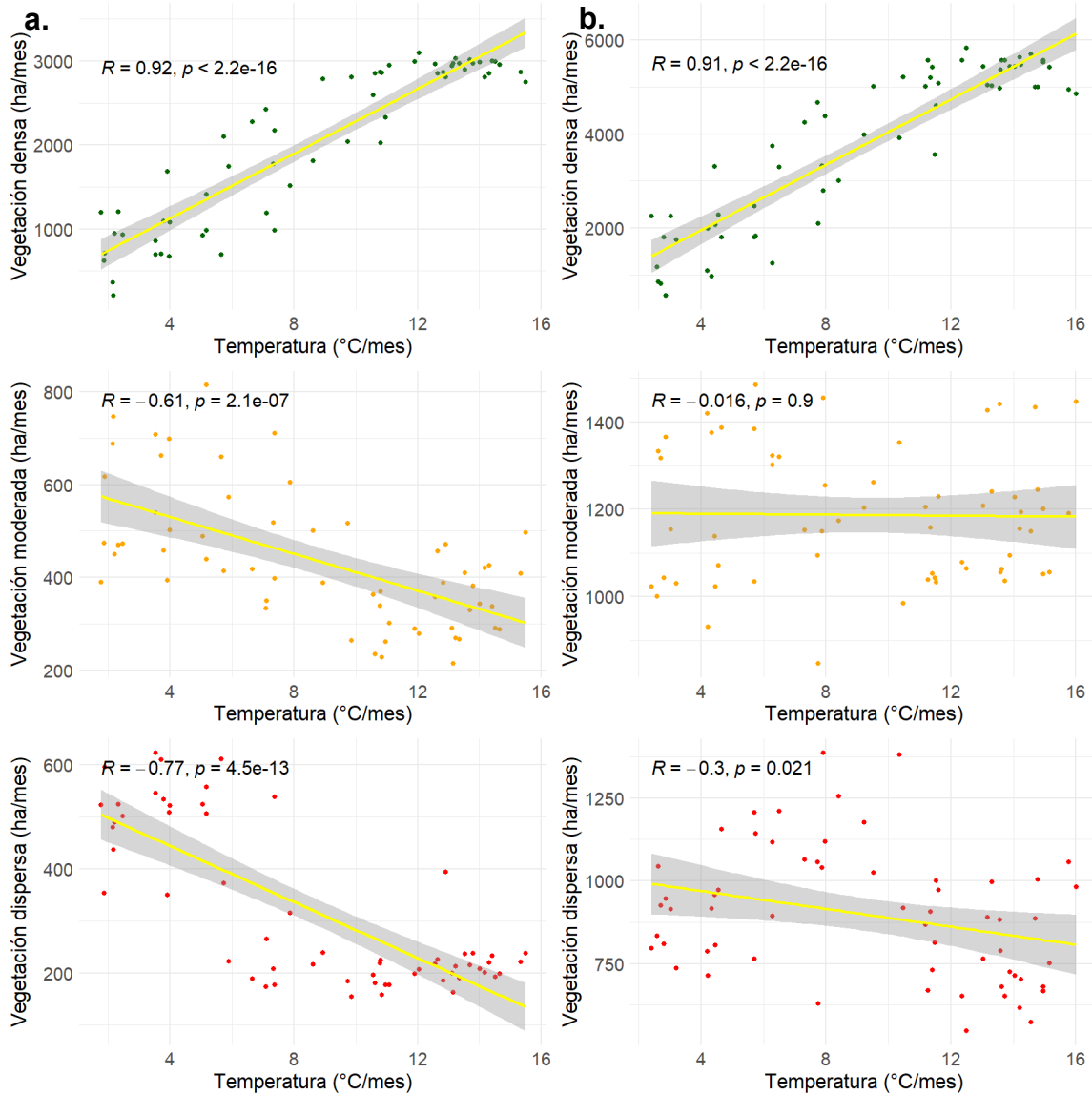
**Figura 9.** Comportamiento de la precipitación sobre el área total del NDVI en Lago Conguillío (a) y Laguna Verde (b) durante las estaciones de primavera y verano entre 2005-2020.

## 5.2 Análisis de Correlación de Pearson

La Figura 10 muestra la correlación de Pearson entre la temperatura media mensual y la cobertura vegetal según su densidad en ambas cuencas. En general, se evidencia una fuerte correlación positiva y significativa entre la temperatura y la vegetación densa ( $R = 0,92$ ;  $p = < 2,2e-16$  para Lago Conguillío y  $R = 0,91$ ;  $p = < 2,2e-16$  para Laguna Verde), lo que indica que a mayores temperaturas se asocia con una mayor densidad de vegetación.

En cuanto a la vegetación moderada, los resultados difieren entre las cuencas, en el Lago Conguillío se identifica una correlación negativa significativa ( $R = -0,61$ ;  $p = 2,1e-07$ ), mientras que en Laguna Verde la relación es prácticamente nula ( $R = -0,016$ ;  $p = 0,9$ ), lo cual sugiere que en la cuenca de Laguna Verde la temperatura no influye de manera relevante sobre este tipo de vegetación.

Por otro lado, la vegetación dispersa presenta una correlación negativa en ambas áreas, con una relación más fuerte en Conguillío ( $R = -0,77$ ;  $p = 4,5e-13$ ) que en Laguna Verde ( $R = -0,3$ ;  $p = 0,021$ ), indicando que el aumento de temperatura se asocia con una disminución de la cobertura vegetal dispersa, aunque con menor intensidad en Laguna Verde.

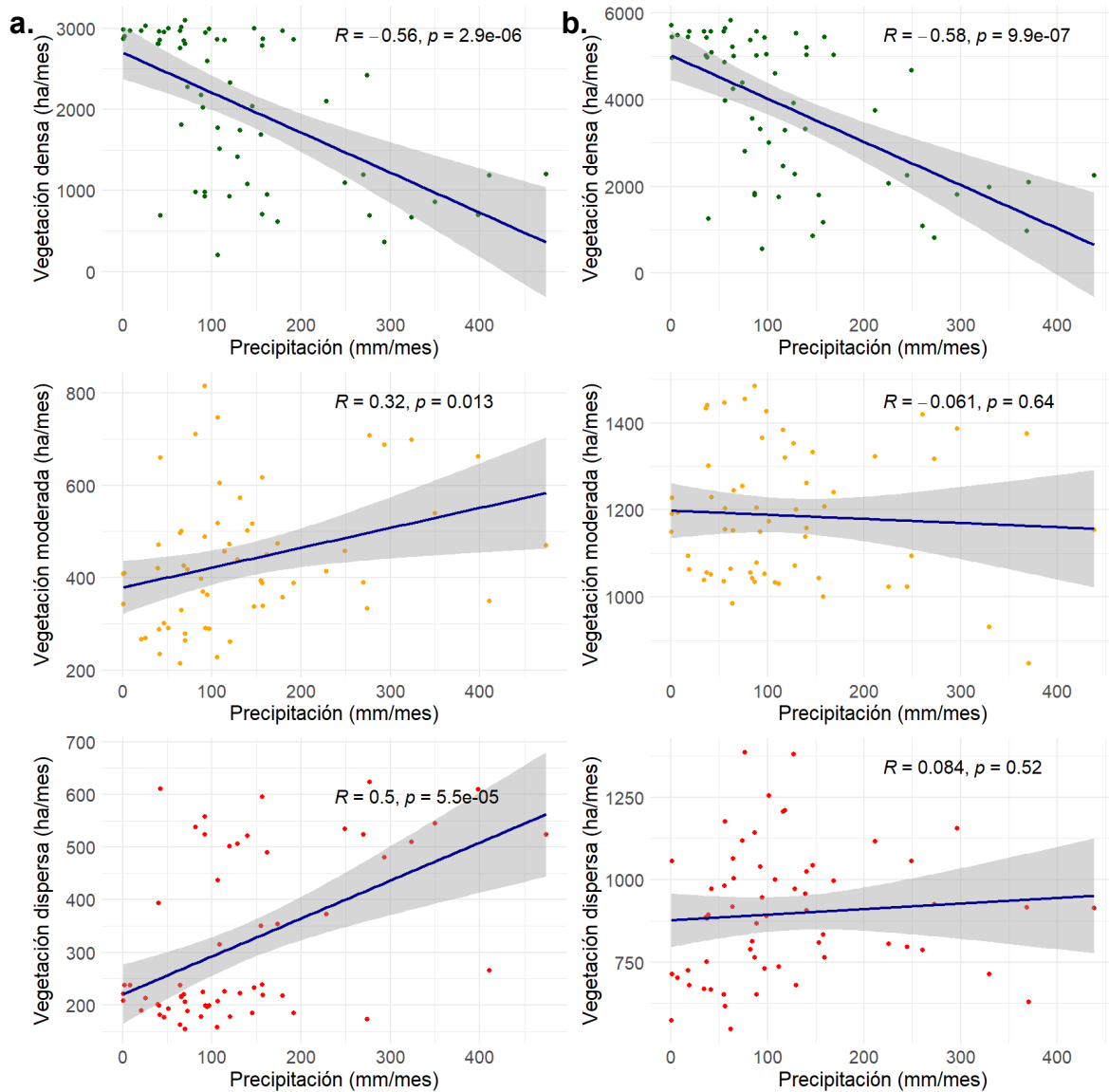


**Figura 10.** Correlación de Pearson entre la temperatura media y la cobertura de vegetación según su densidad en Lago Conguillío (a) y Laguna Verde (b).

El análisis de correlación entre la precipitación mensual y la cobertura vegetal se presenta en la Figura 11. Se observa que estas variables muestran un comportamiento distinto al observado entre la temperatura y la vegetación. En ambas cuencas se observa

una correlación negativa moderada y significativa entre la precipitación y la vegetación densa ( $R = -0,56$ ;  $p = 2,9e-06$  en Lago Conguillío y  $R = -0,58$ ;  $p = 9,9e-07$  en Laguna Verde), lo que indica que a menor precipitación se asocia una mayor cobertura de vegetación densa. Este patrón implica que las precipitaciones pueden coincidir con menor radiación solar y mayor nubosidad, estas condiciones no favorecen el crecimiento o mantenimiento de la cobertura vegetal durante las estaciones estudiadas.

En el caso de la vegetación moderada, los resultados muestran una relación positiva débil pero significativa en Lago Conguillío ( $R = 0,32$ ;  $p = 0,013$ ), mientras que en Laguna Verde no se evidencia una relación estadísticamente significativa ( $R = -0,061$ ;  $p = 0,64$ ). Para la vegetación dispersa, se observa nuevamente una diferencia entre ambas áreas, en la cuenca del Lago Conguillío, existe una correlación positiva moderada y significativa ( $R = 0,5$ ;  $p = 5,5e-05$ ), lo que sugiere que un aumento en la precipitación se relaciona con un incremento en la cobertura de este tipo de vegetación, mientras que en Laguna Verde la correlación es baja y no significativa ( $R = 0,084$ ;  $p = 0,52$ ).



**Figura 11.** Correlación de Pearson entre la precipitación y la cobertura de vegetación según su densidad en Lago Conguillío (a) y Laguna Verde (b).

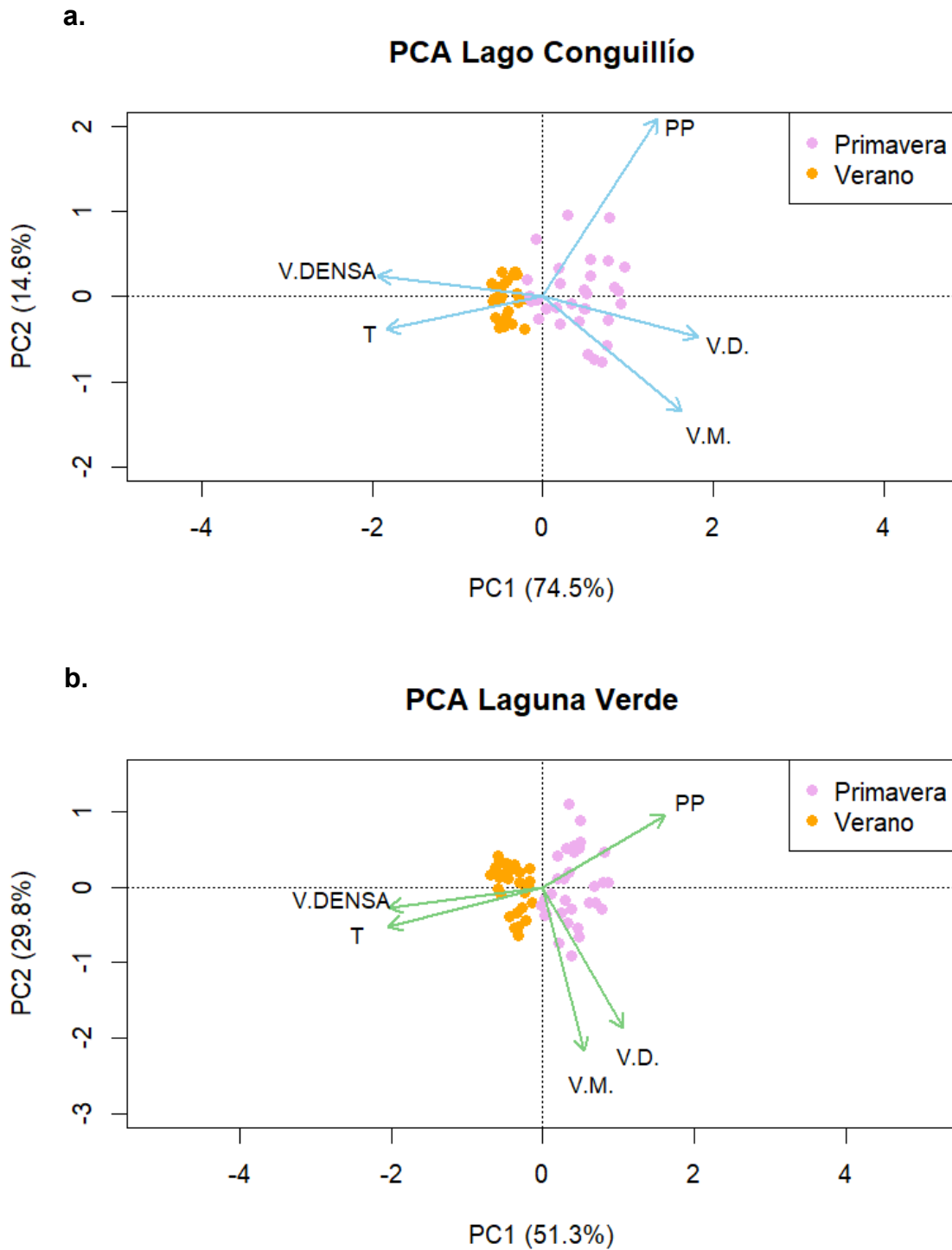
### 5.3 Análisis de Componentes Principales

Como parte del análisis estadístico, se aplicó un Análisis de Componentes Principales (PCA) con el objetivo de explorar las relaciones entre las variables climáticas (temperatura y precipitación) y los distintos tipos de cobertura vegetal (densa, moderada y dispersa) en las cuencas del Lago Conguillío y de Laguna Verde. Esta técnica permitió reducir la dimensionalidad del conjunto de datos y visualizar patrones de asociación entre las variables consideradas dentro del estudio. Los resultados se presentan en la Figura 12, la cual muestra la distribución de las variables en los ejes definidos por los dos primeros

componentes principales, permitiendo interpretar gráficamente la dirección y magnitud de sus correlaciones.

En el caso del Lago Conguillío, el primer componente principal (PC1) explica un 74,5 % de la varianza, mientras que el segundo componente (PC2) explica un 14,6 %, lo que indica que el eje horizontal concentra la mayor parte de la variabilidad de los datos. En este componente, se observó una fuerte relación positiva entre la temperatura y la vegetación densa, lo que sugiere que un aumento de la temperatura favorece el desarrollo de este tipo de cobertura. Por el contrario, la vegetación moderada y dispersa mostraron correlaciones negativas respecto a la temperatura, ordenándose en sentido opuesto, lo que sugiere un desplazamiento de estas categorías en condiciones más cálidas. En cuanto a la precipitación, su vector aparece orientado de forma perpendicular al eje principal, lo que indica que su influencia en la varianza explicada es baja o que su efecto sobre la vegetación es más moderado.

En la cuenca de la Laguna Verde, el PC1 explicó un 51,3 % de la varianza, mientras que el segundo componente (PC2) aportó un 29,8 %. Al igual que en Lago Conguillío, la temperatura se correlacionó positivamente con la vegetación densa, reforzando el patrón observado de mayor cobertura bajo condiciones térmicas favorables. Por el contrario, la precipitación se asoció negativamente con este tipo de vegetación, lo que sugiere que niveles más bajos de lluvia coinciden con una mayor densidad vegetal en las estaciones estudiadas. Las variables de vegetación moderada y dispersa se ubicaron cercanas al origen del gráfico, indicando una correlación débil con los componentes principales y, por tanto, una menor influencia de las variables climáticas consideradas sobre estos tipos de cobertura en esta cuenca.



**Figura 12.** Análisis de Componentes Principales (PCA) en Lago Conguillío (a) y Laguna Verde (b).

**Nota.** T = temperatura, PP = precipitación, V. DENSA = vegetación densa, V.M. = vegetación moderada, V.D. = vegetación dispersa.

## 5. Discusión

Una de las principales limitaciones del estudio fue la dificultad de contar con imágenes satelitales representativas de todas las estaciones del año, restringiendo el análisis únicamente a los periodos de primavera y verano. Esta limitación se debió a las condiciones atmosféricas adversas que predominan en zonas de alta montaña durante el otoño e invierno. En sectores cordilleranos, la nubosidad, las precipitaciones en forma de nieve y la baja radiación solar reducen considerablemente la calidad de las imágenes satelitales, generando interferencias como ruido atmosférico, sombras topográficas y una cobertura blanca persistente que impide el correcto funcionamiento de los sensores del satélite. Estos elementos dificultan la correcta identificación de la cobertura vegetal y afectan directamente la confiabilidad de índices como el NDVI, impidiendo una interpretación precisa de la dinámica estacional de la vegetación durante dichos meses (Pettorelli, 2005; Rahimi, 2024).

La selección de las estaciones de primavera y verano se debe a estos periodos ofrecían condiciones favorables para asegurar la calidad de imágenes en el estudio. No obstante, entre los años 2005 y 2016, no fue posible contar con datos consecutivos debido a la nubosidad, o bien por las limitaciones espaciales y temporales de los satélites Landsat 4-5 y Landsat 8-9. Si bien durante ese periodo también se encontraba en operación el satélite Landsat 7, este no se consideró en el análisis debido a fallas en su sensor (Scan Line Corrector), los cuales afectaban la calidad de las imágenes (USGS, 2024). Durante ese periodo, no se disponía con opciones más modernas y con mayor calidad, como el satélite Sentinel 2.

Si bien la interpolación aplicada permitió cubrir los periodos sin información satelital y mantener la continuidad temporal, es importante considerar que este método asume una variación gradual entre los valores observados en las estaciones. Si bien los métodos de interpolación no siempre generan cambios estadísticamente significativos en la estimación de tendencias fenológicas, pueden modificar la magnitud o la dirección de las tendencias del NDVI, especialmente cuando se comparan datos diarios con satélites de menor resolución temporal. Este efecto es más notorio en coberturas vegetales con marcada estacionalidad, como bosques caducifolios y pastizales, mientras que es menos relevante en vegetación con variaciones estacionales débiles (bosques perennes). Bajo este contexto, la resolución temporal es un factor clave para minimizar sesgos, siendo recomendable el uso de datos con alta frecuencia temporal o, en su defecto, resolución

temporal de 8 días para coberturas altamente sensibles a cambios estacionales (Li et al., 2021). Por lo tanto, dada la estacionalidad de la vegetación analizada en este estudio, la aplicación de esta metodología no implicaría consecuencias significativas en los resultados obtenidos.

La recolección de datos meteorológicos también representó una limitación relevante en este estudio, debido a las complejas condiciones geográficas de las zonas de alta montaña. La ausencia de estaciones meteorológicas con datos históricos, públicos y representativos para las cuencas analizadas obligó a recurrir a fuentes alternativas (Kang, 2024), como los son los productos grillados. No obstante, estos datos sintéticos o grillados pueden no reflejar con exactitud las condiciones locales. Así, el uso de datos grillados provenientes de modelos climáticos introduce un grado de incertidumbre, ya que no se trata de datos interpolados a partir de mediciones directas de estaciones circundantes (Herrera, 2019).

La relación entre temperatura y cobertura vegetal (Figura 11) evidenció una fuerte correlación positiva y significativa para la vegetación densa en ambas zonas ( $R = 0,92$ ;  $p < 2,2e-16$  en Lago Conguillío y  $R = 0,91$ ;  $p < 2,2e-16$  en Laguna Verde), lo cual sugiere que a medida que aumentan las temperaturas, también se incrementa la presencia de vegetación más desarrollada. Este comportamiento podría estar asociado a un periodo de mayor actividad fotosintética favorecida por temperaturas más altas, especialmente en ecosistemas de alta montaña donde la estacionalidad térmica es determinante para el crecimiento vegetal (Hou, 2011; Yang, 2024). Sin embargo, el aumento de las temperaturas en este ecosistema podría estar influyendo un incremento en la evapotranspiración. Como se observó en el análisis espaciotemporal (Figuras 6, 7, 8 y 9) el aumento del NDVI sugiere una mayor densidad vegetal, lo cual está estrechamente relacionado con una mayor demanda de la evapotranspiración (Bari, 2021). Este fenómeno podría estar afectando la disponibilidad hídrica tanto del lago como de la laguna, especialmente si no se ve compensado por un aumento en las precipitaciones o en la disponibilidad de agua almacenada.

Al contrario, la vegetación moderada y dispersa presentó correlaciones negativas en Lago Conguillío ( $R = -0,61$ ;  $p = 2,1e-07$  y  $R = -0,77$ ;  $p = 4,5e-13$ , respectivamente). Esto podría explicarse por el hecho de que, a medida que aumentan las temperaturas (estación cálida) la vegetación densa se ve fortalecida y comienza a dominar el paisaje, desplazando progresivamente a coberturas vegetales menos densas. Lo anterior, implica que la

vegetación moderada y dispersa disminuye, lo que se ve reflejado en las correlaciones negativas. Este patrón no se repite con la misma intensidad en Laguna Verde, donde la vegetación moderada no presentó correlación significativa ( $R = -0,016$ ;  $p = 0,9$ ), y la vegetación dispersa mostró una correlación negativa débil pero estadísticamente significativa ( $R = -0,3$ ;  $p = 0,021$ ).

Por otro lado, el análisis de la relación entre precipitación y cobertura vegetal (Figura 12) reflejó un patrón opuesto al observado con la temperatura. La vegetación densa mostró una correlación negativa moderada y significativa con la precipitación tanto en Lago Conguillío ( $R = -0,56$ ;  $p = 2,9e-06$ ) como en Laguna Verde ( $R = -0,58$ ;  $p = 9,9e-07$ ).

Este comportamiento puede deberse a diversos factores. Uno de ellos es que, durante las estaciones de primavera y verano, un aumento en las precipitaciones no necesariamente se traduce en un incremento de la productividad vegetal. Por el contrario, precipitaciones excesivas en este período pueden generar suelos sobresaturados o nubosidad persistente, que limitan la radiación solar disponible para la fotosíntesis, reduciendo así los valores de NDVI (Tan et al., 2015).

Además, las lluvias abundantes en la pretemporada pueden influir en la fenología primaveral. Permitiendo adelantar el inicio de la temporada de crecimiento de la vegetación (SOS), pero también reducir la sensibilidad de dicho inicio frente a precipitaciones anteriores (Shen, 2015; Chen, 2020). Asimismo, en zonas con climas templado-lluviosos, como el área de estudio, la vegetación no es tan dependiente de la precipitación, como si ocurre en regiones más áridas (Cong, 2013; Chen, 2014).

También, este patrón puede explicarse por las condiciones estacionales propias de los ecosistemas de alta montaña, donde las precipitaciones, específicamente en forma de nieve, pueden generar extensas coberturas nivales que reducen la reflectancia de la vegetación, disminuyendo así los valores del NDVI (Los et al. 2001). Sin embargo, para la vegetación moderada y dispersa, el comportamiento fue diferente. En Lago Conguillío, se observaron correlaciones positivas y significativas ( $R = 0,32$ ;  $p = 0,013$  y  $R = 0,5$   $p = 5,5e-05$ , respectivamente). Por el contrario, en Laguna Verde no se encontraron correlaciones significativas para estos tipos de vegetación ( $R = -0,061$ ;  $p = 0,64$  y  $R = 0,084$ ;  $p = 0,52$ , respectivamente).

Por otra parte, en el análisis de Componentes Principales (PCA) correspondiente a la cuenca del Lago Conguillío (Figura 12.a), el primer componente principal (PC1) explicó

el 74,5 % de la varianza, lo que indica que este eje concentra el mayor porcentaje de la variabilidad de los datos, influenciado principalmente por las variables de temperatura y vegetación densa. En tanto, el segundo componente principal (PC2) explicó el 14,6 % de la varianza, asociándose principalmente a las variables de precipitación, vegetación moderada y vegetación dispersa. En conjunto, ambos componentes explican un 89,1 % de la variabilidad total. De acuerdo con Jolliffe (2002), cuando el porcentaje acumulado de varianza explicada se sitúa entre un 80 % y un 90 %, los resultados del PCA pueden considerarse altamente representativos y confiables.

En el caso de la cuenca de Laguna Verde (Figura 12.b), el PC1 explicó un 51,3 % de la varianza, mientras que el PC2 explicó un 29,8 %. De manera similar al Lago Conguillío, las variables se distribuyen de forma comparable en los ejes principales. Sin embargo, se observa una diferencia en la varianza total acumulada, que alcanza un 81,1%. A pesar de esta diferencia, dicho valor sigue siendo representativo para el análisis. Esta menor proporción de varianza explicada se refleja también en los resultados de correlación, los cuales presentan relaciones menos significativas en comparación con los obtenidos en el Lago Conguillío, que destaca por su alta representatividad y la significancia estadística de sus correlaciones.

Respecto al comportamiento de las variables durante las estaciones analizadas (primavera y verano), el PCA permitió identificar patrones diferenciados en ambas cuencas. En verano, se observa una fuerte asociación entre las temperaturas elevadas y la vegetación densa, lo cual se explica por la presencia de condiciones óptimas para el crecimiento vegetal. Durante esta estación, el ángulo de altitud solar, la radiación solar y la temperatura alcanzan sus valores máximos, lo que favorece una mayor actividad fotosintética y, por lo tanto, un aumento en los valores de NDVI (Wang, 2024).

En cambio, en primavera se registran precipitaciones y persiste la cobertura nival remanente del invierno. Por ello, se observa una mayor presencia de vegetación moderada y dispersa. Si bien existe disponibilidad hídrica, las condiciones térmicas aún no son óptimas para el crecimiento de la vegetación densa, y la presencia de nieve en sectores elevados también puede limitar su desarrollo o exposición a los sensores de los satélites.

Esto no implica que la precipitación tenga un efecto directamente negativo sobre la vegetación a lo largo del año, por el contrario, representa una fuente fundamental de agua. Sin embargo, es importante considerar las características particulares del área de estudio

y la estación, donde la cobertura nival actúa como un reservorio hídrico clave, liberando agua durante la estación más seca y beneficiando así el desarrollo de la vegetación (Grippa, 2005). Además, se ha demostrado que la precipitación tiene un efecto más tardío sobre la vegetación. Por ejemplo, un estudio realizado en África Oriental evidenció que la respuesta de la vegetación al régimen de precipitaciones puede variar según la estación del año. En específico, se observó un retraso de 35,5 días en la respuesta del NDVI frente a las lluvias. Generalmente durante la estación seca (verano), se registró un efecto de rezago de hasta dos meses (Feng, 2023).

El comportamiento observado fue en cierta medida inesperado, dado que las condiciones actuales, marcadas por el aumento sostenido de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones, están alterando significativamente el ciclo hidrológico. Estas alteraciones se traducen en un aumento de las tasas de evapotranspiración, aceleración del deshielo glaciar y nival, modificación de los caudales fluviales y una progresiva reducción en la disponibilidad hídrica (IAM, 2023). En consecuencia, se anticipaba que la vegetación presentara signos de estrés hídrico, con menor frondosidad (NDVI), especialmente en un entorno tan sensible como el de los Andes.

No obstante, los resultados obtenidos coinciden con lo reportado en estudios previamente discutidos, que destacan la resiliencia de la vegetación bajo condiciones térmicas favorables, siempre que existan aún niveles mínimos de humedad disponibles en el suelo (Hossain & Li, 2021). Además, es importante señalar que la temperatura y precipitación no son los únicos factores que influyen en el desarrollo de la vegetación, lo que representó una limitación relevante para el estudio al enfocarse únicamente en dichas variables. Factores como la radiación solar, la humedad del suelo, el viento, la cobertura nival y los caudales también juegan un rol clave, dependiendo de las condiciones climáticas de cada zona (Tan et al., 2022).

Sin embargo, se prevé que zonas actualmente caracterizadas por un clima mediterráneo (templado, con inviernos lluviosos y veranos secos y calurosos) evolucionen hacia condiciones más áridas. Esto conllevaría una reducción en la humedad del suelo, especialmente durante los periodos de crecimiento vegetativo, lo cual afectaría negativamente la productividad de los ecosistemas y el NDVI (Vicente-Serrano, 2010; Pizarro, 2022). Ante esto, los resultados del estudio, complementados con otras técnicas de monitoreo, podrían aportar información esencial para diseñar estrategias de mitigación y adaptación frente a esta situación.

## 6. Conclusiones

El estudio se centró en analizar la vegetación mediando el uso del Índice de Diferencias Normalizadas de Vegetación (NDVI) en las cuencas del Lago Conguillío y Laguna Verde. Los resultados obtenidos refutan la hipótesis inicial, la cual planteaba que el aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones se correlacionarían negativamente con el NDVI. Sin embargo, se evidenció una correlación positiva fuerte y significativa entre la temperatura y la vegetación densa, la cual se vincula estrechamente con los procesos de evapotranspiración, constituyendo así un componente central del análisis. Al contrario, la precipitación sí mostró una correlación negativa moderada y significativa con este tipo de cobertura vegetal.

El análisis de componentes principales permitió identificar la influencia estacional sobre cada variable, revelando que la vegetación densa se ve favorecida por las condiciones térmicas propias del verano y, en menor medida, por las precipitaciones de primavera. Por otro lado, la influencia contraria o negativa de la precipitación podría explicarse por factores como nubosidad persistente, sobresaturación de los suelos o cobertura nival, que limitan la radiación y, en consecuencia, la actividad fotosintética.

En cuanto a los objetivos del estudio, se logró realizar un análisis espaciotemporal de la vegetación mediante el uso del NDVI, identificando un aumento sostenido de los distintos tipos de cobertura vegetal, especialmente de la vegetación densa en primavera a lo largo del periodo analizado. Mientras que, en verano no se observaron variaciones considerables, lo que sugiere que la vegetación densa ya se encuentra consolidada y favorecida por las condiciones climáticas propias de la temporada. Asimismo, el análisis estadístico permitió cuantificar la relación entre el NDVI, temperatura y precipitación, evidenciando la sensibilidad del índice ante las variaciones climáticas, principalmente en ecosistemas de alta montaña.

Finalmente, estudio ha demostrado que el uso del NDVI es una herramienta eficaz y ampliamente utilizada en diversas investigaciones para analizar la relación entre la cobertura vegetal y variables climáticas como la temperatura y la precipitación. Su aplicación permitió identificar patrones temporales y espaciales en la dinámica de la vegetación, proporcionando información esencial sobre su comportamiento frente a distintos escenarios de cambio climático a lo largo del periodo estudiado. No obstante, se recomienda complementarla con otras metodologías, especialmente aquellas basadas en

monitoreo en terreno y datos provenientes de estaciones meteorológicas ubicadas estratégicamente.

## 7. Referencias bibliográficas

- Airbus. (2024). *What you should know about Sentinel-2 climate satellites!* Airbus. <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2024-08-what-you-should-know-about-sentinel-2-climate-satellites>
- Allan, C., Xia, J., & Pahl-Wostl, C. (2013). Climate change and water security: challenges for adaptive water management. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(6), 625-632. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.09.004>
- Aquino, M. (2023). *Peru glaciers decimated by climate change: Report*. <https://www.reuters.com/business/environment/peru-glaciers-decimated-by-climate-change-report-2023-11-22/>
- Bari, E., Nipa, N. J., & Roy, B. (2021). Association of vegetation indices with atmospheric & biological factors using MODIS time series products. *Environmental Challenges*, 5, 100376. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100376>
- Boiarskii, B., & Hasegawa, H. (2019). Comparison of NDVI and NDRE Indices to Detect Differences in Vegetation and Chlorophyll Content. *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*, 20-29. <https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003>
- Castro, A. (2023). *Correlación lineal de Pearson*. RPubS. [https://rpubs.com/acastro/correlacion\\_pearson](https://rpubs.com/acastro/correlacion_pearson)
- Chang, X.-Y., Chen, B.-M., Liu, G., Zhou, T., Jia, X.-R., & Peng, S.-L. (2015). Effects of Climate Change on Plant Population Growth Rate and Community Composition Change. *PLOS ONE*, 10(6), e0126228. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126228>
- Chen, X., Li, J., Xu, L., Liu, L., & Ding, D. (2014). Modeling greenup date of dominant grass species in the Inner Mongolian Grassland using air temperature and precipitation data. *International Journal of Biometeorology*, 58(4), 463-471. <https://doi.org/10.1007/s00484-013-0732-1>
- Chen, Z., Wang, W., & Fu, J. (2020). Vegetation response to precipitation anomalies under different climatic and biogeographical conditions in China. *Scientific Reports*, 10(1), 830. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57910-1>
- Cherlinka, V. (2019). *NDVI FAQ: All You Need To Know About NDVI*. EOS Data Analytics. Recuperado de <https://eos.com/blog/ndvi-faq-all-you-need-to-know-about-ndvi/>

- Cong, N., Wang, T., Nan, H., Ma, Y., Wang, X., Myneni, R. B., & Piao, S. (2013). Changes in satellite-derived spring vegetation green-up date and its linkage to climate in China from 1982 to 2010: a multimethod analysis. *Global Change Biology*, 19(3), 881-891. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcb.12077>
- Cordero, R. R., Feron, S., Damiani, A., MacDonell, S., Carrasco, J., Pizarro, J., Karas, C., Jorquera, J., Sepulveda, E., Cabello, F., Fernandoy, F., Wang, C., Khan, A. L., & Casassa, G. (2024). Rapid decline in extratropical Andean snow cover driven by the poleward migration of the Southern Hemisphere westerlies. *Scientific Reports*, 14(1), 26365. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78014-0>
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2024). *Plan de manejo del Parque Nacional Conguillío*. <https://www.conaf.cl/centro-documental/plan-de-manejo-del-pn-conguillio/>
- Cotten-Martin, J. (2020). Hyperspectral and multispectral imaging. *Photonics*. [https://www.photonics.com/Articles/Hyperspectral\\_and\\_Multispectral\\_Imaging/a65595](https://www.photonics.com/Articles/Hyperspectral_and_Multispectral_Imaging/a65595)
- Cuellar, J., Arciniegas, J., & Ortiz, J. (2018). Modelo para la medición de QoE en IPTV. <https://doi.org/10.18046/EUI/ee.3.2018>
- Díaz, D., Morales-Salinas, L., Castellaro, G., & Neira Roman, F. (2010). Topoclimatic Modeling of Thermopluviometric Variables for the Bío Bío and La Araucanía Regions, Chile. *Chilean journal of agricultural research*, 70. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392010000400011>
- Dietz, A. J., Köhler, J., Obrecht, L., Rößler, S., Baumhoer, C. A., Cereceda-Balic, F., & Saavedra, F. (2025). Snow Cover Trends in the Chilean Andes Derived from 39 Years of Landsat Data and a Projection for the Year 2050. *Remote Sensing*, 17(9), 1651. <https://doi.org/10.3390/rs17091651>
- Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. (2020). Landsat 8-9 Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor Level-2, Collection 2 [dataset]. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.5066/P9OGBGM6>
- El Comercio. (2012). *Científicos argentinos estudian glaciares como reguladores climáticos*. <https://www.elcomercio.com/tendencias/ciencia/cientificos-argentinos-estudian-glaciares-reguladores.html>

- Feng, S., Zhang, Z., Zhao, S., Guo, X., Zhu, W., & Das, P. (2023). Time lag effect of vegetation response to seasonal precipitation in the Mara River Basin. *Ecological Processes*, 12(1), 49. <https://doi.org/10.1186/s13717-023-00461-w>
- Fernández-Alberti, S., Abarca-del-Río, R., Bornhardt, C., & Avila, A. (2021). Development and Validation of a Model to Evaluate the Water Resources of a Natural Protected Area as a Provider of Ecosystem Services in a Mountain Basin in Southern Chile. *Frontiers in Earth Science*, 8, 18, Article 539905. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.539905>
- Fuentealba, M., Bahamóndez, C., Sarricolea, P., Meseguer-Ruiz, O., & Latorre, C. (2021). The 2010–2020 'megadrought' drives reduction in lake surface area in the Andes of central Chile (32° - 36°S). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 38, 100952. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100952>
- Gil Martínez, C. (2018). *Análisis de componentes principales (PCA)*. RPubS. [https://rpubs.com/cristina\\_gil/pca](https://rpubs.com/cristina_gil/pca)
- Grippa, M., Kergoat, L., Le Toan, T., Mognard, N. M., Delbart, N., L'Hermitte, J., & Vicente-Serrano, S. M. (2005). The impact of snow depth and snowmelt on the vegetation variability over central Siberia. *Geophysical Research Letters*, 32(21). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2005GL024286>
- Haggag, W., Ali, R., & Al-Ansary, N. (2023). Geographic information systems and remote sensing: Innovative tools for plant health. 19, 2449-2464.
- Hernández Lalinde, J. D., Espinosa Castro, J. F., Peñaloza Tarazona, M. E., Rodríguez, J. E., Chacón Rangel, J. G., Toloza Sierra, C. A., Arenas Torrado, M. K., Toloza Sierra, C. A., Arenas Torrado, M. K., Carrillo Sierra, S. M., & Bermúdez Pirela, V. J. (2019). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *AVFT – Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, 37(5). [http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev\\_aavft/article/view/16165](http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_aavft/article/view/16165)
- Herrera, S., Kotlarski, S., Soares, P. M. M., Cardoso, R. M., Jaczewski, A., Gutiérrez, J. M., & Maraun, D. (2019). Uncertainty in gridded precipitation products: Influence of station density, interpolation method and grid resolution. *International Journal of Climatology*, 39(9), 3717-3729. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc.5878>

- Hossain, M., & Li, J. (2021). NDVI-based vegetation dynamics and its resistance and resilience to different intensities of climatic events. *Global Ecology and Conservation*, 30, e01768. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01768>
- Hou, G., Zhang, H., & Wang, Y. (2011). Vegetation dynamics and its relationship with climatic factors in the Changbai Mountain Natural Reserve. *Journal of Mountain Science*, 8(6), 865-875. <https://doi.org/10.1007/s11629-011-2206-4>
- Huntington, T. G. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 319(1), 83-95. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.003>
- Iniciativa Andina de Montañas. (IAM, 2023). Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en zonas de alta montaña de la región andina. Estudio regional organizado por el Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Elaborado por DEUMAN
- Jolliffe, I. T. (2002). *Principal Component Analysis*. Springer. <https://books.google.cl/books?id=TtVF-ao4fl8C>
- Kang, Y., Wang, Z., Xu, B., Shen, W., Chen, Y., Zhou, X., Liu, Y., Zhang, T., Wang, G., Jia, Y., & Li, J. (2024). Disentangling the Response of Vegetation Dynamics to Natural and Anthropogenic Drivers over the Minjiang River Basin Using Dimensionality Reduction and a Structural Equation Model. *Forests*, 15(8), 1438. <https://www.mdpi.com/1999-4907/15/8/1438>
- Kogut, P. (2024). Hiperespectral y multiespectral: diferencias y usos. EOS Data Analytics. <https://eos.com/es/blog/imagenes-multiespectrales-y-hiperespectrales/>
- Ladera Sur. (2022). *Parque Nacional Conguillío: Mucho más que una cara bonita*. <https://laderasur.spinforma.net/articulo/parque-nacional-conguillio-mucho-mas-que-una-cara-bonita>
- Los, S. O., Collatz, G. J., Bounoua, L., Sellers, P. J., & Tucker, C. J. (2001). Global Interannual Variations in Sea Surface Temperature and Land Surface Vegetation, Air Temperature, and Precipitation. *Journal of Climate*, 14(7), 1535-1549. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<1535:GIVISS>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<1535:GIVISS>2.0.CO;2)

- Masiokas, M. H., Cara, L., Villalba, R., Pitte, P., Luckman, B. H., Toum, E., Christie, D. A., Le Quesne, C., & Mauget, S. (2019). Streamflow variations across the Andes (18°–55°S) during the instrumental era. *Scientific Reports*, 9(1), 17879. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53981-x>
- 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>
- Muñoz-Aguayo, P., Morales-Salinas, L., Pizarro, R., Ibáñez, A., Sangüesa, C., Fuentes-Jaque, G., Toledo, C., & Garcia-Chevesich, P. A. (2024). Spatio-Temporal Behavior of Land Surface Temperatures (LSTs) in Central Chile, Using Terra MODIS Images. *Hydrology*, 11(7), 15, Article 103. <https://doi.org/10.3390/hydrology11070103>
- Nyamjav, L., Nergui, S., Gantumur, B., Zorigt, M., & Jansson, R. (2024). Long-Term Response of Floodplain Meadow Normalized Difference Vegetation Index to Hydro-Climatic and Grazing Pressure: Tamir River Plains, Mongolia. *Land*, 13(6), 781. <https://www.mdpi.com/2073-445X/13/6/781>
- O'Donohue, D. (2024). *Understanding Spectral Reflectance in Remote Sensing*. Mapscaping. <https://mapscaping.com/understanding-spectral-reflectance-in-remote-sensing/>
- Pahl-Wostl, C. (2007). Transitions towards adaptive management of water facing climate and global change. *Water Resources Management*, 21(1), 49-62. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9040-4>
- Pettorelli, N. (2013). The Normalized Difference Vegetation Index. *The Normalized Difference Vegetation Index*, 1-208. <https://doi.org/10.1093/acprof:osobl/9780199693160.001.0001>
- 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/https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
- Phan, P., Chen, N., Xu, L., Dao, D. M., & Dang, D. (2021). NDVI Variation and Yield Prediction in Growing Season: A Case Study with Tea in Tanuyen Vietnam. *Atmosphere*, 12(8), 962. <https://www.mdpi.com/2073-4433/12/8/962>

- Pizarro, R., Valdés-Pineda, R., Garcia-Chevesich, P. A., Ibáñez, A., Pino, J., Scott, D. F., Neary, D. G., McCray, J. E., Castillo, M., & Ubilla, P. (2022). The Large-Scale Effect of Forest Cover on Long-Term Streamflow Variations in Mediterranean Catchments of Central Chile. *Sustainability*, 14(8), 4443. <https://doi.org/10.3390/su14084443>
- Potter, C. S., & Brooks, V. (1998). Global analysis of empirical relations between annual climate and seasonality of NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 19(15), 2921-2948. <https://doi.org/10.1080/014311698214352>
- Rahimi, E., & Jung, C. (2024). Evaluating the applicability of landsat 8 data for global time series analysis [Original Research]. *Frontiers in Remote Sensing, Volume 5 - 2024*. <https://doi.org/10.3389/frsen.2024.1492534>
- S, S., & Joseph, S. (2023). Chapter 4 - Climate change impacts on water resources: An overview. In A. Srivastav, A. Dubey, A. Kumar, S. Kumar Narang, & M. Ali Khan (Eds.), *Visualization Techniques for Climate Change with Machine Learning and Artificial Intelligence* (pp. 55-76). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99714-0.00008-X>
- Sánchez Valenzuela, J., & Calderón, J. (2008). Imperio Alma Verde: material didáctico de apoyo en el aprendizaje del patrimonio natural : Parque Nacional Conguillío - Los Paraguas Memoria (diseñador gráfico)--Universidad de Chile, 2008.]. Santiago.
- Sanz, E., Saa-Requejo, A., Díaz-Ambrona, C. H., Ruiz-Ramos, M., Rodríguez, A., Iglesias, E., Esteve, P., Soriano, B., & Tarquis, A. M. (2021). Normalized Difference Vegetation Index Temporal Responses to Temperature and Precipitation in Arid Rangelands. *Remote Sensing*, 13(5).
- Shen, M., Piao, S., Cong, N., Zhang, G., & Jassens, I. A. (2015). Precipitation impacts on vegetation spring phenology on the Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 21(10), 3647-3656. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcb.12961>
- Shifaw, E., Sha, J., Li, X., Bao, Z., Ji, J., & Chen, B. (2018). Spatiotemporal analysis of vegetation cover (1984–2017) and modelling of its change drivers, the case of Pingtan Island, China. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0473-6>
- Tan, X., Luo, S., Li, H., Hao, X., Wang, J., Dong, Q., & Chen, Z. (2022). Investigating the Effects of Snow Cover and Vegetation on Soil Temperature Using Remote Sensing Indicators in

- the Three River Source Region, China. *Remote Sensing*, 14(16), 4114. <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/16/4114>
- Tan, Z., Tao, H., Jiang, J., & Zhang, Q. (2015). Influences of Climate Extremes on NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) in the Poyang Lake Basin, China. *Wetlands*, 35(6), 1033-1042. <https://doi.org/10.1007/s13157-015-0692-9>
- Turpo Cayo, E. Y., Borja, M. O., Espinoza-Villar, R., Moreno, N., Camargo, R., Almeida, C., Hopfgartner, K., Yarleque, C., & Souza, C. M. (2022). Mapping Three Decades of Changes in the Tropical Andean Glaciers Using Landsat Data Processed in the Earth Engine. *Remote Sensing*, 14(9), 1974. <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/9/1974>
- Van Dijk, A.I.J.M., H.E. Beck, E. Boergens, R.A.M. de Jeu, W.A. Dorigo, C. Edirisinghe, E. Forootan, E. Guo, A. Güntner, J. Hou, N. Mehrnegar, S. Mo, W. Preimesberger, J. Rahman, P. Rozas Larraondo (2025) *Global Water Monitor 2024, Summary Report*. Published by Global Water Monitor Consortium, available at [www.globalwater.online](http://www.globalwater.online)
- Vicente-Serrano, S., Lasanta, T., & Gracia, C. (2010). Aridification determines changes in forest growth in *Pinus halepensis* forests under semiarid Mediterranean climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 614-628. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.02.002>
- Wang, F., Wang, X., Zhao, Y., & Yang, Z. F. (2014). Correlation analysis of NDVI dynamics and hydro-meteorological variables in growth period for four land use types of a water scarce area. *Earth Science Informatics*, 7(3), 187-196. <https://doi.org/10.1007/s12145-013-0139-x>
- Wang, G. X., Jiang, L. M., Xiong, C., & Zhang, Y. S. (2022). Characterization of NDSI Variation: Implications for Snow Cover Mapping. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 18, Article 4304318. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2022.3165986>
- Wang, S., Xing, X., Wu, Y., Guo, J., Li, M., & Fu, B. (2024). Seasonal Response of the NDVI to the SPEI at Different Time Scales in Yinshanbeilu, Inner Mongolia, China. *Land*, 13(4), 523. <https://www.mdpi.com/2073-445X/13/4/523>
- WWF Chile. (2024). *10 datos interesantes sobre los Parques Nacionales de Chile*. <https://www.wwf.cl/?384593/10-DATOS-INTERESANTES-SOBRE-LOS-PARQUES-NACIONALES-DE->



## 8. Anexos

**Anexo 1.** *Tabla con datos climáticos de temperatura media (°C/mes), precipitación (mm/mes) y categorías de cobertura vegetal (dispersa, moderada y densa) (hectáreas/mes) en la cuenca del Lago Conguillío utilizados para el análisis espaciotemporal y estadístico.*

Año	Mes	Estación	Precipitación	Temperatura media	Vegetación dispersa	Vegetación moderada	Vegetación densa
2005	Enero	Verano	46.81	11.09	177.06	301.3	2951.36
2005	Febrero	Verano	0.86	15.33	221.41	408.14	2867.28
2005	Septiembre	Primavera	106.92	2.17	436.68	747.36	201.59
2005	Octubre	Primavera	42.17	5.67	610.73	660.3	691.66
2005	Noviembre	Primavera	410.7	7.13	265.14	349.51	1185.29
2005	Diciembre	Verano	90.23	10.81	224.92	368.87	2024.74
2006	Enero	Verano	191.96	12.83	184.69	388.24	2864.2
2006	Febrero	Verano	68.71	14.31	220.33	426.02	2850.28
2006	Septiembre	Primavera	293.11	2.15	480.12	688.23	363.37
2006	Octubre	Primavera	323.49	3.98	509.08	699.17	671.33
2006	Noviembre	Primavera	82.07	7.39	538.03	710.11	979.28
2008	Febrero	Verano	64.37	15.49	237.71	496.84	2752.53
2008	Octubre	Primavera	92.44	5.18	557.81	814.75	981.15
2008	Noviembre	Primavera	145.41	9.74	184.17	517.01	2039.75
2008	Diciembre	Verano	40.52	12.92	394.04	470.43	2808.51
2009	Enero	Verano	39.37	14.17	201.05	419.62	2810.89
2009	Febrero	Verano	114.39	12.66	226.08	455.68	2851.74
2009	Septiembre	Primavera	156.43	1.9	595.65	617.3	704.62
2009	Octubre	Primavera	398.23	3.72	609.71	662.62	698.46
2009	Noviembre	Primavera	276.75	3.55	623.76	707.94	692.29
2014	Enero	Verano	179.27	12.58	217.46	357.13	2967.09
2014	Febrero	Verano	70.21	12.04	206.07	277.87	3099.73
2014	Octubre	Primavera	131.59	5.91	222.48	573.31	1740.77
2014	Noviembre	Primavera	73.2	6.66	188.22	418.12	2275.78
2014	Diciembre	Verano	70.23	9.87	153.96	262.93	2810.78
2015	Enero	Verano	0.7	14.01	208.16	342.49	2986.81
2015	Febrero	Verano	2.18	13.54	236.97	409.04	2899.42
2015	Septiembre	Primavera	269.65	1.77	523.38	388.79	1196.99
2015	Octubre	Primavera	155.38	3.92	350.27	393.07	1685.16
2015	Noviembre	Primavera	88.32	7.39	177.16	397.34	2173.34

2015	Diciembre	Verano	95.32	10.56	196.16	363.28	2595.38
2016	Enero	Verano	66.12	13.69	215.16	329.22	3017.42
2016	Febrero	Verano	8.44	13.79	237.75	380.86	2969.35
2016	Septiembre	Primavera	128.87	5.19	506.01	438.52	1413.55
2016	Octubre	Primavera	228.3	5.75	372.39	412.97	2100.22
2016	Noviembre	Primavera	156.19	8.94	238.78	387.41	2786.89
2016	Diciembre	Verano	157.47	10.78	218.84	338.68	2865.72
2017	Enero	Verano	92.58	13.12	198.91	289.94	2944.56
2017	Febrero	Verano	147.84	14.41	232.88	336.74	2997.21
2017	Septiembre	Primavera	173.65	1.88	353.29	473.79	617.05
2017	Octubre	Primavera	349.88	3.54	545.11	539.41	854.82
2017	Noviembre	Primavera	106.72	7.34	207.55	517.8	1775.19
2017	Diciembre	Verano	120.71	10.97	177.19	261.5	2325.68
2018	Enero	Verano	64.31	13.16	162.23	214.25	2971.59
2018	Febrero	Verano	41.39	14.65	198.3	287.18	2959.58
2018	Septiembre	Primavera	474.31	2.34	523.71	469.06	1204.01
2018	Octubre	Primavera	249.42	3.81	534.28	458.2	1091.11
2018	Noviembre	Primavera	273.92	7.11	172.9	333.28	2422.42
2018	Diciembre	Verano	106.06	10.84	158.08	227.74	2858
2019	Enero	Verano	97.34	11.9	198.47	289.43	2995.07
2019	Febrero	Verano	51.29	14.52	192.85	290.23	2996.01
2019	Septiembre	Primavera	162.12	2.21	489.97	449.16	947.72
2019	Octubre	Primavera	140.08	4	521.24	502.28	1081.23
2019	Noviembre	Primavera	108.68	7.89	315.4	605.25	1513.89
2019	Diciembre	Verano	41.68	10.63	180.74	233.54	2856.13
2020	Enero	Verano	21.05	13.35	189.79	266.41	2970.66
2020	Febrero	Verano	25.57	13.24	212.51	269.25	3029.39
2020	Septiembre	Primavera	119.76	2.47	501.87	472.59	926.92
2020	Octubre	Primavera	92.26	5.07	523.83	488.5	925.69
2020	Noviembre	Primavera	66.13	8.63	216.49	501.01	1808.98

**Nota.** Las celdas representadas en color gris corresponden a valores obtenidos mediante interpolación lineal simple.

**Anexo 2.** *Tabla con datos climáticos de temperatura media (°C/mes), precipitación (mm/mes) y categorías de cobertura vegetal (dispersa, moderada y densa) (hectáreas/mes) en la cuenca de Laguna Verde utilizados para el análisis espaciotemporal y estadístico.*

Año	Mes	Estación	Precipitación	Temperatura media	Vegetación dispersa	Vegetación moderada	Vegetación densa
2005	Enero	Verano	41.75	11.6	971.82	1228.82	5082.36
2005	Febrero	Verano	0.88	15.77	1056.66	1191.17	4951.76
2005	Septiembre	Primavera	94.63	2.88	944.87	1364.56	553.76
2005	Octubre	Primavera	39	6.28	892.82	1301.47	1247.58
2005	Noviembre	Primavera	370.36	7.76	629.48	847.16	2090.22
2005	Diciembre	Verano	84.48	11.48	812.56	1043.59	3556.64
2006	Enero	Verano	168.76	13.32	995.63	1240.01	5023.06
2006	Febrero	Verano	65.2	14.79	1003.56	1244.61	5002.81
2006	Septiembre	Primavera	272.65	2.72	925.34	1317.27	811.71
2006	Octubre	Primavera	296.09	4.65	1156.05	1386.14	1804.99
2006	Noviembre	Primavera	76.31	7.92	1386.75	1455.02	2798.27
2008	Febrero	Verano	55.27	16.02	981.68	1445.89	4855.78
2008	Octubre	Primavera	86.75	5.75	1141.53	1484.27	1831.55
2008	Noviembre	Primavera	127.17	10.36	1379.69	1352.85	3918.89
2008	Diciembre	Verano	37.54	13.58	882.93	1440.58	4969.8
2009	Enero	Verano	36.34	14.7	885.94	1433.22	5005.71
2009	Febrero	Verano	98.84	13.18	888.96	1425.85	5041.62
2009	Septiembre	Primavera	146.88	2.63	1043.61	1332.7	850.52
2009	Octubre	Primavera	368.39	4.34	915.4	1375.6	966.58
2009	Noviembre	Primavera	260.81	4.21	787.19	1418.51	1082.64
2014	Enero	Verano	159.23	13.04	763.42	1208.12	5439.14
2014	Febrero	Verano	61.53	12.5	546.42	1063.86	5826.69
2014	Octubre	Primavera	118.19	6.51	1209.59	1319.9	3288.5
2014	Noviembre	Primavera	64.25	7.32	1064.03	1152.51	4248.88
2014	Diciembre	Verano	63.71	10.47	918.46	985.11	5209.27
2015	Enero	Verano	0.6	14.56	573.69	1149.03	5703.17
2015	Febrero	Verano	0.93	14.04	712.96	1227.57	5438.38
2015	Septiembre	Primavera	244.59	2.42	795.66	1022.82	2246.83
2015	Octubre	Primavera	139.29	4.44	956.74	1138.43	3314.1
2015	Noviembre	Primavera	74	7.97	1117.83	1254.04	4381.38
2015	Diciembre	Verano	88.4	11.19	866.7	1204.75	5009.43

2016	Enero	Verano	56.11	14.2	615.57	1155.47	5637.48
2016	Febrero	Verano	6.96	14.24	702.88	1194.03	5480.24
2016	Septiembre	Primavera	116.26	5.72	1206.19	1383.8	2459.18
2016	Octubre	Primavera	211.54	6.28	1115.48	1322.55	3739.26
2016	Noviembre	Primavera	140.65	9.52	1024.76	1261.31	5019.33
2016	Diciembre	Verano	140.65	11.34	906.77	1158.19	5196.19
2017	Enero	Verano	82.39	13.59	788.77	1055.07	5373.06
2017	Febrero	Verano	129.56	14.96	679.92	1200.67	5530.43
2017	Septiembre	Primavera	157.47	2.6	832.63	1000.78	1161.65
2017	Octubre	Primavera	329.37	4.22	713.27	930.22	1982.71
2017	Noviembre	Primavera	92.67	7.88	1039.9	1148.72	3321.46
2017	Diciembre	Verano	107.58	11.52	1000.54	1032.64	4602.89
2018	Enero	Verano	55	13.72	652.43	1035.52	5562.06
2018	Febrero	Verano	36.93	15.15	751.22	1056	5423.52
2018	Septiembre	Primavera	438.46	3.04	914.53	1154.11	2252
2018	Octubre	Primavera	225.66	4.47	805.76	1023.01	2061
2018	Noviembre	Primavera	249.34	7.74	1056.55	1094.12	4674.4
2018	Diciembre	Verano	96.83	11.4	729.79	1052.67	5426.19
2019	Enero	Verano	88.94	12.36	651.3	1078.14	5562.22
2019	Febrero	Verano	41.16	14.96	667.09	1052.02	5561.12
2019	Septiembre	Primavera	153.16	2.82	808.62	1042.34	1800.07
2019	Octubre	Primavera	128.08	4.56	971.45	1070.95	2276.24
2019	Noviembre	Primavera	101.14	8.42	1254.54	1173.22	3007.63
2019	Diciembre	Verano	34.43	11.26	668.1	1038.93	5567.04
2020	Enero	Verano	18.04	13.89	725.12	1094.33	5435.17
2020	Febrero	Verano	19.14	13.64	680.71	1062.69	5561.33
2020	Septiembre	Primavera	111.48	3.21	736.26	1030.23	1746.44
2020	Octubre	Primavera	86.77	5.71	764.35	1035.06	1797.31
2020	Noviembre	Primavera	56.09	9.23	1176.09	1203.65	3977.19

**Nota.** Las celdas representadas en color gris corresponden a valores obtenidos mediante interpolación lineal simple.

**Anexo 3.** Valores de área total del NDVI expresados como porcentaje respecto a la superficie total de las cuencas de Lago Conguillío y Laguna Verde (2005–2020), empleados para la elaboración del gráfico de caja.

Año	Lago Conguillío	Laguna Verde
2005	69%	79%
	70%	78%
	28%	31%
	39%	38%
	36%	39%
2006	53%	59%
	69%	79%
	70%	79%
	31%	33%
	38%	47%
2008	45%	61%
	70%	79%
	47%	49%
2009	55%	73%
	74%	79%
	69%	80%
	71%	80%
	38%	35%
2014	40%	36%
	41%	36%
	71%	81%
	72%	81%
	51%	63%
2015	58%	70%
	65%	78%
	71%	81%
	71%	80%
	42%	44%
2016	49%	59%
	55%	74%
	63%	77%
	71%	81%

	72%	80%
	47%	55%
	58%	67%
	68%	80%
2017	69%	79%
	69%	79%
	72%	81%
	29%	33%
	39%	40%
	50%	60%
2018	55%	72%
	67%	79%
	69%	79%
	44%	47%
	42%	42%
	59%	74%
2019	65%	79%
	70%	79%
	70%	79%
	38%	40%
	42%	47%
	49%	59%
2020	66%	79%
	69%	79%
	70%	80%
	38%	38%
	39%	39%
	51%	69%

---