



ANÁLISIS ESPECTRAL ESPACIO-TEMPORAL DE HUMEDALES DE ALTA MONTAÑA Y SU RELACIÓN CON LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA

CAROLINA CALVI^{1*} , EDOARDO MELENDI² , ELEONORA CAROL²

¹*Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS-UBA-CONICET), Intendente Guiraldes 2160,
Ciudad Universitaria, Pabellón INGEIS, C1428EGA, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.*

²*Centro de Investigaciones Geológicas (CIG-UNLP-CONICET), Diagonal 113 y 64,
B1900 La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina.*

RESUMEN. Los humedales de alta montaña de los Andes de Sudamérica son ecosistemas únicos, caracterizados por su hiperhumedad y su estrecha conexión con descargas de agua subterránea o deshielo. Estos ambientes presentan aguas relativamente estancadas o con poca circulación, favoreciendo la proliferación de vegetación que puede ser monitoreada a través de imágenes satelitales. El objetivo de este trabajo es analizar, mediante el uso de sensores remotos, la variación espacio-temporal asociada a los ciclos climáticos en dos humedales altoandinos de ambientes áridos, cuyas condiciones de acceso y de trabajo son limitadas. Para lograrlo, se tomaron dos casos de estudio, uno vinculado a humedales asociado a la descarga de agua subterránea, y otro, sustentado también por cursos fluviales con aportes de la lluvia y del deshielo. La variación espacial se la vinculó con los ciclos climáticos, para lo cual se calcularon los índices espectrales Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) e Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) en años representativos, seleccionados según los índices climáticos Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizado (SPEI) para periodo secos y húmedos e Índice Niño Oceánico (ONI), y datos de estaciones meteorológicas disponibles para el periodo 1980-2022. Los resultados evidenciaron que existe una variación en la extensión de los humedales entre periodos El Niño y La Niña. En los periodos húmedos (El Niño) los humedales presentan las mayores extensiones, mientras que en los secos (La Niña) se ha cuantificado una reducción del área de humedal cercana al 30%. Esto muestra una rápida respuesta hidrológica del ambiente a los cambios climáticos, asociada a aportes de flujo subterráneo de corto recorrido. En consecuencia, es probable que, en un futuro, el impacto de los ciclos atmosféricos, intensificados por el cambio climático, genere una disminución crítica en la superficie de estos humedales. Monitorear la evolución de los humedales altoandinos en condiciones áridas es esencial para caracterizar su respuesta ante los ciclos climáticos. Extrapolar estos análisis a otros humedales en entornos similares permitirá futuras investigaciones a escalas regionales más amplias, facilitando un enfoque integral sobre su comportamiento frente a las variaciones climáticas. Comprender estos ecosistemas frágiles es clave para implementar medidas de conservación y gestión efectivas, especialmente ante la creciente presión del cambio climático global.

Spatio-Temporal Spectral Analysis of High Mountains Wetlands and Their Relationship to Climate Variability

ABSTRACT. The high-altitude wetlands of the Andes in South America are unique ecosystems, characterized by their hyper-humidity and close connection with groundwater discharge or snowmelt. These environments exhibit relatively stagnant waters or low circulation, which favors the proliferation of vegetation that can be monitored through satellite imagery. The objective of this study is to analyze, through the use of remote sensors, the spatiotemporal variation associated with climate cycles in two high-Andean wetlands located in arid environments, where access and working conditions are limited. To achieve this, two case studies were taken: one involving wetlands associated with groundwater discharge, and another supported by river courses with contributions from rainfall and snowmelt.

The areal variation was linked to climate cycles, for which the spectral indices Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Normalized Difference Water Index (NDWI) were calculated for representative years, selected according to the climate indices Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) for dry and wet periods, Oceanic Niño Index (ONI), and data from available meteorological stations for the period 1980-2022. The results showed a variation in the extent of the wetlands between El Niño and La Niña periods. During wet periods (El Niño), the wetlands reached their largest extents, while in dry periods (La Niña), a reduction in wetland area of approximately 30% was quantified. This indicates a rapid hydrological response of the environment to climate changes, associated with contributions from shallow groundwater flow. Consequently, it is likely that in the future, the impact of atmospheric cycles, intensified by climate change, will lead to a critical decrease in the surface area of these wetlands. Monitoring the evolution of high-Andean wetlands in arid conditions is essential to characterize their response to climate cycles. Extrapolating these analyses to other wetlands in similar environments will enable future research on a broader regional scale, facilitating a comprehensive approach to their behavior in the face of climate variations. Understanding these fragile ecosystems is key to implementing effective conservation and management measures, especially in the face of growing pressure from global climate change.

Palabras clave: Índice ONI, índice SPEI, índice NDVI, índice NDWI, humedales.

Keywords: ONI index, SPEI index, NDVI index, NDWI index, wetlands.

Recibido: 15 Octubre 2024

Aceptado: 11 Abril 2025

***Correspondencia:** Carolina Calvi, Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS-UBA-CONICET), Intendente Guiraldes 2160, Ciudad Universitaria, Pabellón INGEIS, C1428EGA, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. E-mail: calvi.ingeis@gmail.com

1. Introducción

Los humedales de alta montaña de los Andes de Sudamérica, situados en la diagonal árida, son ecosistemas únicos, caracterizados por su hiperhumedad y su estrecha conexión con descargas de agua subterránea o deshielo. Estos ambientes, caracterizados por aguas estancadas o de baja circulación, favorecen el crecimiento de vegetación densa, cuya presencia es detectable a través de imágenes satelitales. En este contexto, el sensor remoto se ha consolidado como una herramienta clave, eficiente y accesible para la identificación, evaluación y monitoreo de estos ecosistemas, siendo fundamental para comprender la dinámica de los humedales en relación con la disponibilidad hídrica y las fluctuaciones en las condiciones ambientales (Mallmann *et al.*, 2015; Gallant, 2015; Mahdavi *et al.*, 2018).

La dinámica hidrológica de los humedales de alta montaña está estrechamente vinculada a la variabilidad climática, lo que los convierte en ecosistemas altamente sensibles a los cambios en las precipitaciones, el deshielo y los eventos climáticos extremos, tales como sequías o lluvias intensas (Mejía *et al.*, 2022). Estos cambios afectan significativamente la extensión y la dinámica de los humedales, ya que modificaciones en los patrones de precipitación y deshielo pueden provocar expansiones o reducciones en su superficie, lo que influye directamente en su productividad y cobertura vegetal. En este contexto, el uso de índices climáticos, como el Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizado (SPEI, por su sigla en inglés) para periodo secos y húmedos e Índice Niño Oceánico (ONI, por su sigla en inglés), junto con registros de precipitaciones locales, es esencial para identificar los patrones de variabilidad climática y comprender su influencia en estos ecosistemas. En la región de los Andes Centrales, las fases de El Niño se asocian con un aumento de las precipitaciones, incrementando los aportes hídricos subterráneos y superficiales, lo que favorece la expansión de los humedales. En contraste, las fases de La Niña tienden a generar condiciones más secas, reduciendo el aporte hídrico y disminuyendo la extensión y el vigor de la vegetación (Garreaud *et al.*,

2009; Rivera *et al.*, 2014; Peñalba y Rivera, 2016). Este enfoque integrado de la teledetección e índices climáticos proporciona un marco más preciso para el monitoreo a largo plazo de la respuesta de los humedales altoandinos ante la variabilidad climática (Meza Aliaga y Díaz Villalobos, 2020; Mejía *et al.*, 2022).

A pesar de la creciente cantidad de estudios sobre la variabilidad de estos ecosistemas, aún existe una falta de información detallada sobre la dinámica espacio-temporal de los humedales altoandinos en regiones menos exploradas. Estos humedales suelen encontrarse en zonas de difícil acceso, lo que dificulta su caracterización mediante métodos convencionales. En este sentido, la teledetección satelital se ha consolidado como una herramienta eficiente y de bajo costo para su estudio. A través del análisis de la respuesta espectral de estos ecosistemas en diferentes escalas temporales, es posible detectar cambios en su estructura y composición mediante metodologías avanzadas de clasificación y procesamiento de imágenes multiespectrales (Ozesmi y Bauer, 2002; Mahdavi *et al.*, 2018). En particular, los índices espectrales, como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por su sigla en inglés) e Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI, por su sigla en inglés), han demostrado ser particularmente efectivos para evaluar las condiciones de los humedales altoandinos (Otto *et al.*, 2011; Aducci y Bram, 2015; Mazzarino y Finn, 2016).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo analizar la variación espacio-temporal de dos humedales altoandinos en ambientes áridos, ubicados en una zona poco explorada, mediante el uso de sensores remotos y su relación con los ciclos climáticos. La metodología aplicada se centra en el uso combinado de imágenes satelitales y datos climáticos para evaluar la dinámica de estos humedales en función de los cambios en las precipitaciones y de los eventos extremos asociados con el fenómeno El Niño-Oscilación Sur (ENSO). Se espera que los resultados obtenidos contribuyan a un monitoreo más preciso y a una mejor comprensión de la respuesta de los humedales altoandinos ante la variabilidad climática, además de ofrecer una metodología replicable para su estudio en otras regiones con condiciones similares. Así, este enfoque integrado podrá contribuir a la conservación y el manejo sostenible de estos ecosistemas vulnerables a escala meso y macroregional, en el contexto del cambio climático.

2. Área de estudio

La región de estudio se ubica en los Andes Centrales áridos entre los 32° 5'30.68" y 32°21'50.50" latitud sur y los 70°10'49.50" y 69°50'53.19" longitud oeste. La zona se caracteriza por un alto relieve (alturas que alcanzan 5000 m snm) cuyos cordones montañosos se encuentran separados entre sí por valles y bolsones intermontanos. Las condiciones climáticas son predominantemente áridas siendo la precipitación anual media cercana a 300 mm y la evapotranspiración potencial generalmente superior a 600 mm según el Sistema Nacional de Información Hídrica (<https://snih.hidricosargentina.gob.ar>), condición que refleja el marcado déficit hídrico del área. En esta zona montañosa se concentran campos de nieve y glaciares actuales, y los ríos son, en su mayoría, de carácter permanente, de origen nival-glacial-periglacial.

La selección de los dos sitios de estudio (Fig. 1a y b) se fundamentó en su relevancia como fuentes de abastecimiento de agua para los pobladores locales y como sustento del forraje para la ganadería, así como en la escasez de registros debido a las difíciles condiciones de trabajo de campo y los elevados costos. Asimismo, ambos sitios presentan diferentes características geológicas e hidrogeológicas cuyo estudio en conjunto ofrece la oportunidad de realizar un análisis comparativo más detallado de los factores que regulan su funcionamiento.

En el sitio de Pampa Manantial (Fig. 1c y d), se reconocen humedales a una altitud de 3166-3176 m snm, asociados con la descarga de agua subterránea en forma difusa que aflora en rocas sedimentarias de tipo silicoclásticas. Esta descarga es favorecida por controles estructurales de orientación N-S los cuales han sido parcialmente obliterados por depósitos cuaternarios de facies fluviales y aluvionales, condicionando la dinámica del flujo y la distribución del agua en el sector.

Por otro lado, en el sitio de Valle Hermoso (Fig. 1c y e), se identifican una serie de humedales alimentados por manantiales situados entre los 2978 y 2986 m snm, cuya descarga se produce en rocas volcánicas y evaporíticas. A diferencia de Pampa Manantial, aquí la descarga es de tipo puntual, emergiendo en sectores específicos favorecidos por lineamientos estructurales con orientación NE-SW, que controlan y canalizan el flujo subterráneo hacia la superficie correspondiente a la llanura fluvial del río Volcán.

En ambos sectores, el control estructural del área determina la dinámica del agua subterránea, favoreciendo flujos de corta trayectoria y tiempos de tránsito reducidos desde la zona de recarga hasta la descarga en forma de manantial. Esta rápida circulación, evidenciada en el área mediante trazadores hidroquímicos e isotópicos (Calvi *et al.*, 2024), propicia una rápida conexión entre el agua subterránea y superficial, que condiciona al sistema hidrológico.

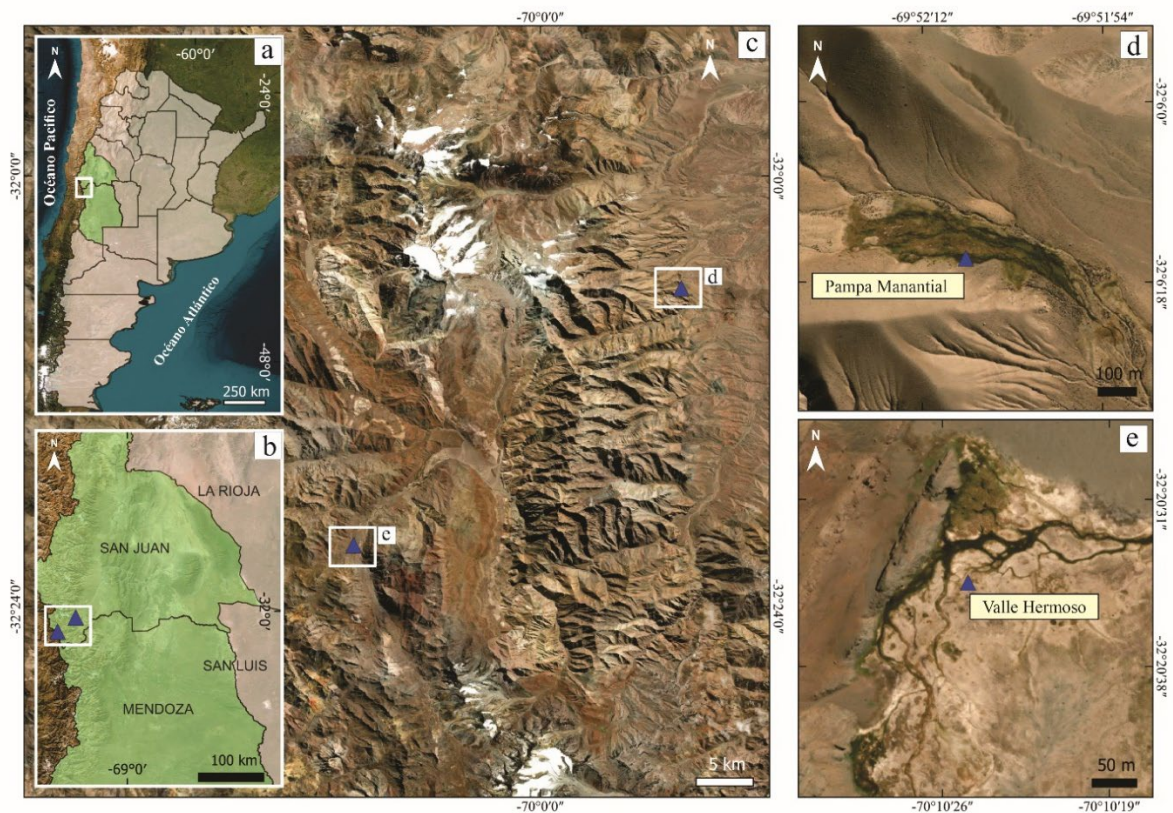


Figura 1 a y b. Ubicación regional del área de estudio; c. Sector de humedales de altura en Pampa Manantial; d y e. Sector de humedales de altura en Valle Hermoso (Triángulos azules identifican el área de estudio).

3. Metodología

Para la selección del período de imágenes a considerar, se realizó previamente un análisis de la variabilidad climática, integrando los registros hidrometeorológicos del área con el cálculo de los índices SPEI y ONI. Dado que el sitio de estudio no cuenta con registros pluviométricos específicos, se utilizaron datos de estaciones meteorológicas cercanas (Fig. 2).

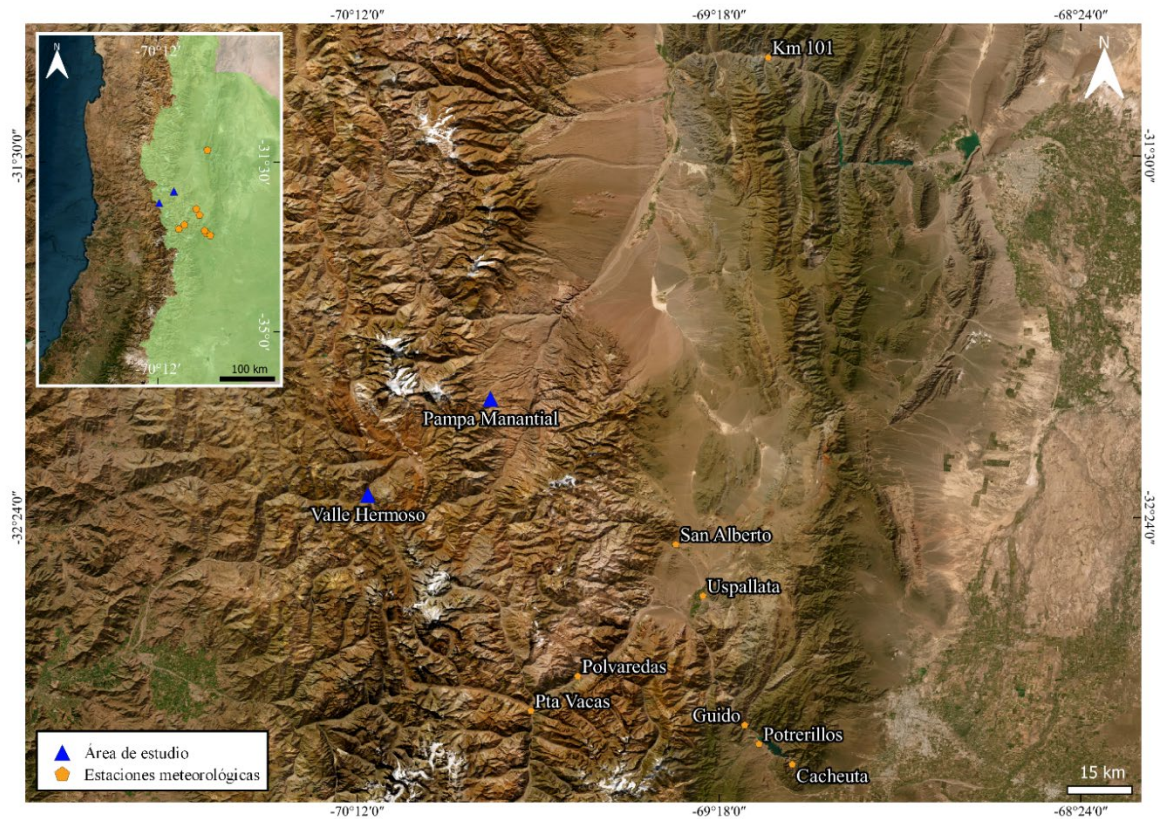


Figura 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas en la zona de estudio.

Este análisis, basado en estadística descriptiva, incluyó el cálculo de promedios para caracterizar las fluctuaciones climáticas. Se evaluaron las series de precipitaciones anuales del período 1993-2019 correspondientes a las estaciones meteorológicas de San Alberto, Uspallata, Pta. de Vacas, Cacheuta, Polvaredas, Guido y Potrerillos (Fig. 2). Adicionalmente, se incorporaron datos de la estación Km 101 para el período 2010-2019 (Fig. 2). Los registros fueron obtenidos de la plataforma del Sistema Nacional de Información Hídrica (snih.hidricosargentina.gob.ar). A partir de estos datos, se calcularon las precipitaciones anuales y se representaron gráficamente junto con el índice SPEI, permitiendo evaluar la relación entre las variaciones climáticas y la disponibilidad hídrica en la región.

La serie de datos para el cálculo del índice SPEI fue obtenida de la página web <http://spei.csic.es> y se calculó siguiendo la ecuación de Vicente-Serrano *et al.*, (2010):

$$\text{SPEI} = W - C_0 + C_1 + C_2 W_1 + d_1 W + d_2 W_2 + d_3 W_3$$

donde $W = -2\ln(P)$, P es la probabilidad de exceder una D determinada, D es la diferencia entre la precipitación y la evaporación potencial, C y d son constantes:

$$C_0 = 2,515517, C_1 = 0,802853, C_2 = 0,010328,$$

$$d_1 = 1,432788, d_2 = 0,189269 \text{ y } d_3 = 0,001308$$

El mismo se aplicó en una escala temporal de 3 meses y permitió caracterizar los años según su clasificación por categorías en función del valor SPEI obtenido (Tabla 1).

Tabla 1. Categorías de SPEI (Fuente: Wang et al., 2015).

SPEI	Categorías
≥ 2	Extremadamente húmedo (EH)
(1,5 a 2,0]	Muy húmedo (MuH)
(1,0 a 1,5]	Moderadamente húmedo (MoH)
(0,5 a 1,0]	Humedad incipiente (HI)
[0,5 a -0,5]	Normal
(-0,5 a -1,0]	Sequía incipiente (SI)
(-1,0 a -1,5]	Moderadamente seco (MoS)
(-1,5 a -2,0]	Muy seco (MuS)
≤ -2	Extremadamente seco (ES)

Los datos anteriores se relacionaron con la ocurrencia e intensidad de los fenómenos El Niño y La Niña, según la información provista por el Centro de Predicción Climática de Estados Unidos (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>), que los determina a partir del Índice ONI. Para evaluar la influencia de ENSO en la variabilidad climática regional, se agruparon los datos en tres fases del ONI de El Niño ($\text{ONI} > 0,5$), La Niña ($\text{ONI} < -0,5$) y Normales (ONI entre $-0,5$ y $0,5$). En cada fase, se calcularon estadísticas descriptivas del SPEI y la precipitación, incluyendo medidas de tendencia central como la media, con el objetivo de caracterizar el comportamiento de ambas variables bajo distintos contextos climáticos. Adicionalmente, se analizaron las asociaciones entre eventos secos (según el SPEI a escala de 3 meses) y eventos fríos (La Niña), así como sus contrapartes: eventos normales o húmedos de SPEI y eventos cálidos (El Niño). La escala temporal de tres meses fue seleccionada debido a que el ONI se define como la media móvil trimestral de las anomalías de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) en el Océano Pacífico ecuatorial. Además, se realizó un análisis de contingencia sobre datos climáticos estacionales para examinar la relación entre las categorías ONI y SPEI a escala de 3 meses. Este enfoque resulta más adecuado para evaluar la relación entre fenómenos climáticos, ya que se enfoca en la coocurrencia de estos, a diferencia del análisis de correlación, que puede no ser eficaz en el caso de fenómenos extremos (Davey *et al.*, 2014).

En base a los datos climáticos e índices ONI y SPEI se seleccionaron imágenes satelitales para el análisis de los índices NDVI y NDWI. Para el momento de captura de cada imagen seleccionadas se efectuó un análisis estadístico de las precipitaciones, y los índices ONI y SPEI mediante coeficientes de correlación de Pearson. Este análisis permitió medir tanto la fuerza como la dirección de las asociaciones entre las variables. Los valores cercanos a ± 1 indican una asociación perfecta, mientras que los valores cercanos a cero reflejan una relación más débil. El signo del coeficiente indica una relación positiva o negativa (Chen y Popovich, 2002). Para determinar el tamaño del efecto de la relación, se empleó la norma de Cohen *et al.* (2003) donde valores del coeficiente de correlación entre 0,10 y 0,29 indican una asociación pequeña, entre 0,30 y 0,49 una asociación media, y los coeficientes superiores a 0,50 sugieren una asociación fuerte.

Para la estimación de los índices espectrales NDVI y NDWI, se empleó EO Browser (<https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser/>), una plataforma de acceso libre desarrollada por Sentinel Hub que permite la visualización, procesamiento y análisis de imágenes satelitales de las diferentes misiones que fueron utilizadas (Tabla 2).

Tabla 2. Registros de las Imágenes Satelitales utilizadas, MSS: Multispectral Scanner (Landsat 1-5); TM: Thematic Mapper (Landsat 4-5); OLI/TIRS: Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor (Landsat 8-9); MSI: MultiSpectral Instrument (Sentinel-2); L1: Nivel 1 (datos sin corrección atmosférica); L2A: Nivel 2 (datos corregidos atmosféricamente)

Fecha	Satélite	Sensor	Nivel de Procesamiento	Cobertura Nubosa (%)
1/11/1980	Landsat 1-5	MSS	L1	4
4/12/1994	Landsat 4-5	TM	L1	1
25/8/1998	Landsat 4-5	TM	L2	5
25/11/2005	Landsat 4-5	TM	L1	1
24/11/2008	Landsat 4-5	TM	L2	2
20/12/2014	Landsat 8-9	OLI/TIRS	L1	0,8
30/12/2015	Landsat 8-9	OLI/TIRS	L2	14
29/12/2021	Sentinel-2	MSI	L2A	0

Para garantizar la calidad y precisión de los datos, se aplicó un proceso de preprocesamiento adecuado a las imágenes satelitales, que incluyó corrección atmosférica, filtrado de nubes y sombras, y el uso de imágenes con reflectancia de superficie. En las imágenes de nivel L1, fue necesario aplicar una corrección atmosférica para minimizar los efectos de dispersión y absorción en la atmósfera. Esto permitió obtener valores más precisos de reflectancia y mejorar la comparabilidad de los datos. Para ello, se utilizó la herramienta Surface Reflectance de QGIS. La presencia de nubes y sus sombras puede introducir errores en la interpretación de los índices espectrales. Para mitigar este efecto, se enmascararon los píxeles afectados mediante el uso de bandas de calidad (QA) o clasificaciones de escena, asegurando un análisis más preciso.

Siempre que fue posible, se priorizó el uso de imágenes ya corregidas atmosféricamente y convertidas a reflectancia de superficie (niveles L2 o L2A), ya que estos datos permiten una mejor comparación temporal y espacial. En el caso de imágenes Landsat de nivel L1 (TM, MSS, OLI/TIRS), fue necesario convertir los valores digitales a reflectancia en la parte superior de la atmósfera (Top of Atmosphere: TOA) antes de su corrección atmosférica. Para este proceso, se utilizó el complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) de QGIS.

El cálculo del NDVI y NDWI varió según el satélite y el sensor empleado (Tabla 3 y 4). Las fórmulas fueron calculadas mediante el editor de scripts personalizados de EO Browser, donde se implementaron las fórmulas correspondientes en lenguaje JavaScript.

Tabla 3. Fórmulas de cálculo de NDVI y NDWI para distintos sensores satelitales.

Satélite / Sensor	Fórmula NDVI	Fórmula NDWI	Bandas y Longitud de Onda (µm)	Resolución Espacial
Sentinel-2 / MSI	(B08 - B04) / (B08 + B04)	(B03 - B08) / (B03 + B08)	B03 (Green): 0,56	10 m
			B04 (Red): 0,665	
			B08 (NIR): 0,84	
Landsat 1-5 / MSS	(B04 - B02) / (B04 + B02)	(B01 - B04) / (B01 + B04)	B01 (Green): 0,50-0,60	60 m
			B02 (Red): 0,60-0,70	
			B04 (NIR): 0,70-0,80	
Landsat 4-5 / TM	(B04 - B03) / (B04 + B03)	(B03 - B05) / (B03 + B05)	B03 (Green): 0,52-0,60	30 m
			B04 (Red): 0,63-0,69	
			B05 (SWIR): 1,55-1,75	
Landsat 8-9 / OLI-TIRS	(B05 - B04) / (B05 + B04)	(B03 - B05) / (B03 + B05)	B03 (Green): 0,53-0,59	30 m
			B04 (Red): 0,64-0,67	
			B05 (NIR): 0,85-0,88	

Tabla 4. Índices NDVI y NDWI: Descripción, Rango y Significado de los Valores.

Índice	Descripción	Rango	Interpretación de valores	Referencia
NDVI	Índice ampliamente utilizado para cuantificar la vegetación verde. Normaliza la dispersión de las hojas verdes en el infrarrojo cercano (NIR) con la absorción de clorofila en el rojo (RED).	-1 a 1	Valores negativos (~ -1): Corresponden a cuerpos de agua.	Jensen (2007).
			Valores cercanos a 0 (-0,1 a 0,1): Representan áreas estériles como rocas, arena o nieve.	
			Valores bajos y positivos (0,2 a 0,4): Indican la presencia de arbustos y pastizales.	
			Valores altos (~1): Representan vegetación densa, como bosques templados y tropicales.	
NDWI	Utilizado para monitorear los cambios en el contenido de agua de los cuerpos de agua, resalta el agua debido a su fuerte absorción de luz en las bandas visibles e infrarrojas cercanas.	-1 a 1	Valores negativos (~ -1): Corresponden a cuerpos de agua.	McFeeters (1996).
			Valores cercanos a 0 (0 a 0,1): Representan áreas no acuáticas (suelo, vegetación).	
			Valores positivos (~ 0,2 a 0,5): Indican áreas de agua poco profunda o cuerpos de agua parcialmente cubiertos por vegetación.	
			Valores altos (~ 0,6 a 1): Representan cuerpos de agua más profundos y claros, especialmente lagos o ríos.	

Los resultados se visualizaron en una escala de colores para facilitar la interpretación de las coberturas de vegetación y cuerpos de agua y se exportaron en formato raster para su análisis posterior en QGIS.

Para la cuantificación de las superficies de interés, se empleó la herramienta Calculadora Raster de QGIS, estableciendo expresiones condicionales para identificar los píxeles que cumplieran con los criterios definidos. Se consideraron umbrales de NDVI > 0,2 para la presencia de vegetación y NDWI < 0 para la identificación de suelo húmedo o vegetación (Tabla 4). A partir de estos resultados, se utilizó la herramienta Contar píxeles para determinar el número total de píxeles correspondientes a cada categoría. Luego, este valor se multiplicó por el área de cada píxel, considerando la resolución espacial del raster, con el fin de calcular la superficie total ocupada por cada unidad de análisis. Este procedimiento aseguró un enfoque sistemático, reproducible y compatible con estudios geoespaciales similares, permitiendo la comparación de resultados en diferentes escenarios espaciales y temporales.

4. Resultados

A continuación, se presentan los resultados del análisis espacio-temporal de los humedales de alta montaña, con un enfoque en el impacto de la variabilidad climática sobre su condición. En primer lugar, se examina la relación entre los índices ONI, SPEI y los registros de precipitación dentro del periodo 1980-2024, mientras que, en una segunda sección, se emplean indicadores espectrales para evaluar la variabilidad superficial de los humedales.

4.1. Variabilidad climática

El análisis del SPEI a escala de 3 meses para el periodo 1980-2019 (Fig. 3) muestra que poco más de la mitad de los años (54%) se caracterizan por eventos de tipo normales con valores de SPEI comprendidos entre 0,99 y -0,99. Por su parte, los eventos húmedos (valores de SPEI mayores a 0,99) representan el 23%; éstos incluyen eventos moderadamente húmedos (valores de SPEI entre 1 y 1,49) en un 17%, muy húmedos (valores de SPEI entre 1,5 y 1,9) en un 5% y extremadamente húmedos (valores de SPEI mayores a 2) en un 1%. Por otro lado, en relación a los periodos secos, en conjunto los mismos representan el 23%, incluyendo éstos a eventos moderadamente secos (valores entre -1 y -1,49) en un 18%, muy secos (valores entre -1,5 y -1,9) en un 5% y extremadamente secos (valores menores a -2) en un 0% (Fig. 3).

Por otra parte, se analiza el índice SPEI a 3 meses, con la ocurrencia e intensidad de eventos cálidos (El Niño) y fríos (La Niña) utilizando el Índice ONI. La comparación de ambos índices muestra que existen en algunos periodos solapamientos en las áreas SPEI y ONI (Fig. 4). Cuando este solapamiento ocurre en valores positivos se asocian eventos normales - húmedos y a El Niño (flechas azules en Fig. 4), mientras que cuando los solapamientos ocurren en valores negativos se asocian a eventos secos y a La Niña (flechas rojas en la Fig. 4).

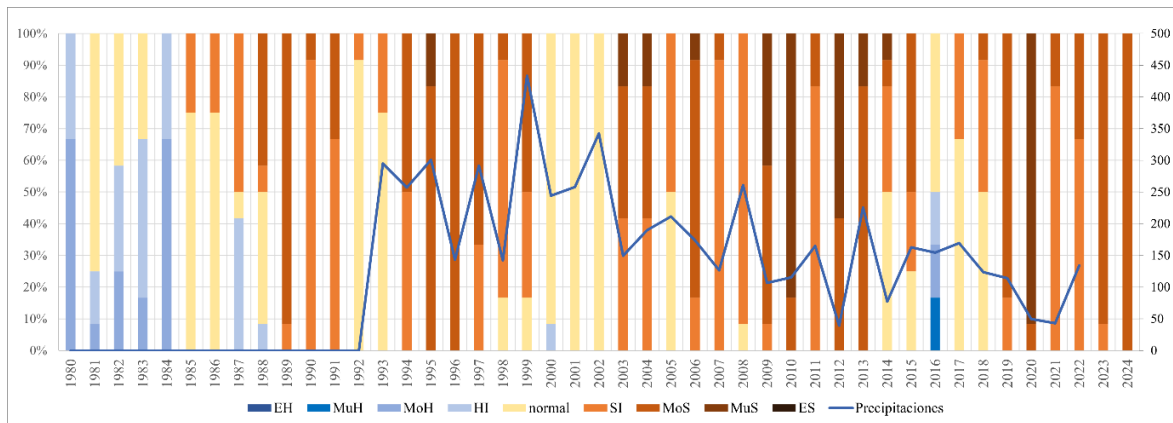


Figura 3. Porcentajes de meses con distintas categorías del SPEI para los años 1980-2024.

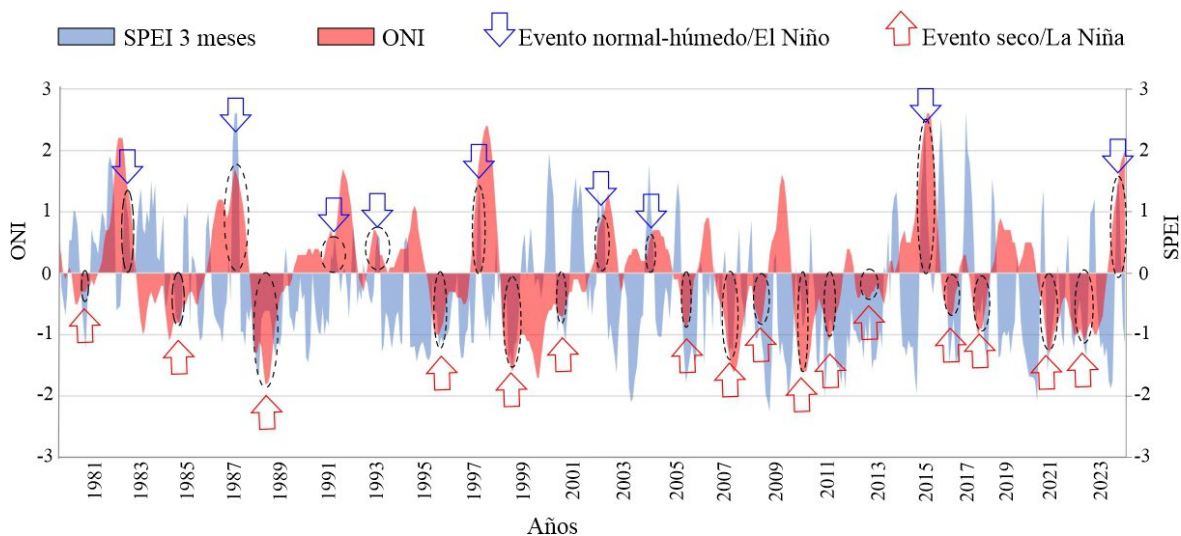


Figura 4. Relación SPEI (3 meses) - ONI.

Por otro lado, el análisis estadístico basado en el cálculo de tablas de contingencia en donde se agrupan las tres categorías del índice ONI (El Niño, La Niña y Normal), junto con las nueve categorías del índice SPEI (Tabla 1) muestra la distribución porcentual (valor de significancia $< 0,05$) entre dichas categorías (Fig. 5). Tal como se describió precedentemente, los eventos normales son los que presentan mayor frecuencia de ocurrencia, y en consecuencia dentro de ellos se encuentran los mayores valores porcentuales de las distintas categorías de SPEI. No obstante, si se comparan porcentualmente los eventos secos y húmedos dentro de los eventos El Niño y La Niña, pueden observarse claras diferencias. Los eventos de El Niño están asociados con una mayor frecuencia a períodos húmedos identificados por el SPEI los cuales totalizan un 22,6%, mientras que en La Niña los periodos húmedos sólo representan el 9%. Por otra parte, los eventos del tipo La Niña se caracterizan por presentar mayores porcentajes de periodos secos con un total de 61%, contra un total del 55,6% durante los eventos de tipo El Niño.

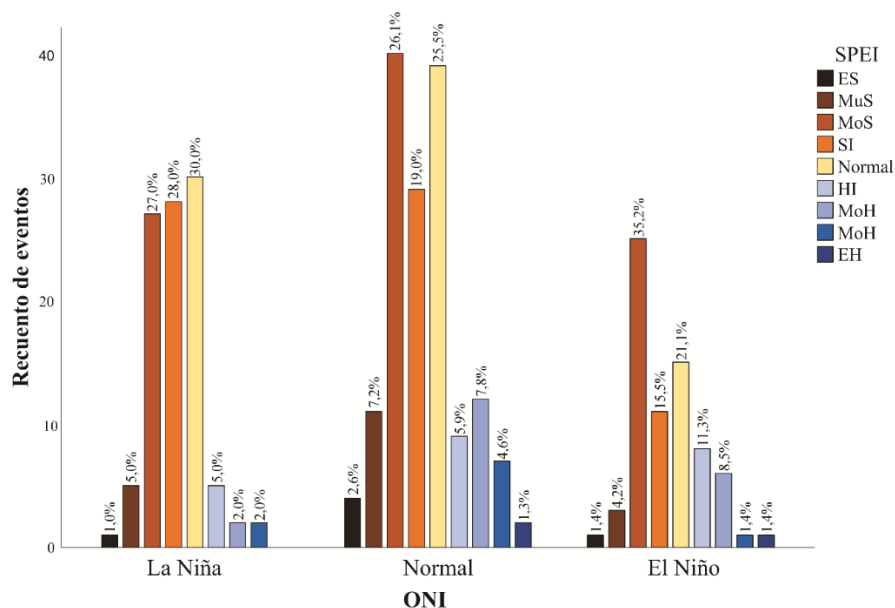


Figura 5. Gráfico de barras obtenido a partir del análisis de contingencia donde se muestra el recuento de eventos y la tasa de ocurrencia (%) de las categorías del SPEI dentro de cada fase del Índice Oceánico de El Niño (ONI).

4.2. Variabilidad espacio-temporal de los humedales de altura

En base a los datos climáticos e índices ONI y SPEI se seleccionaron distintas imágenes satelitales para el análisis de los índices NDVI y NDWI. Las imágenes seleccionadas corresponden a momentos en donde el análisis estadístico mediante coeficientes de correlación de Pearson muestra que existe una correlación positiva entre los eventos asociados con el ENSO (índice ONI), los valores del índice SPEI y la precipitación media anual con valores de coeficientes que varían entre 0,394 y 0,585. Entre el SPEI y la precipitación se encontró una asociación media con un valor de correlación de 0,394. Por otro lado, el ONI con el SPEI y las precipitaciones mostraron una asociación fuerte con valores del coeficiente de correlación de 0,585 y 0,508 respectivamente. De esta manera, los resultados obtenidos apoyan la hipótesis que la alternancia de los eventos de tipo El Niño y La Niña del ONI tienen un impacto en la ocurrencia de los períodos secos y húmedos.

En las imágenes seleccionadas se calcularon los índices NDVI y NDWI para reconocer las variaciones espaciales que presentan temporalmente los humedales de altura en las dos áreas estudiadas. Para el área de Pampa Manantial (Fig. 1d) los valores obtenidos mediante el cálculo del índice NDVI,

permiten identificar y delimitar el área del humedal donde la vegetación se desarrolla sustentada por aportes de descarga de agua subterránea en forma de manantiales. En todos los años analizados se identificaron para el índice NDVI, valores positivos pero pequeños (entre +0,2 y +0,6) correspondientes a campos cubiertos de vegetación (Fig. 6 a-h). Las superficies máximas calculadas, de 0,40 y 0,45 km² según el índice NDVI, se registraron en los años 2014 y 2015, respectivamente (Fig. 6f y 6g; Tabla 5). En contraste, el valor mínimo de 0,17 km² corresponde a 1998 (Fig. 6c; Tabla 5). Por otro lado, superficies intermedias, en torno a los 0,30 km², fueron observadas en 1980, 1994, 2005, 2008, 2014 y 2021 (Fig. 6a, 6b, 6d, 6e, 6h; Tabla 5).

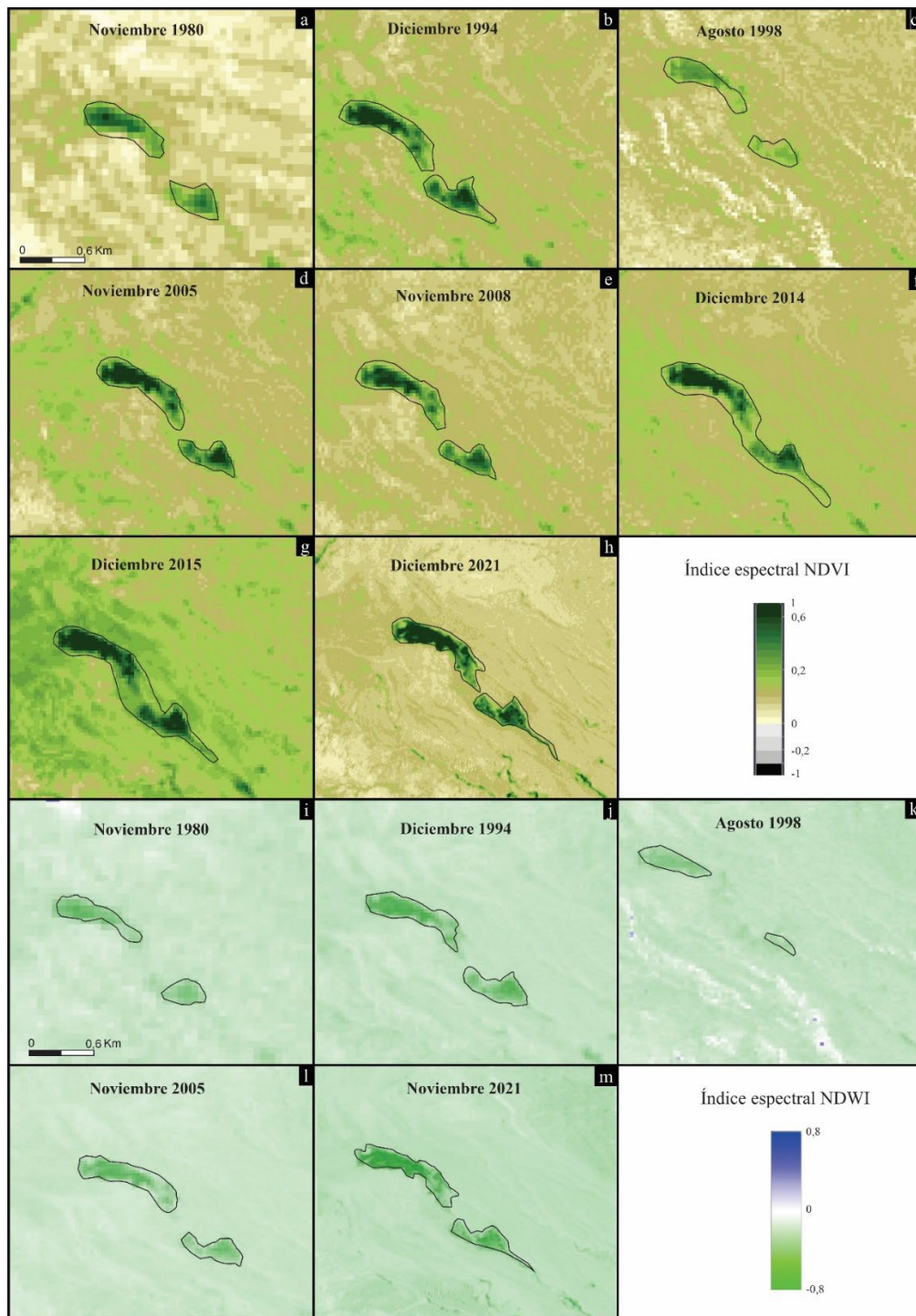


Figura 6. Análisis de índices espectrales en Pampa Manantial. a-h) NDVI; i-m) NDWI.

Tabla 5. Área calculada según los índices NDVI y NDWI para los años analizados.

Fecha	Pampa Manantial (Superficie km ²)		Valle Hermoso (Superficie km ²)	
	NDVI	NDWI	NDVI	NDWI
nov-80	0,27	0,25	0,30	0,22
dic-94	0,30	0,28	0,43	0,27
ago-98	0,17	0,10	0,30	0,22
nov-05	0,33	0,30	0,30	0,25
nov-08	0,33	s/d	0,42	0,28
dic-14	0,40	s/d	0,47	s/d
dic-15	0,45	s/d	0,47	s/d
dic-21	0,35	0,33	0,43	0,23

En cuanto al índice espectral NDWI, los valores obtenidos en el rango de -0,3 a -0,8 indican, en general, condiciones de estrés hídrico en la vegetación asociada al humedal a lo largo de todos los años analizados. Este índice permitió identificar, delimitar y cuantificar la superficie del humedal de Pampa Manantial mostrando una tendencia similar a la variación espacio-temporal observada con el NDVI, aunque con valores más bajos (Fig. 6 i-m, Tabla 5). La mayor diferencia se observó en 1998, cuando la superficie del humedal, medida con el NDWI, fue un 41% menor. En los demás años, la disminución fue de aproximadamente el 10%. En 2008, 2014 y 2015, no fue posible realizar el procesamiento de este índice debido a limitaciones en las imágenes.

Adicionalmente se identificó y delimitó la variación espacio-temporal mediante los índices NDVI y NDWI en una zona de humedales de altura ubicada en Valle Hermoso (Fig. 1e; 7 a-n). En este caso, estos humedales se encuentran dentro de la llanura aluvial del río Volcán, los cuales están alimentados por manantiales y por aguas de deshielo.

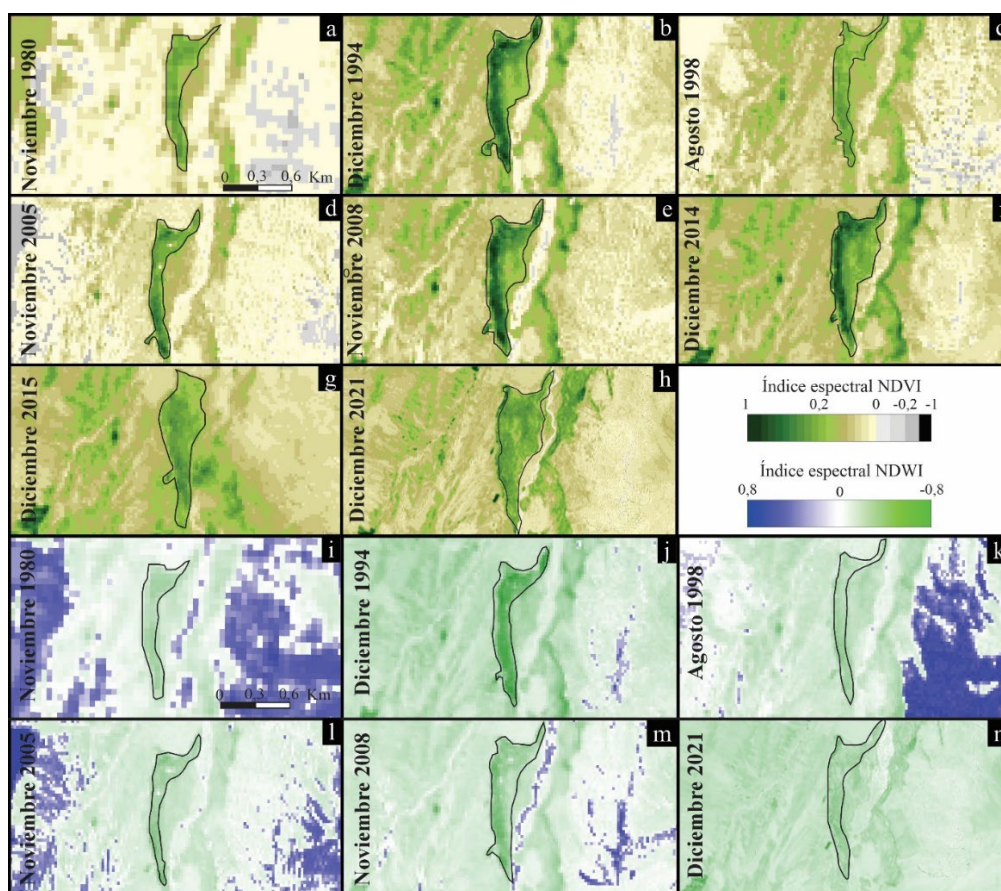


Figura 7. Análisis de índices espectrales en Valle Hermoso. a-h) NDVI; i-n) NDWI.

A lo largo de todos los años analizados, se observa que el índice NDVI en la zona de humedales de Valle Hermoso, varía en un rango de valores positivos entre +0,2 y +0,6 (Fig. 7 a-h). Las superficies máximas, calculadas en 0,47 km² según el índice NDVI, corresponden a los años 2014 y 2015 (Fig. 7 f-g; Tabla 5). Mientras que, en el resto de los años analizados, se registraron valores entre 0,30 y 0,43 km² (Fig. 8 a-e y 8 h; Tabla 5).

En cuanto al índice espectral NDWI, los valores obtenidos en el rango de -0,3 a -0,8 indican, de manera general para todos los años analizados, condiciones de estrés hídrico en la vegetación del sector (Fig. 7 i-n). Al igual que en PM, la superficie registrada con el NDWI es menor que la obtenida con el NDVI, aunque ambas siguen la misma tendencia de variación. El rango de superficie calculado con el NDWI varió entre 0,22 km² y 0,28 km² durante los años analizados (Fig. 7 i-n, Tabla 5). La mayor diferencia entre ambos índices se observó en 2021, con un 47%, mientras que la mínima, del 17%, se registró en 2005.

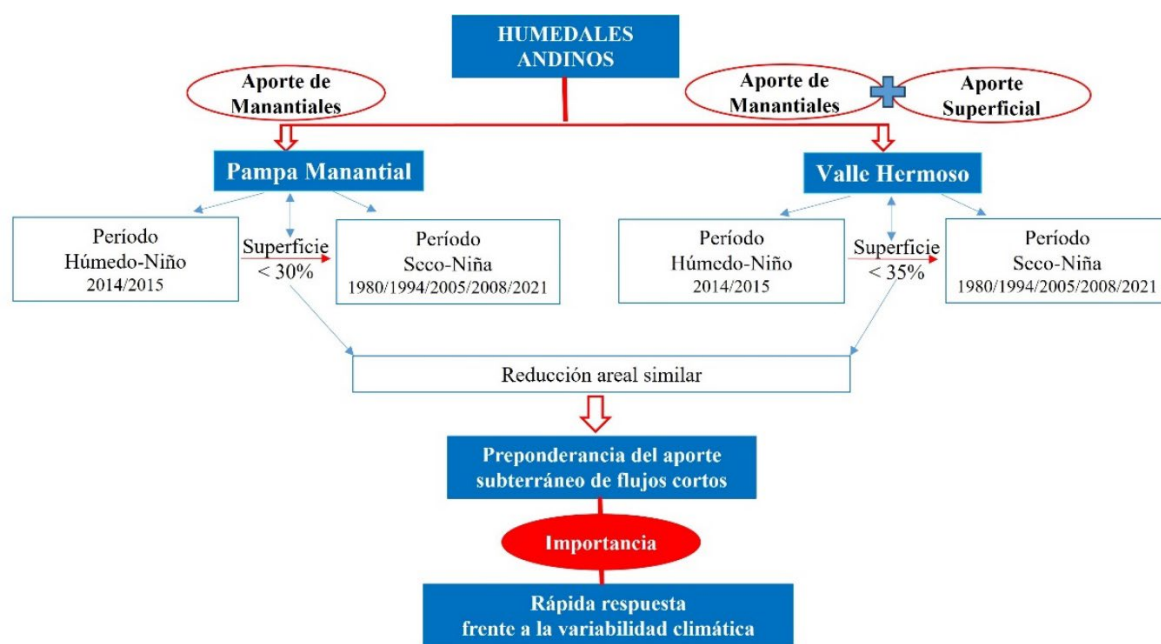


Figura 8. Esquema conceptual que relaciona tipos de humedales analizados, ciclos climáticos y variaciones areales.

5. Discusión

Los índices ONI y SPEI, debido a su naturaleza probabilística, se han convertido en los índices importantes para hacer análisis de riesgo de condiciones hídricas extremas a nivel mundial e informar la probable evolución futura de la situación hídrica (Cancelliere *et al.*, 2007; Llanes-Cárdenas *et al.*, 2018; Arana-Ruedas *et al.*, 2023; Ling *et al.*, 2023). En Argentina, el SPEI ha sido aplicado con éxito en la determinación de ciclos secos y húmedos en la Patagonia andina y extrandina (Scordo *et al.*, 2018; Gaiolini *et al.*, 2025) así como también en el estudio del efecto de la variabilidad climática sobre el estado de la vegetación y la cobertura de agua en cuencas de clima templado (Brendel *et al.*, 2017). Los resultados obtenidos en base al análisis de índices climáticos en conjunto con datos pluviométricos permitieron identificar en la zona andina estudiada la existencia de eventos secos, húmedos y normales, los cuales, en términos generales, mostraron concordancia con la ocurrencia de los fenómenos El Niño y La Niña (Fig. 4 y 5).

En Pampa de Manantial se observó un mayor desarrollo del área de los humedales asociado a El Niño, con valores de NDVI promedio de 0,43 km² en 2014 y 2015. En contraste, durante 1980, 1994, 1998, 2005, 2008 y 2021, los valores disminuyeron (NDVI ~0,30 km²), asociados al ciclo climático de

La Niña. Este mismo comportamiento se observó en Valle Hermoso, donde las mayores superficies (NDVI~ 0,47 km²) también se registraron en 2014 y 2015, mientras que, en el resto de los años analizados, los valores fueron menores (NDVI~0,30 km²). Cabe destacar que, aunque las áreas obtenidas mediante el índice NDWI son menores tanto en Pampa Manantial como en Valle Hermoso, siguen la misma tendencia que el NDVI. Las diferencias calculadas entre el NDVI y el NDWI pueden atribuirse a las limitaciones individuales y las propiedades de cada índice. El primero, es comúnmente usado para evaluar el vigor de la vegetación, es decir, para diferenciar las coberturas de vegetación, según su densidad y salud (Wilson y Norman, 2018; Ashok et al 2021). Por lo tanto, detecta la variabilidad en que estas zonas concentran la humedad, asociado al contenido vegetal (Rouse *et al.*, 1973; Chen *et al.*, 2004; Xue y Su, 2017). La fotosíntesis en la vegetación está influenciada principalmente por el contenido de agua en las hojas, lo que genera diferencias en la reflectancia en el infrarrojo cercano y, por ende, en el NDVI. Las plantas más sanas presentan valores más altos en comparación con las menos saludables (Chuvienco, 1991; Zhu y Woodcock, 2014). Esta variabilidad proporciona información sobre la estabilidad y los cambios en los humedales analizados en la región cordillerana, vinculada al contenido de agua en la vegetación. No obstante, es posible que el NDVI sobrestime los valores de las áreas debido a la influencia del brillo del suelo, causado por una cobertura vegetal escasa o suelos desnudos. Para ajustar estos valores, se empleó el índice de diferencia normalizada de agua (NDWI), que es eficaz para evaluar cuerpos de agua abierta (McFeeters, 1996; Wilson y Norman, 2018). Al combinar las bandas espectrales GREEN-NIR (verde visible e infrarrojo cercano), el NDWI reduce considerablemente la reflectancia del suelo y la vegetación, permitiendo que las masas de agua destaquen en la imagen. Esto facilitó la detección y cuantificación de pequeños cambios en la cantidad de agua en los humedales de Pampa Manantial y Valle Hermoso.

El análisis de la variabilidad superficial de los humedales de altura, junto con los cambios en los ciclos atmosféricos y datos de precipitaciones, revela que las dimensiones de los humedales en Pampa Manantial y Valle Hermoso muestran fluctuaciones relacionadas con los ciclos El Niño/La Niña (Fig. 8). En los ciclos El Niño las precipitaciones corresponden a eventos normales a húmedos y en estas condiciones los humedales presentan mayor desarrollo tanto aquellos asociados a la descarga de agua subterránea como los que son sustentados también por cursos fluviales con aportes de la lluvia y del deshielo. Esto evidencia una rápida respuesta del sistema hidrológico, la cual, si bien es de esperar en aquellas zonas de humedales dependientes de cursos fluviales, no siempre se observa en humedales dependientes de la descarga de agua subterránea. Las descargas de agua subterránea asociadas a flujos de trayectorias largas (desde la recarga hacia la descarga) pueden residir por mucho tiempo en el sistema acuífero, y su respuesta a la variabilidad climática está temporalmente desfazada. En consecuencia, los resultados obtenidos están evidenciando que los flujos subterráneos que sustentan a los humedales corresponden a trayectorias cortas de flujo, características que ya había sido apreciada en estudios hidroquímicos de este sistema hidrogeológico (Calvi *et al.*, 2024). Esto pone de manifiesto la fuerte dependencia que los humedales altoandinos estudiados tienen a los ciclos climáticos, ya que, durante los años asociados al fenómeno de La Niña, ambos tipos de humedales mostraron una reducción del 30 al 35%. En consecuencia, es probable que el impacto de los ciclos atmosféricos en el futuro, intensificados por el cambio climático, genere una disminución crítica en la superficie de estos humedales. Sin embargo, posiblemente, humedales del sector andino con un arreglo estructural diferente, sustentados con flujos subterráneos que tengan un tiempo de circulación mayor, podría retrasar su respuesta a la variabilidad climática afectando de un modo diferente su superficie.

Considerando la escasa extensión que los humedales de altura tienen dentro la región andina árida estudiada, es que su monitoreo resulta un tema prioritario en la evaluación de estos ambientes. En este sentido es importante resaltar que las imágenes satelitales ofrecen una herramienta poderosa para observar y analizar estos ambientes de manera remota, permitiendo la identificación de cambios en la cobertura vegetal y en la distribución del agua (Xiao *et al.*, 2002; Vicente-Serrano *et al.*, 2005; Riaño *et al.*, 2007; Alatorre *et al.*, 2010; Balbarini *et al.*, 2017; Tahsin *et al.*, 2018). Estudios previos han demostrado el éxito de las técnicas de análisis espectral en la caracterización de humedales altoandinos

(Buono *et al.*, 2010; Otto *et al.*, 2011; Mazzarino y Finn, 2016; Pauca-Tanco *et al.*, 2020; Marcosig y Liaudat, 2021; Gaitán *et al.*, 2021).

Los resultados obtenidos destacan la relevancia de estudiar el comportamiento de estos humedales de alta montaña desarrollados en condiciones áridas, ya que es crucial para comprender su respuesta ante los cambios climáticos y para implementar medidas de conservación y gestión eficaces en estos frágiles ecosistemas. La preservación y el manejo adecuado de estos entornos vulnerables son fundamentales en un contexto de creciente presión climática global.

6. Conclusión

En el intervalo temporal estudiado se observa una buena correlación entre el índice SPEI y el Índice Oceánico El Niño (ONI), donde los eventos secos tienden a coincidir con La Niña, mientras que los eventos húmedos se asocian a El Niño. Dichos ciclos climáticos, de diferentes intensidades, influyen en la cantidad de milímetros precipitados y, en consecuencia, en la recarga de acuíferos y flujos de agua superficial, repercutiendo en el aporte de agua que sustenta a los humedales de altura.

Los humedales estudiados, asociados a la descarga de agua subterránea como los que son sustentados también por cursos fluviales con aportes de la lluvia y del deshielo, evidenciaron una rápida respuesta del sistema hidrológico a los ciclos climáticos. Se observaron incrementos en las superficies de los humedales, según los índices NDVI y NDWI, durante El Niño, mientras que se registró una disminución de aproximadamente 30% durante La Niña. Este fenómeno se explica por el hecho de que, en ambos tipos de humedales, la principal fuente de agua proviene del aporte de aguas subterráneas, las cuales están asociadas a flujos cortos debido al control estructural del área. Sin embargo, es posible que este comportamiento varíe en áreas donde el tiempo de tránsito del agua subterránea sea más prolongado debido a diferencias en el arreglo estructural, lo que podría retrasar su respuesta frente a la variabilidad climática.

Resulta esencial monitorear la evolución de este tipo de humedales altoandinos en condiciones áridas para caracterizar su comportamiento frente a los ciclos climáticos en un contexto de cambio climático global.

Referencias

- Adauto, M., Bram, L.W. 2015. Identificación de humedales alto andinos integrando imágenes Landsat Aster GDEM con árbol de decisión sobre la cabecera de las cuencas de pisco y pampas en Huancavelica-Perú. *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE.
- Alatorre, L.C., Beguería, S., Vicente-Serrano, S.M. 2010. Análisis de la evolución espacio-temporal del NDVI sobre áreas vegetadas y zonas de riesgo de erosión en el Pirineo Central. *Pirineos* 165, 7-27. <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2010.165001>
- Arana-Ruedas, D.P.R., Moggiano, N. 2023. ENSO Influence on Agricultural Drought Identified by SPEI Assessment in the Peruvian Tropical Andes, Mantaro Valley. *Manglar* 20(2), 157-167.
- Ashok, A., Ponnammam Rani, H., Jayakumar K.V. 2021 Monitoring of dynamic wetland changes using NDVI and NDWI based landsat imagery, *Remote Sensing Applications: Society and Environment* V 23. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100547>
- Balbarini, S., Comes, D., Langer, K. 2017. Estudio comparativo de índices de vegetación derivado de imágenes satelitales de mediana resolución y sensores terrestres: su aplicación en la viticultura de precisión. *Boletín de Estudios Geográficos* 108, 9-32. <https://bdigital.uncu.edu.ar/10249>
- Brendel, A., Bohn, V.Y., Piccolo, M.C. 2017. Variabilidad de la precipitación y su relación con los rendimientos agrícolas en una región semiárida de la llanura pampeana (Argentina). *Estudios Geográficos* 78, 282, 7-29. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201701>

- Buono, G., Oesterheld M., Nakamatsu V., Paruelo J.M. 2010. Spatial and temporal variation of primary production of Patagonian wet meadows. *Journal of Arid Environments* 74(10), 1257–1261. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.05.026>
- Cancelliere, A., Mauro, G.D., Bonaccorso, B., Rossi, G. 2007. Drought forecasting using the standardized precipitation index. *Water Resources Management* 21, 801-819. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9062-y>
- Calvi, C., Carol, E., Fennell, L., Naipauer, M. 2024. Assessment of hydrological systems associated with groundwater discharges in arid high mountain environments of the Argentine Andes. *Groundwater for Sustainable Development* 101218. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101218>
- Chen, P.Y., Popovich, P.M., 2002. *Correlation: Parametric and Nonparametric Measures*, vol. 139. Sage.
- Chen, J., Jönsson, P., Tamura, M., Gu, Z., Matsushita, B., Eklundh, L. 2004. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. *Remote Sensing of Environment* 91, 332-344. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.03.014>
- Chuvieco, E. 1991. Fundamentos de teledetección espacial. *Estudios Geográficos* 52(203), 371.
- Cohen, J., Cohen, P., West, S.G., Aiken, L.S. 2003. *Applied Multiple Regression/correlation Analysis for the Behavioral Sciences*, third ed. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ. <https://doi.org/10.4324/9780203774441>
- Davey, M.K., Brookshaw, A., Ineson, S. 2014. The probability of the impact of ENSO on precipitation and near-surface temperature. *Climate Risk Management* 1, 5-24. <http://doi.org/10.1016/j.crm.2013.12.002>
- Gaiolini, M., Acosta, R., Carol, E., Colombani, N. 2025. Assessing the effects of ENSO-induced climate variability on shallow coastal groundwater reserves of north Patagonia, Argentina. *Groundwater for Sustainable Development*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2025.101427>
- Gaitán, J., Ciano, N., Oliva, G., Bran, D., Butti, L., Cariac, G., Caruso, C., Opazo, W., Ferrante, D., Echevarria, D., Bueno, G., Fantozzi, A., Guirado, E., Maestre, F. 2021. La variación temporal del índice NDVI predice los cambios temporales de la cobertura vegetal en las tierras secas de la Patagonia argentina. *Ecosistemas* 30(3), 2229. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2229>
- Gallant, A.L. 2015. The challenges of remote monitoring of wetlands. *Remote Sensing* 7(8), 10938-10950. <https://doi.org/10.3390/rs70810938>
- Garreaud, R., Vuille, M., Compagnucci, R., Marengo, J. 2009. Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281(3-4), 180-195. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>
- Jensen, J.R. 2007. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Pearson Prentice Hall.
- Ling, M., Han, H., Hu, X., Xia, Q., Guo, X. 2023. Drought characteristics and causes during summer maize growth period on Huang-Huai-Hai Plain based on daily scale SPEI. *Agricultural Water Management* 280, 108198. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108198>
- Llanes-Cárdenas, O., Gaxiola-Hernández, A., Estrella-Gastelum, R.D., Norzagaray-Campos, M., Troyo-Diéguez, E., Pérez-González, E., de J. Pellegrini Cervantes, M. 2018. Variability and factors of influence of extreme wet and dry events in Northern Mexico. *Atmosphere* 9(4), 122. <https://doi.org/10.3390/atmos9040122>
- Mahdavi, S., Salehi, B., Granger, J., Amani, M., Brisco, B., Huang, W. 2018. Remote sensing for wetland classification: A comprehensive review. *GIScience & Remote Sensing* 55(5), 623-658. <https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1419602>
- Mallmann, C.L., Prado, D.D.A., Pereira Filho, W. 2015. Índice de vegetação por diferença normalizada para caracterização da dinâmica florestal no parque estadual Quarta Colônia, estado do Rio Grande do Sul-Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física, Recife* 8(5), 1454-1469. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20150080>
- Marcosig, I.P., Liaudat, D.T. 2021. Análisis de la dinámica de dos mallines de altura en Vallecitos, Cordón del Plata, Mendoza, Argentina en el periodo 2002-2019. *Acta Geológica Lilloana* 1-24. <http://doi.org/10.30550/j.agl/2021.33.1/2021-02-18>

- Mazzarino, M., Finn, J.T. 2016. An NDVI analysis of vegetation trends in an Andean watershed. *Wetlands Ecology and Management* 24, 623-640. <https://doi.org/10.1007/s11273-016-9492-0>
- 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>
- Mejía, J.F., González, J.D., Albarrán, A. 2022. Influencia de la variabilidad climática en los pantanos altoandinos de la microcuenca Miguaguó Andes venezolanos. *Revista de Ciencias Ambientales* 56 (2), 38-62. <https://doi.org/10.15359/rca.56/2.3>
- Meza Aliaga, M., Díaz Villalobos, Y. 2014. Efectos de la variabilidad climática sobre las fluctuaciones del nivel de las aguas y actividad ganadera en humedales altoandinos. *Interciencia* 39(9), 651-658.
- Otto, M., Scherer, D., Richters, J. 2011. Hydrological differentiation and spatial distribution of high-altitude wetlands in a semi-arid Andean region derived from satellite data. *Hydrology and Earth System Sciences* 15, 1713-1727. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1713-2011>
- Ozesmi, S.L., Bauer, M.E. 2002. Satellite remote sensing of wetlands. *Wetlands ecology and management* 10, 381-402. <https://doi.org/10.1023/A:1020908432489>
- Pauca-Tanco, A., Ramos-Mamani, C., Luque-Fernández, C.R., Talavera-Delgado, C., Villasante-Benavides, J.F., Quispe-Turpo, J.P., Villegas-Paredes, L. 2020. Análisis espacio temporal y climático del humedal altoandino de Chalhuanca (Perú) durante el periodo 1986-2016. *Revista de Teledetección* 55, 105-118. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13325>
- Peñalba, O.C., Rivera, J.A. 2016. Precipitation response to El Niño/La Niña events in Southern South America – emphasis in regional drought occurrences. *Advances in Geosciences* 42, 1-14. <https://doi.org/10.5194/adgeo-42-1-2016>
- Riaño, D., Moreno Ruiz, J.A., Isidoro, D., Ustin, S.L. 2007. Global spatial patterns and temporal trends of burned area between 1981 and 2000 using NOAA-NASA Pathfinder. *Global Change Biology* 13, 40-50. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01268.x>
- Rivera, J.A., Peñalba, O.C., Villalba, R. 2014. ENSO-related precipitation variability in the Andes of subtropical Argentina: relationships with large-scale atmospheric circulation. *International Journal of Climatology* 34(12), 3476-3492.
- Rouse, J.W., Jr., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. 1973. *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation* (No. NASA-CR-132982). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19750020419?utm>
- Scordo, F., Piccolo, M.C., Perillo, G.M.E. 2018. Aplicación del índice de precipitación evapotranspiración estandarizada (SPEI) para identificar periodos húmedos y secos en la Patagonia andina y extra andina argentina. *Geosciences = Geociências* 37(2), 423-436. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v37i2.12241>
- Tahsin, S., Medeiros, S.C., Singh, A. 2018. Assessing the resilience of coastal wetlands to extreme hydrologic events using vegetation indices: A review. *Remote Sensing* 10(9), 1390. <https://doi.org/10.3390/rs10091390>
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I. 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate* 23(7), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Vicente-Serrano, S., Lasanta, T., Romo, A. 2005. Analysis of Spatial and Temporal Evolution of Vegetation Cover in the Spanish Central Pyrenees: Role of Human Management. *Environmental management* 34, 802-18. <https://doi.org/10.1007/s00267-003-0022-5>
- Wang, K., Li, Q., Yang, Y., Zeng M., Li, P., Zhang, J. 2015. Analysis of spatio-temporal evolution of droughts in Luanhe River Basin using different drought indices. *Water Science and Engineering* 8(4), 282-290. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2015.11.004>
- Wilson, N.R., Norman, L.M. 2018. Analysis of vegetation recovery surrounding a restored wetland using the normalized difference infrared index (NDII) and normalized difference vegetation index (NDVI).

- International Journal of Remote Sensing* 39(10), 3243-3274. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.20170110.1080/01431161.2018.1437297>
- Xue, J., Su, B. 2017. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors* 2017(1353691), 1-17. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>
- Xiao, X., Boles, S., Frolking, S., Salas, W., Moore III, B., Li, C., He, L., Zhao, R. 2002. Observation of flooding and rice transplanting of paddy rice fields at the site to landscape scales in China using vegetation sensor data. *International Journal of Remote Sensing* 23(15), 3009-3022. <https://doi.org/10.1080/01431160110107734>
- Zhu, Z., Woodcock, C.E. 2014. Automated mapping of land surface phenology using MODIS time series. *Remote Sensing of Environment* 152, 166-177. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.06.013>