

Metodología para el análisis de la frecuencia de cuerpos de agua someros en la región pampeana, Argentina

Methodology for the analysis of the frequency of shallow water bodies in the Pampean region, Argentina

AUTORÍA

Nicolás Emanuel Vidal Quini 

Universidad Nacional del Sur - CONICET.
Departamento de Geografía y Turismo, 12 de Octubre y San Juan, B8000BFW, Bahía Blanca, Argentina.

Instituto Argentino de Oceanografía (IADO),
Universidad Nacional del Sur (UNS) - CONICET,
B8000BFW, Bahía Blanca, Argentina. Florida
8000 (Camino La Carrindanga km 7,5)
Complejo CCT CONICET Bahía Blanca,
Edificio E1.

Alejandra Mabel Geraldi 

Universidad Nacional del Sur - CONICET.
Departamento de Geografía y Turismo, 12 de Octubre y San Juan, B8000BFW, Bahía Blanca, Argentina.

Instituto Argentino de Oceanografía (IADO),
Universidad Nacional del Sur (UNS) - CONICET,
B8000BFW, Bahía Blanca, Argentina. Florida
8000 (Camino La Carrindanga km 7,5) Complejo
CCT CONICET Bahía Blanca, Edificio E1.

DOI

<https://doi.org/10.14198/INGEO.23410>

CITACIÓN

Vidal Quini, N. E. & Geraldi, A. M. (2023). Metodología para el análisis de la frecuencia de cuerpos de agua someros en la región pampeana, Argentina. *Investigaciones Geográficas*, (80), 107-127. <https://doi.org/10.14198/INGEO.23410>

CORRESPONDENCIA

Nicolás Emanuel Vidal Quini
(nicolasvidalquini@gmail.com)

HISTORIA

Recibido: 26 agosto 2022
Aceptado: 22 marzo 2023
Publicado: 19 julio 2023
(Publicación anticipada: 18 mayo 2023)

TÉRMINOS

© la autoría

 Este trabajo se publica bajo una licencia de [Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Resumen

Los cuerpos de agua someros pampeanos en Argentina poseen una estrecha relación ante la variación del régimen de precipitaciones y temperaturas. Estos ecosistemas son fundamentales en destacados procesos ambientales, pero se desconoce su presencia y servicios ambientales. En las últimas décadas se acentuaron las amenazas de los efectos de la variabilidad climática y las actividades agrícolas que intervienen y modifican la hidrografía regional. El objetivo del presente trabajo es monitorear la evolución de cuerpos de agua y su relación con la variabilidad climática durante un período de tiempo de 35 años a partir de imágenes de satélite y datos meteorológicos. Se pretende estudiar su dinámica en función de los cambios en las temperaturas y precipitaciones. Se trabajó con la colección histórica Landsat durante el período 1986-2021 en relación con datos climáticos por medio de un análisis de regresión ANCOVA y un índice climático de evapotranspiración-precipitación. Los resultados obtenidos han permitido identificar la distribución en la cuenca de cuerpos de agua semipermanentes destacando que las temperaturas poseen un efecto de magnitud más fuerte que las precipitaciones que determinaría su presencia o desecación. La metodología propuesta enmarca la necesidad de generar este tipo de información acerca de la respuesta del sistema hidrográfico ante potenciales amenazas e identificación de vulnerabilidades.

Palabras clave: cuerpos de agua someros; variabilidad climática; tele-detección; escenarios hidrográficos; región Pampeana.

Abstract

The shallow lakes of the Pampa region in Argentina are highly prone to variability in temperature and precipitation regime. These ecosystems are fundamental in environmental processes, but their presence and environmental services are unknown. Climate variability and agricultural activities have threatened them in recent decades by intervening and modifying the regional hydrography. This study seeks to monitor the evolution of shallow lakes and their relationship with climate variability over a period of 35 years using satellite imagery and meteorological data. It aims to study the dynamics in accordance with the change in temperature and precipitations. The historical collection of Landsat for 1986-2021 related to climate data through an ANCOVA analysis and a climate index of evapotranspiration-precipitation have been used. The

results allow us to identify the distribution in the basin of the shallow lakes as semi-permanent, emphasizing that temperatures have a more substantial effect than the precipitations that would determine their presence or drying out. The proposed methodology frames the need to generate this type of information about the response of the hydrographic system to potential hazard and the identification of vulnerabilities.

Keywords: shallow lakes; climatic variability; remote sensing; hydrographic scenarios; Pampa region.

1. Introducción

En las últimas décadas se han desarrollado intervenciones en el marco estructural de la hidrografía de la cuenca mediante obras hidráulicas para mitigar los efectos de la variabilidad climática, en especial durante períodos húmedos donde inundaciones han afectado a la población y sistemas productivos agrícolas-ganaderos. Esta situación ha promovido diferentes escenarios en el paisaje hídrico debido a que la variación del régimen de temperaturas y precipitaciones generan una fuerte dependencia en el estado de los sistemas de humedales ante la variabilidad climática. A su vez, en contextos agrícolas con suelos altamente productivos, los cambios de usos de suelo por procesos de extensión de la superficie cultivada inducen a transformaciones territoriales (Paruelo et al., 2006; Maldonado, 2019; Somoza et al., 2020) que comprometen a los humedales y proponen diferentes situaciones ambientales ante procesos de contracción y dilatación en los cuerpos de agua someros semi-permanentes y permanentes, sequías e inundaciones, alteraciones en la calidad de agua, entre otros (Miraglia, 1996; Quirós et al., 2002; Quirós et al., 2006; Gerdali 2009; Contreras et al., 2021). En este entorno, los cuerpos someros de agua como lagunas, charcas y bañados poseen un rol fundamental para los ciclos hidrológicos, biogeoquímicos, biodiversidad, cantidad de agua disponible (Downing et al., 2006; Schindler, 2009; Downing, 2010; Gerdali et al., 2011; McDonald et al., 2012; Matthew et al., 2016) y en el desarrollo de actividades vinculadas a la agricultura, recreación y ocio y, el consumo del recurso por parte de los asentamientos poblacionales (Monachesi, 1995; Oficina de vinculación científico-legislativa, 2021) siendo componentes esenciales en el territorio.

Sin embargo, en la actualidad existe un desconocimiento acerca de los humedales en la región pampeana en aspectos de su configuración espacial, situación y aportes de servicios ecosistémicos lo cual induce al desconocimiento de sus funciones ambientales. Estos ecosistemas se constituyen como atenuadores de las condiciones climáticas extremas con alto valor paisajístico y sus propiedades funcionales difícilmente pueden ser concebidos sino en el contexto de la matriz que los rodea (Kandus & Minotti, 2019a). Dichos cuerpos de agua someros refieren a lagunas someras, charcas y bañados donde muchas tasas y procesos son más intensos, complejos o abundantes que en lagos más grandes (Downing, 2010). Es por ello, que el conocimiento de su identificación y configuración espacial en relación a la respuesta ante eventos climáticos resulta crucial en el aspecto funcional de los ecosistemas y pone énfasis como unidad natural de gestión ambiental (Kandus & Minotti, 2019b).

Dichos ecosistemas se conforman como recurso hídrico fundamental para las actividades antropogénicas en la región pampeana (Gerdali et al., 2011). En la cuenca fluvio-lacustre Encadenadas del Oeste ubicada en esta región, la escasez o el exceso hídrico traen diversos escenarios complejos. Durante una época de déficit hídrico se compromete la disponibilidad de agua por la desecación de humedales y el avance agrícola se expande sobre estos y sus áreas de influencia. Sin embargo, cuando ocurren precipitaciones excesivas, las bajas pendientes influyen en la escorrentía pues los movimientos horizontales del agua se ralentizan y se dificulta la evacuación de los excedentes hídricos (Gerdali, 2009; Barragán & Gerdali, 2018).

En el pasado, existieron inundaciones y anegamientos que generaron grandes consecuencias socio-ambientales (Scarpatti et al., 2008; Gerdali, 2009), en especial, sobre los asentamientos ubicados en la ribera de las lagunas Encadenadas del Oeste en el sector terminal de la cuenca. Estos son los cuerpos de agua someros más grandes de la región (Inventario de humedales de la provincia de Buenos Aires, 2019) y son utilizados para actividades productivas, de ocio y recreación, abastecimiento, entre otras. Por este motivo, se ha intervenido y modificado los sistemas fluviales de la cuenca para abastecimiento del agua mediante la regulación de arroyos, canalizaciones y desecamientos que cumplen distintas funcionalidades según el período climático (Quirós et al., 2006).

La detección remota o teledetección brinda actualmente una gran cantidad de información espacio-temporal para el monitoreo de la situación hídrica en cuencas hidrográficas, cuerpos someros y humedales en referencia a sus aspectos ecológicos en lugares de difícil acceso en campo (Salvia et al., 2009; Borro et al.,

2014; Guo et al., 2017; Kandus et al., 2018; Xia et al., 2019; Solana et al., 2021). Actualmente, los estudios de riesgo y vulnerabilidad, causados por los efectos de la variabilidad climática, se pueden arribar desde la construcción de índices a partir de sensores satelitales (Murray et al., 2018; Sandi et al., 2019). Los índices espectrales han evolucionado y se han mejorado en función de las características de los sensores que obtienen las imágenes. El *Normalized Difference Water Index* (NDWI) ha sido ampliamente utilizado para la detección de cuerpos de agua y zonas con alto contenido de humedad lo cual resulta importante para monitoreo de distintos tipos de humedales como lagunas someras, charcas, bañados, ríos, arroyos, entre otros (Fisher et al., 2016; Huang et al., 2018; Laffeuillade et al., 2020).

La información obtenida mediante índices espectrales permite conocer los cambios en el funcionamiento de los ambientes y cuando se les relaciona con los parámetros climáticos son indicadores importantes de la modificación de los sistemas hídricos (Barragán & Geraldí, 2018; Vidal Quini & Geraldí, 2021). Actualmente, existen diferentes métodos para el análisis de parámetros climáticos y su respectiva variabilidad como el Standardised Precipitation – Evapotranspiration Index (SPEI), el cual es un índice multiescalar para detectar, monitorear y analizar episodios climáticos. Permite identificar el inicio y final con sus respectivas intensidades y la característica multiescalar otorga la posibilidad de la identificación de diferentes tipos de sequía y su impacto (Vicente-Serrano et al., 2010; Beguería et al., 2014; Stagge et al., 2015). Este índice ha sido utilizado en diversos estudios de análisis de la variabilidad climática (Sohn et al., 2013; Hernandez & Uddameri, 2014; Spinoni et al., 2019). La importancia radica en que el complemento de información obtenida por sensores remotos e información de parámetros climáticos mediante índices y datos meteorológicos *in situ* permiten realizar estudios de manera integral. De esta manera es posible interpretar la significancia de variables meteorológicas sobre sistemas de cuerpos de agua someros.

El objetivo del presente trabajo es monitorear la evolución de cuerpos de agua someros en relación con la variabilidad climática durante un período de tiempo 35 años a partir de imágenes de satélite y datos meteorológicos. Se pretende estudiar y analizar su distribución en un conjunto de subcuencas pertenecientes a la cuenca Encadenadas del Oeste ubicada en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Además, se estudia su dinámica en función de los cambios en las temperaturas y precipitaciones.

2. Metodología

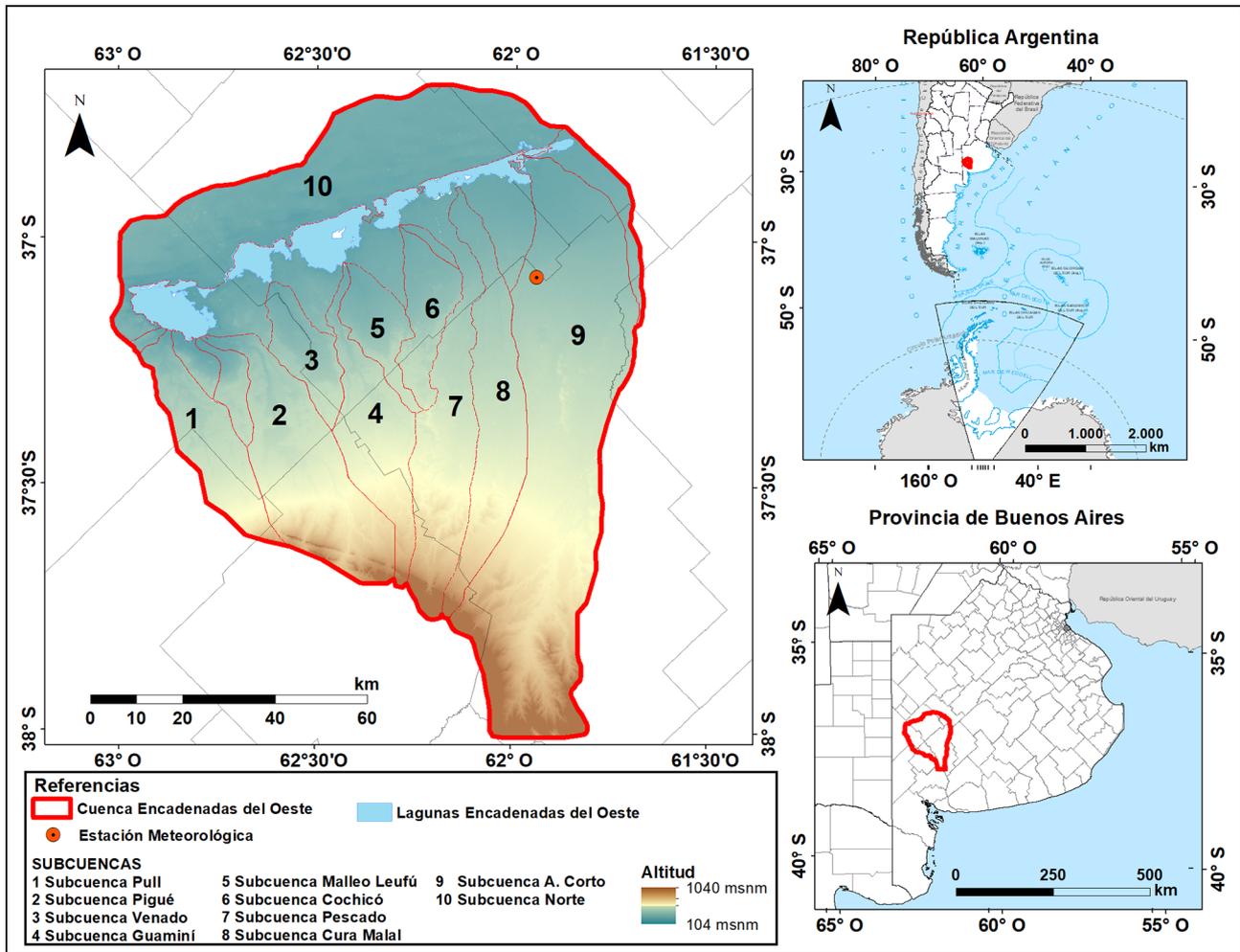
2.1. Área de estudio

La región pampeana donde se localiza el área de estudio es una de las planicies más grandes del mundo. Inmersa en ella la cuenca Encadenadas del Oeste (Figura 1) ubicada al sudoeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina, tiene una superficie de 1.116.480 hectáreas y la conforman distintas subcuencas de formas alargadas y oblongas. El sistema se caracteriza por contener grandes planicies con cuerpos de agua someros de profundidad media menores a 8 metros y sistemas de humedales aún no reconocidos y que económicamente cumplen un papel importante en las actividades agropecuarias y turísticas que constituyen la fuente de desarrollo de muchas localidades (Geraldí, 2009). Dicha cuenca está conformada por un conjunto de subcuencas oblongas y alargadas (Tabla 1) en las cuales discurren arroyos permanentes y estacionales que nacen en las Sierras de la Ventana (1.200 msnm) y desembocan en el sector más bajo (80 msnm) que corresponde a las lagunas.

Caracteriza al sistema un clima meso termal templado con una estación de invierno y otra de verano bien marcadas según la clasificación de Koppen y presenta características climáticas de transición. Las precipitaciones en la zona rondan los 800 mm de promedio anual, lo que varía significativamente en las diferentes décadas según registros históricos (Geraldí, 2009). A su vez, en las tendencias, existen variaciones estacionales anuales de temperaturas y precipitaciones las cuales se concentran en el semestre cálido duplicando al semestre invernal (Geraldí, 2009) La topografía y las pendientes de baja energía condicionan los movimientos de agua ralentizando el drenaje y provocando cambios profundos en los sistemas hídricos tanto en épocas de precipitaciones intensas como de sequía.

Para la realización de este estudio se optó por un método basado en análisis de frecuencias en relación a la variabilidad climática. Esto es debido a la gran variación del régimen de precipitaciones y temperaturas que define la presencia o desecación de los sistemas de cuerpos someros y en algunos casos es difícil identificarlos.

Figura 1. Área de estudio. Cuenca Encadenadas del Oeste y subcuencas



Fuente: Información geométrica del Instituto Geográfico Nacional y modelo digital de elevación Alos Palsar. Elaboración propia

Tabla 1. Superficies de las subcuencas en el área de estudio

Subcuencas	Arroyo Corto	Cochicó	Cura Malal	Pescado	Guaminí	Malleo Leufú	Norte	Pigüé	Pull	Venado
Superficie en hectáreas	289.362	33.397	82.963	79.191	60.512	27.000	201.176	99.856	75.106	29.303

Fuente: Geraldí, 2009. Elaboración propia

2.2. Recopilación de datos

La discriminación y monitoreo de cuerpos de agua, así como la elevada humedad en superficie se llevó adelante por medio del cálculo del índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) propuesto por Mcfeeters (1996). Para ello, se seleccionó el período de tiempo 1986-2021 y se trabajó con imágenes provenientes de las colecciones históricas de Landsat calibradas en reflectancia de superficie desde la plataforma Google Engine Code. Se aplicaron filtros de geometría correspondientes a las entidades geométricas de las subcuencas en formato shapefile, filtros de fechas estacionales de zonas templadas que refieren a las fechas del intervalo que ocupa el verano, otoño, invierno y la primavera y, máscaras de nubes. La Tabla 2 muestra la descripción de los sensores y procesamientos utilizados.

En primer lugar, a las colecciones de imágenes históricas Landsat se les aplicaron los filtros temporales estacionales de los cuáles se obtuvieron medianas para obtener una única imagen representativa de cada estación (verano, otoño, invierno y primavera) por año de la secuencia temporal 1986-2021. Luego, se realizaron recortes a escala subcuenca a partir de las entidades geométricas y como resultado se adquirieron en

total 310 productos representativos para el verano, 310 en otoño, 300 en invierno y 300 en primavera. En el proceso siguiente, se efectuó el cálculo del NDWI a cada producto y se extrajeron del índice aquellos valores mayores a 0 ($NDWI > 0$) que está fuertemente relacionado con el contenido de agua en superficie y/o alto contenido de humedad, por lo que son ideales para aproximaciones de la presencia y ausencia de cuerpos de agua.

Tabla 2. Descripción de datos y tratamiento de imágenes Landsat

Datos	Tiempo de adquisición	Path / Row	Nivel de procesamiento	Máscaras	Resolución espacial	Fuente	NDWI
Landsat 5 TM	1986-2013	226/085 – 226/086	Landsat 5, Collection 1, Tier 1	Bitmask for QA_PIXEL: Bit 2, Bit 3 y Bit 4	30 m x 30 m	Google Engine Code - USGS	$\frac{Banda\ 2 - Banda\ 4}{Banda\ 2 + Banda\ 4}$
Landsat 8 OLI	2014-2021	226/085 – 226/086	Landsat 8, Collection 2, Tier 2	Bitmask for QA_PIXEL: Bit 2, Bit 3 y Bit 4	30 m x 30 m	Google Engine Code - USGS	$\frac{Banda\ 3 - Banda\ 5}{Banda\ 3 + Banda\ 5}$

Elaboración propia

Con esta información se generó una matriz de datos estacionales anual en función del número de píxeles que cumplen la condición ($NDWI > 0$) para cada subcuenca. Se estimó la superficie en hectáreas (ha) y se calcularon los valores anómalos de la serie de tiempo mediante el cálculo del promedio de cantidad de hectáreas por estación provenientes del condicional. El cálculo de anomalías (ca) incluye aquellos periodos por estación que resultaron en valores por encima de la media del conjunto de datos (ca_H) y por debajo (ca_S). Estos se subdividieron en dos grupos, se extrajeron y se usaron como dos nuevos subconjuntos de datos para el cálculo de la frecuencia.

2.3. Frecuencia de la presencia de agua

Dada la importante variabilidad de escenarios hidrográficos en el área de estudio, una imagen o conjunto disperso no sería adecuado para representar cuerpos de agua poco profundos. Para ello, se estimó la frecuencia de píxeles ca a partir del conjunto de datos ca_H y ca_S según la propuesta de Borro et al. (2014) y su posterior representación en frecuencias. Se realizó el tratamiento de ráster mediante el software Qgis 3.18.2 y se obtuvo la frecuencia de inundaciones asociada a cuerpos de agua someros como lagunas someras, humedales, bañados y charcas.

$$FRECUCENCIA\ ca_{H\ o\ S} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} ca_{ij}}{N_s}$$

Donde $FRECUCENCIA\ ca_H$ o $FRECUCENCIA\ ca_S$ es el valor de frecuencia de presencia de agua superficial del píxel j para el conjunto s y representa la proporción de imágenes i con ca_H o ca_S igual a 1 en el píxel j (ca_{ij}) sobre el número total de imágenes en el conjunto analizado N_s . Por lo tanto, un píxel j que es igual a 1 en cada capa del conjunto de datos estacionales s tenía un valor de 1 en $FRECUCENCIA\ ca_H$ o $FRECUCENCIA\ ca_S$ (el píxel siempre estuvo con el valor del agua en superficie). En cambio, un píxel que fuera igual a 0 en todos los ca_{ij} del conjunto de datos s tiene un valor de 0 en los resultados de $FRECUCENCIA\ ca_H$ o $FRECUCENCIA\ ca_S$.

Cada frecuencia estacional de ca_H o ca_S se categorizó en una segmentación de clases que describe el grado de presencia de agua permanente en cada píxel: Permanentemente con agua ($1 > ca_{H\ o\ S} > 0,8$), generalmente con agua ($0,8 > ca_{H\ o\ S} > 0,6$), regularmente con agua ($0,6 > ca_{H\ o\ S} > 0,4$), ocasionalmente con agua ($0,4 > ca_{H\ o\ S} > 0$). Los píxeles clasificados como ocasionalmente con agua podrían estar inundados o ser áreas cubiertas con vegetación densa con mucha humedad en la cubierta (Borro et al., 2014).

2.4. Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI)

Para el análisis de los periodos se aplicó el índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI) que consiste en un índice de sequías multiescalar basado en datos climáticos mensuales (Vicente-Serrano et al., 2010). Este índice proviene de la combinación de dos índices: SPI, índice de sequía basada en precipitaciones (McKee et al., 1993) que determina a través del tiempo el déficit de lluvia para una región y en un período de tiempo dado y PDSI, índice de sequía en relación a temperaturas (Palmer, 1965) que se

basa en el concepto demanda y oferta de las condiciones de humedad del suelo donde se tiene en cuenta el déficit entre la precipitación real y la precipitación necesaria para mantener las condiciones de humedad climática o normal. El SPEI utiliza la diferencia mensual (o semanal) entre la precipitación y la potencial evapotranspiración. Esto representa un balance hídrico climático simple que se calcula en diferentes escalas de tiempo y se encuentra categorizado en distintas condiciones de sequía y humedad de acuerdo a los valores que se observan en la Tabla 3.

Tabla 3. Categoría del índice estandarizado de precipitación – evapotranspiración (SPEI)

Clases	SPEI
Extremadamente Húmedo	> 2
Muy Húmedo	1,5 a 1,99
Moderadamente Húmedo	1 a 1,49
Casi Normal	-0,99 a 0,99
Moderadamente Seco	-1,49 a -1
Muy Seco	-1,5 a -1,99
Extremadamente Seco	< -2

Fuente: Vicente-Serrano et al., 2010. SPEI Global Drought Monitor (<https://spei.csic.es/index.html>). Elaboración propia

Para este método se trabajó con un tiempo-escala de 3 meses para detectar cambios estacionales durante la serie temporal 1986-2021. Las escalas temporales de corto y mediano plazo como la de 3 meses refleja condiciones de humedad a corto y mediano plazo y proporciona información estacional. Comparar con secuencias de datos meteorológicos *in situ* es importante para evitar interpretaciones erróneas en el análisis de sequías (Svoboda et al., 2012). Esto permite relacionar los períodos húmedos y secos con las variaciones estacionales de los cuerpos de agua someros (Vicente-Serrano et al., 2010) en el área de estudio.

2.5. Datos meteorológicos *in situ*, SPEI y NDWI

Se utilizaron datos meteorológicos de precipitación y temperatura provenientes de una estación meteorológica ubicada en el noreste de la cuenca (Figura 1). Se calcularon las medias del ingreso estacional de precipitaciones y temperaturas con el fin de relacionarlas con las frecuencias de elevada humedad y/o presencia de agua establecidas por el NDWI estacional que de aquí se reconsideran como frecuencias de hectáreas con agua.

Para estimar la relación entre hectáreas con agua, temperatura y precipitaciones, en la serie de tiempo se realizaron regresiones lineales y se estableció un modelo lineal general de covarianza (ANCOVA) utilizando el paquete stats de la versión R 2021.09.1. Este análisis contempla la variación de los datos entre los diferentes años. El modelo considera las hectáreas con agua como variable respuesta (Y) y tres variables predictoras que incluyen temperatura (variable numérica continua), precipitación (variable numérica continua) y años (variable categórica). Se utilizó una configuración de rectas paralelas para los distintos años, obteniendo una pendiente general para las rectas de regresión en cada grupo.

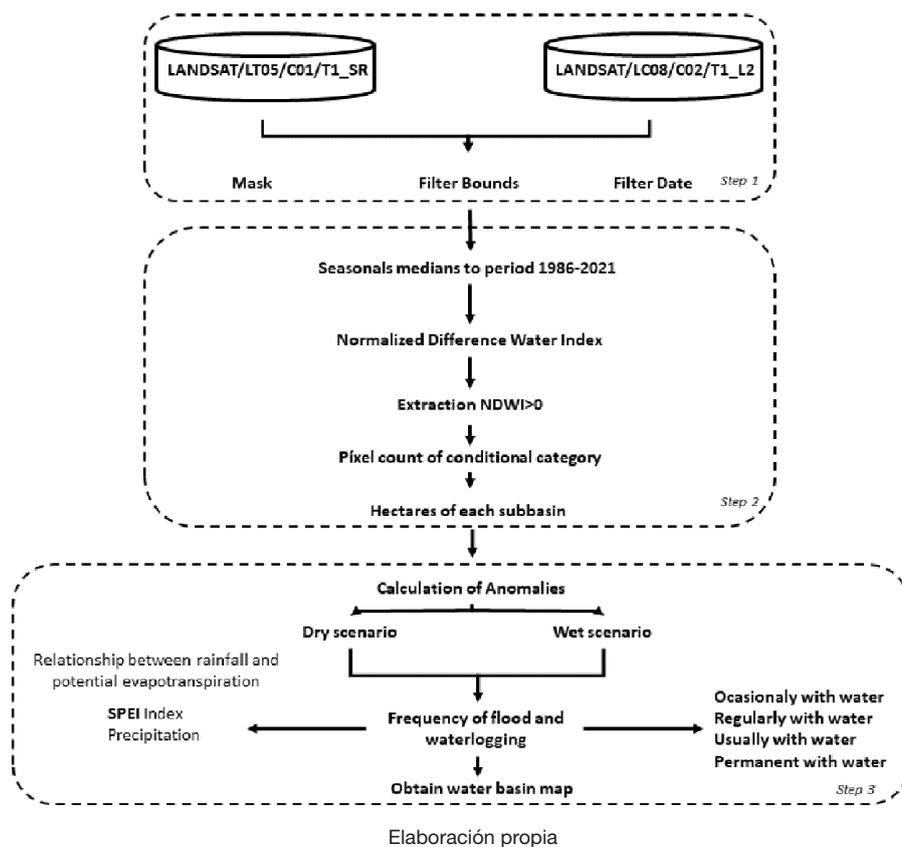
$$Y_{ij} = \alpha_i + \beta_1 T_{ij} + \beta_2 P_{ij} \quad i \in \{1, \dots, n \text{ años}\} \quad j \in \{1, \dots, n \text{ total}\}$$

Donde α corresponde a la ordenada al origen (una para cada año), β_1 a la pendiente para temperaturas, β_2 a la pendiente para precipitaciones, $i \in \{1, \dots, n \text{ años}\}$ es el número total de años y $j \in \{1, \dots, n \text{ total}\}$ es el número total de observaciones.

Luego, se ajustó el modelo y se evaluó la importancia relativa entre precipitaciones y temperatura a través de test-F. Los supuestos de normalidad y homocedasticidad fueron evaluados visualmente utilizando QQplot y un gráfico de residuales versus ajustados. Con base en ello se aplicó una transformación raíz cuadrada a la variable respuesta.

En la Figura 2 se describe el diagrama metodológico del tratamiento de datos:

Figura 2. Diagrama metodológico para el tratamiento de imágenes y su relación con SPEI y datos meteorológicos en el período de tiempo 1986-2021



3. Resultados

Los resultados obtenidos a partir de los índices de agua y el cálculo de frecuencias de los subconjuntos (ca_H) y (ca_S) evidencian distintos escenarios hidrográficos húmedos y secos con importantes contrastes.

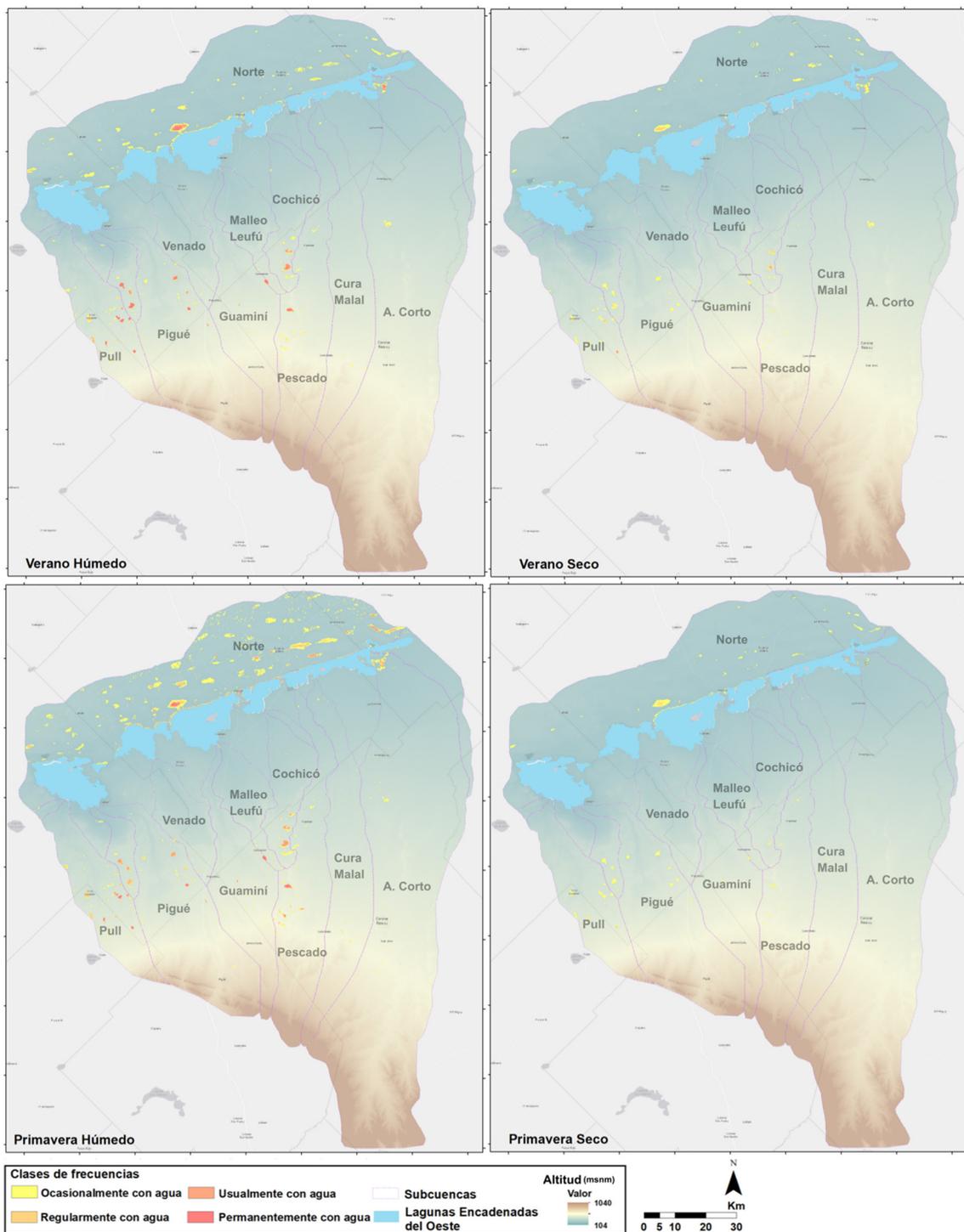
Durante los escenarios húmedos, la primavera y el verano (septiembre a marzo), presentan cuerpos de agua someros con alta frecuencia como agua permanente o regular y que ocurre en áreas intermedanasas en la subcuenca norte y, en las subcuencas fluviales de Pull, Pigüé, Cochicó y Cura Malal (Figuras 3 y 4). Sin embargo, en los escenarios secos estas estaciones revelan poca cantidad de cuerpos de agua con condiciones de frecuencias bajas dado su desecación siendo el verano un período crítico.

En las estaciones frías (marzo a septiembre) la cantidad de frecuencias medias y altas aumentan siendo el invierno donde se observa la mayor cantidad de cuerpos de agua. En las subcuencas A. Corto, Pescado y Cura Malal se registran frecuencias bajas y medias. A su vez, en la subcuenca Norte aparecen importantes aumentos de áreas con baja frecuencia asociadas a la alta infiltración en zonas intermedanasas. En las subcuencas Pigüé, Pull y Cochicó se distinguen altas frecuencias y mayores superficies de agua.

En la Figura 5 se sintetiza la evolución y cantidad de hectáreas con agua totales durante la serie de tiempo para cada subcuenca. En el verano la tendencia indica que las superficies con agua no superan las 5.000 hectáreas a excepción de los años 1986, 1987, 1988, 2017 y 2018. En cuanto a los períodos con valores mínimos resultan entre los años 1994-1995 y 2009-2013. En el otoño se registra una tendencia similar al verano con abundancia de superficies menores a 5.000 hectáreas, pero con aumentos más significantes entre los años 1986-1988. Los mínimos se encuentran entre 1992-1993, 2002-2003 y 2008-2012.

Durante el invierno se presenta un importante aumento durante toda la secuencia temporal. A excepción de la década del 2000, los valores oscilan entre las 5.000 y 10.000 ha únicamente superadas en el año 1993 y 2017. Los mínimos se establecen en los años 1990 y el período 2008-2012. En la primavera las hectáreas decrecen con respecto al invierno y oscilan por debajo de las 5.000 ha. En los años 1986, 1987, 1993, 1998, 2016, 2017 y 2018 se advierten importantes incrementos. Los mínimos se registran en los años 1989, 1994, 1995 y el período 2007-2012.

Figura 3. Escenarios hidrográficos según estaciones cálidas del año

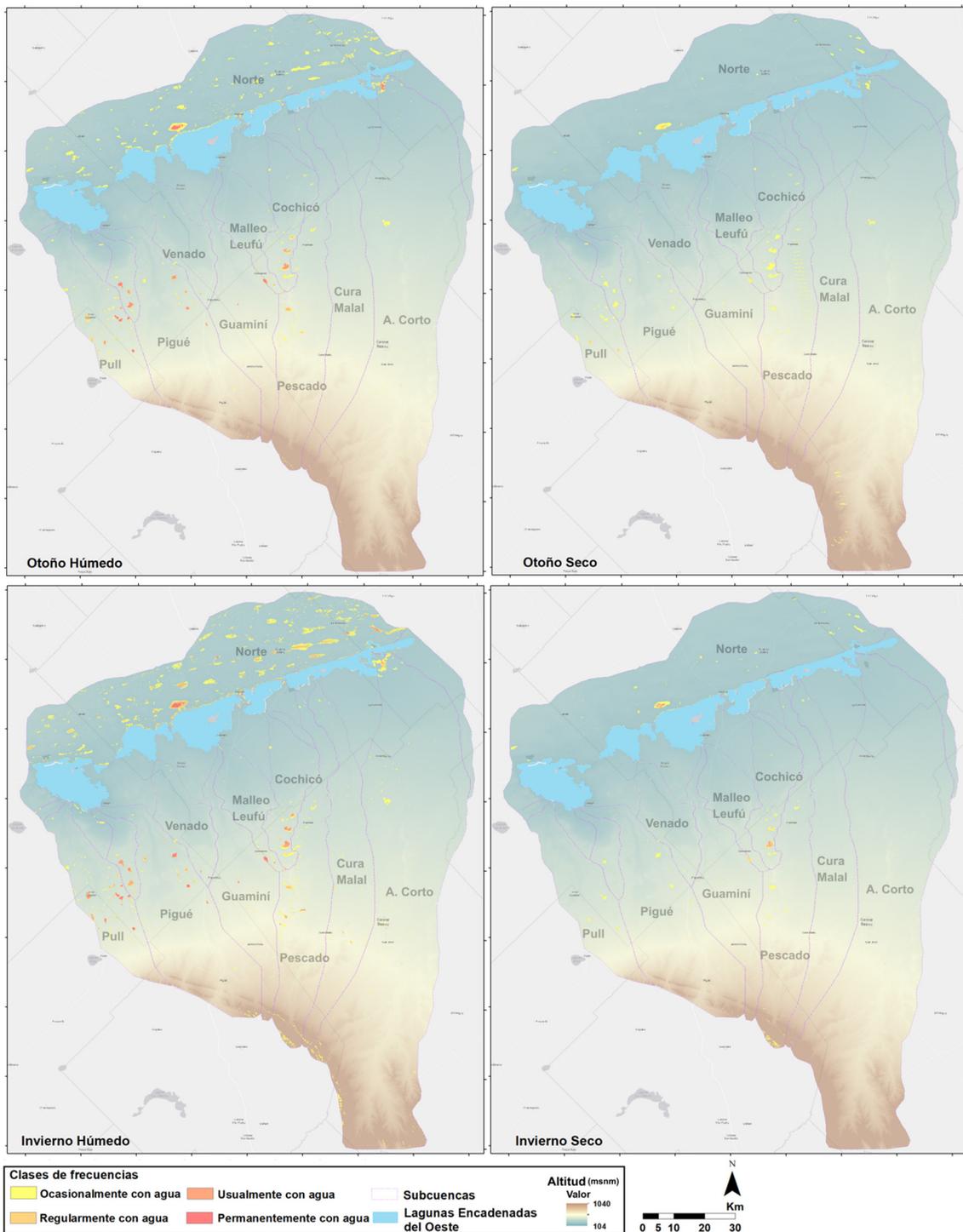


Elaboración propia

Es importante destacar que en la serie temporal se advierte que los predomios de la cantidad de hectáreas corresponden a las subcuencas Norte y Pull. Sin embargo, durante la última década se registran nuevos aumentos de superficie en las subcuencas orientales.

Un análisis más detallado en relación a la variabilidad para períodos húmedos y secos en los cuerpos de agua se presenta en la Tabla 4 que contiene la distribución de la sumatoria de frecuencias acumuladas para cada categoría en período húmedo y seco. Estos resultados muestran los patrones estacionales y la variabilidad en espacio-tiempo de sus comportamientos en donde la mayor cantidad de hectáreas totales refleja que mayor es la permanencia de agua en un lugar.

Figura 4. Escenarios hidrográficos según estaciones frías del año



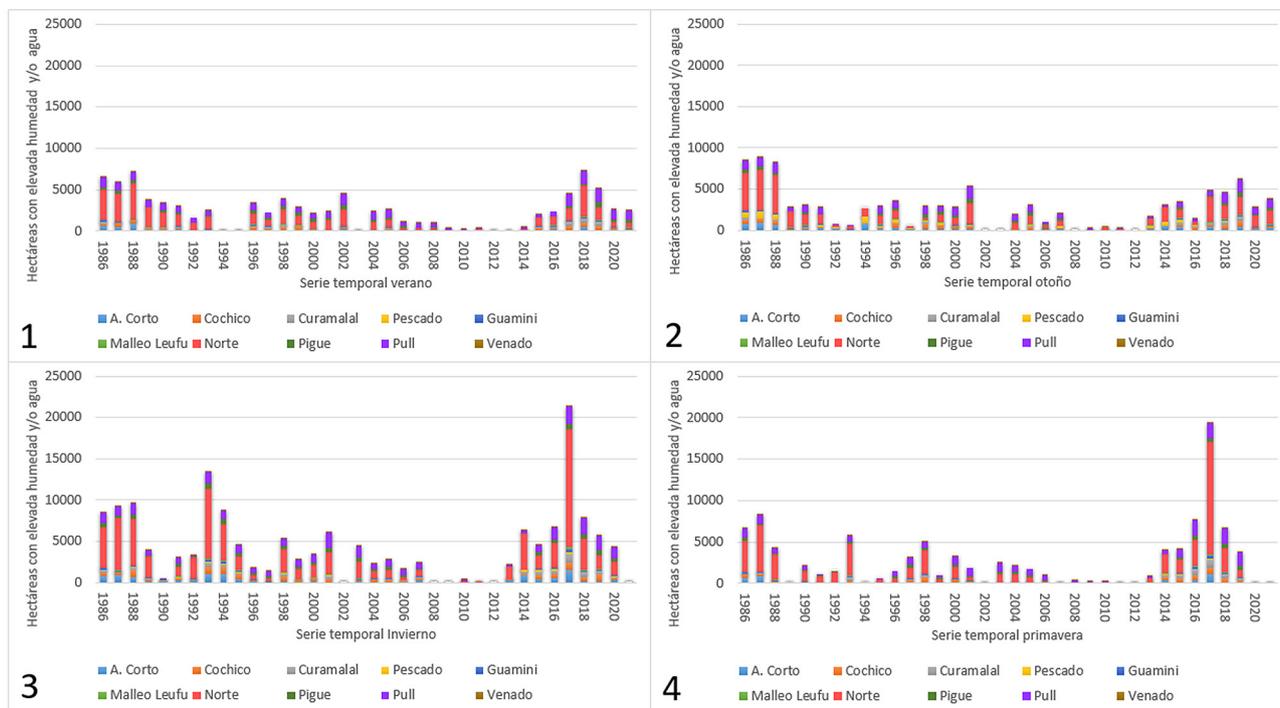
Elaboración propia

En la categoría “ocasionalmente con agua” el invierno húmedo posee el máximo de hectáreas con agua en conjunto con la primavera húmeda pero las cantidades superiores a 20.000 hectáreas refieren a importantes crecimientos ocurridos en el año 2017 como se observa en la Figura 5. En escenarios secos, los máximos se expresan en otoño e invierno con marcada diferencia entre las estaciones cálidas.

La categoría “regularmente con agua” presenta máximos en invierno y primavera durante escenarios húmedos y, en escenarios secos, el invierno se destaca con marcada diferencia respecto al resto de las estaciones siendo la primavera la época más crítica. Para la categoría “usualmente con agua” la tendencia se vuelve a repetir en escenarios húmedos respecto a la categoría anterior y el mínimo se presenta en otoño.

Sin embargo, durante escenarios secos los valores descienden y, solamente el verano y el invierno superan valores a 80 ha. En cuanto a las categorías con frecuencias altas, en escenarios húmedos el máximo ocurre en verano e invierno y en escenarios secos se registran valores críticos donde la primavera es la más afectada.

Figura 5. Variación estacional de hectáreas inundadas durante la serie temporal 1986-2021



1) verano. 2) otoño. 3) invierno. 4) primavera.

Elaboración propia

Es importante considerar que en la sumatoria de categorías si se eliminan los efectos asociados a la categoría “ocasionalmente con agua” los resultados indican que los máximos de los escenarios húmedos ocurren en invierno y primavera y, el mínimo en otoño. En escenarios secos los máximos corresponden a invierno duplicando al verano quien es el contiguo y en la primavera se registra el mínimo.

Tabla 4. Cantidades de hectáreas de frecuencias acumuladas por categoría para cada estación húmeda y seca

Frecuencias Estacionales	Verano Húmedo	Verano Seco	Otoño Húmedo	Otoño Seco	Invierno Húmedo	Invierno Seco	Primavera Húmedo	Primavera Seco
Ocasionalmente con agua	9.645,2	5.482	13.016,5	10.596,7	23.874,3	7.906,9	20.327,4	5.769,5
Regularmente con agua	1.332,6	479,7	1.332,6	306,7	3.576,4	896,9	2.892,9	261,2
Usualmente con agua	1.357,8	82	1.549,4	3,6	2.390	119,4	2.063,3	27,4
Permanentemente con agua	1.623,2	8,2	1.041,7	0,4	1.360,8	5,1	702,7	0
Total de agua en las subcuencas	13.958,9	6.052,1	16.940,3	10.907,6	31.201,6	8.928,4	25.986,5	6.058,2
Total de agua en las subcuencas sin la categoría “Ocasionalmente con agua”	4.313,7	570	3923,8	310,8	7.327,3	1.021,5	5.659	288,7

Elaboración propia

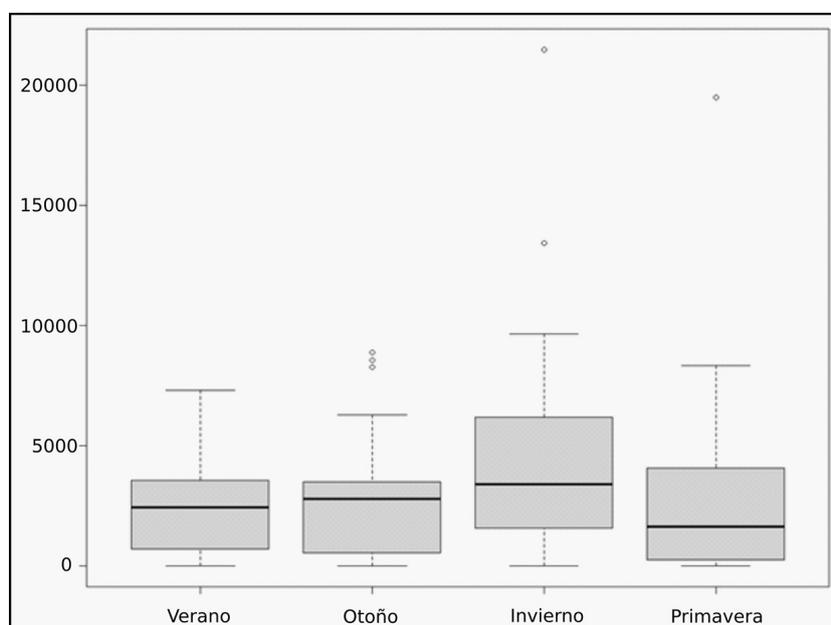
Respecto a las variaciones en hectáreas presentadas, la Tabla 5 manifiesta parámetros estadísticos y el contexto estacional de temperaturas y precipitaciones. El ingreso de precipitaciones medias aumenta en primavera y en verano se evidencia la máxima al igual que las temperaturas durante el intervalo de tiempo 1998-2020. Sin embargo, los máximos de valores medios de hectáreas ocurren en invierno casi duplicando a los valores de las otras estaciones que oscilan muy similares. En el diagrama de la Figura 6 se indican dichas tendencias para cada estación y evidencia que las máximas variaciones de rango acontecen en invierno y primavera, pero esta última estación con una mediana mínima respecto a otras.

Tabla 5. Medias de temperatura, precipitación obtenidas de estación meteorológica *in situ* y cantidad de hectáreas con agua según estación del año

Variables	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
Media temperatura	21,8 °C	12,33 °C	8,97 °C	17,32 °C
Media precipitaciones	321,05 mm	177,72 mm	125,72 mm	264,11 mm
Media de hectáreas con agua	2.553,8 ha	2.774 ha	4.430 ha	2.814,9 ha
Media de hectáreas con agua (1998-2020)	2.176,4 ha	2.280,1 ha	3.794,6 ha	2.754,4 ha
1 Cuartil	836,5 ha	558 ha	1.612 ha	256,8 ha
Mediana	2.434,6	2.775 ha	3.401 ha	1.627,2 ha
3 Cuartil	3.475 ha	3.438 ha	6.130 ha	4.034,5 ha
Máximos	7.311,4 ha	8.892 ha	21.483 ha	19.485,5 ha
Mínimos	0 ha	0 ha	0 ha	0 ha

Elaboración propia

Figura 6. Diagrama de cajas estacional de cantidad de hectáreas con agua durante el período 1986-2020



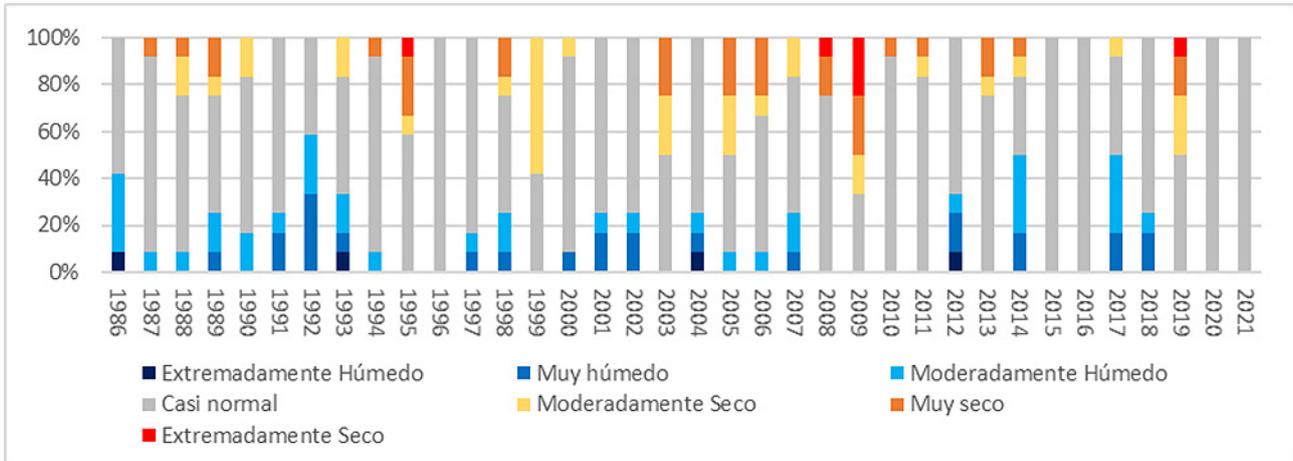
Elaboración propia

Además de la estacionalidad, los cambios en la presencia y/o desecación de los cuerpos de agua se atribuyen al impacto de intensidad y prolongación de diferentes situaciones de la variabilidad climática. Esto constituye un factor interesante de análisis en función de las situaciones hidrográficas. En el SPEI de escala 3 meses (Figura 7), los años 1999, 2003, 2005, 2009 y 2019 presentan un 50 % o más de condiciones secas siendo el año 2009 el que posee mayores intensidades. A su vez, los años 1988, 2006, 2008, 2010, 2011, 2013 son superiores con respecto al porcentaje de situaciones húmedas, pero son años donde predominan condiciones normales. Por otro lado, los años 1992, 2014 y 2017 poseen 50 % o más de condiciones húmedas y los años 1991, 1993, 1997, 2001, 2002, 2004, 2007, 2012 y 2018 son superiores con respecto al porcentaje de situaciones secas, pero con cantidades menores al 50 % de dichas situaciones.

En la misma línea que el análisis del índice, la Figura 8 y 9 indican las situaciones estacionales de hectáreas con agua con respecto a las condiciones de precipitaciones y temperaturas obtenidas de la estación meteorológica. En las estaciones cálidas existe una mayor cantidad de déficit de hectáreas con agua con mayor prolongación de esta tendencia con respecto a estaciones frías. Durante los veranos se indican 5 períodos con temperaturas por sobre precipitaciones con tiempo de extensión máximos a 3 años y 4 períodos durante las primaveras, pero con mayor prolongación en el tiempo. Dichos períodos resultan críticos dado

que cuando ocurre estas condiciones climáticas las hectáreas con agua indican déficit y aun cuando las anomalías de temperatura superan 0,5° C afectan considerablemente la situación hidrográfica.

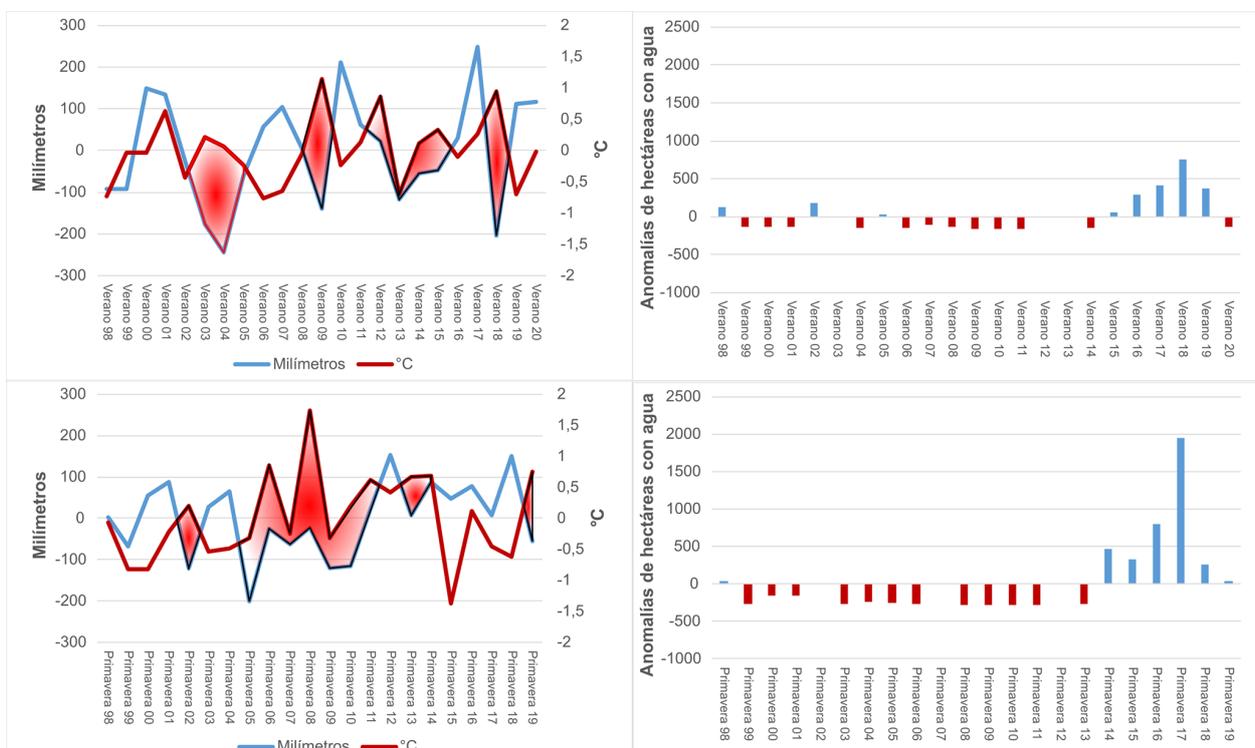
Figura 7. Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración. Categorización de intensidad de períodos húmedos y secos durante la serie temporal 1986-2021



Elaboración propia

Sin embargo, en la última década la situación es diferente y el descenso de las anomalías de temperatura con el aumento de anomalías de precipitaciones por sobre la media refleja valores de incremento en las hectáreas con agua siendo el año 2017 donde se encuentra el máximo de la serie.

Figura 8. Anomalías de precipitación, temperatura y hectáreas con agua en estaciones cálidas durante el período 1998-2021



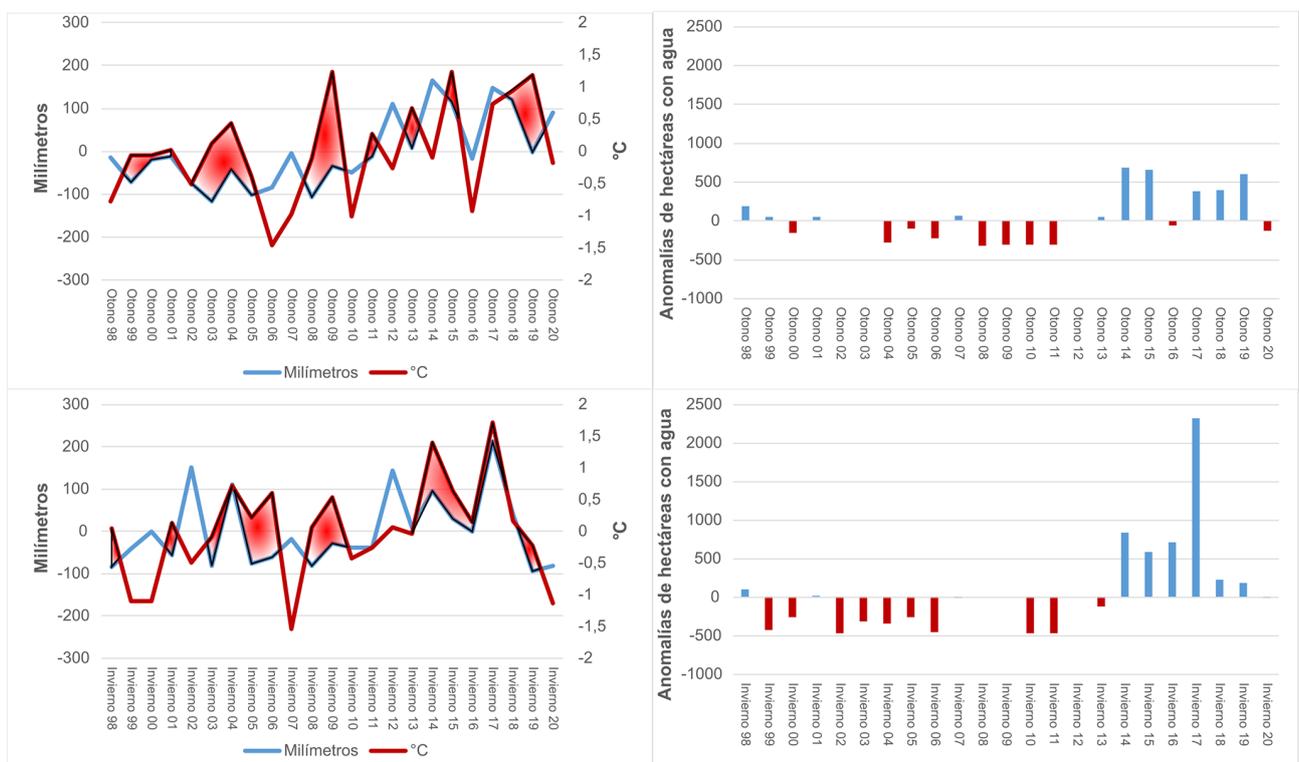
Elaboración propia

En las estaciones frías (Figura 9) se observan siete períodos con anomalías de temperaturas por sobre precipitaciones durante los otoños y seis en los inviernos. En la década 2000-2010 se advierten una importante prolongación de déficit de hectáreas con agua la cual se revierte en los inicios de la última década. Esto se relaciona con el incremento de anomalías de precipitaciones por encima de la media al igual

que en estaciones cálidas. Es importante destacar que a partir del año 2006 las tendencias de anomalías de temperatura y precipitaciones se incrementan.

En el análisis estadístico entre datos de temperatura, precipitación y hectáreas con agua durante la serie temporal, los años son estadísticamente significativos en el modelo ($F(22,64) = 9,65, p < 0,001$). El análisis ANCOVA considera el efecto de la variación entre años que queda contemplado en las distintas ordenadas al origen (Figura 10). Se observan distintos efectos sobre la cantidad de hectáreas por parte de las temperaturas ($F(1,64) = 11,11, p < 0,01$) y las precipitaciones ($F(1,64) = 5,74, p < 0,05$). El modelo presentó un $R^2 = 0,78$ y p valor significativo (Tabla 5). En función de estos resultados, el modelo quedó sujeto a las variables temperatura y precipitaciones para observar cuán importante es una respecto de la otra. Las precipitaciones presentan un coeficiente bajo y su test t posee un p valor de 0,5 que infiere que dicho coeficiente no difiere significativamente de 0. Sin embargo, las temperaturas presentan una mayor explicación en el modelo con $p = 0,001$. Esto expresa que las temperaturas tienen un efecto más importante que las precipitaciones. Si bien esta variable tiene un efecto no resulta tan estadísticamente significativo como la temperatura.

Figura 9. Anomalías de precipitación, temperatura y hectáreas con agua en estaciones frías durante el período 1998-2021



Elaboración propia

Tabla 6. Resultados de modelo de regresión ANCOVA entre temperaturas, precipitaciones y años en el período 1998-2020

Variable	Estimación	Std. Error	T valor	Pr(> t)
Precipitaciones	0,005467	0,008171	0,669	0,505852
Temperatura	-0,595072	0,178467	-3,334	0,001425

Error estándar residual: 5,884 en 64 grados de libertad (2 observaciones eliminadas debido a faltantes).

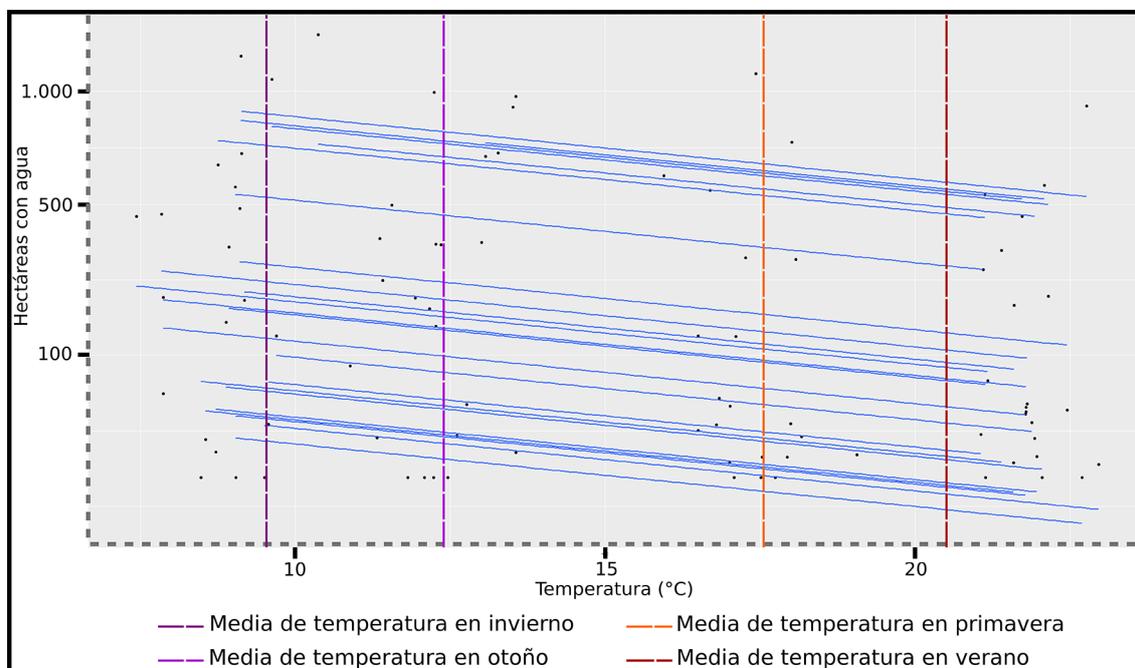
Múltiples R-cuadrado: 0,7817	R-cuadrado ajustado: 0,6998	Estadística-F: 9,549 en 24 y 64 DF	p-valor: 2,985e-13
---------------------------------	--------------------------------	---------------------------------------	--------------------

Elaboración propia

A partir de los estudios realizados, la Figura 10 proporciona una visión general de la relación entre hectáreas con agua totales de la cuenca y temperaturas donde se evidencian las medias estacionales. Cada recta corresponde a un año que poseen distinta ordenada al origen y la misma la pendiente igual a $-0,595$ (Tabla 6). Temperaturas medias menores a $10^{\circ} C$ indican los máximos de hectáreas con agua y, temperaturas mayores

a 20° C indican máximos valores con tendencias menores a 100 ha. Las medias estacionales de temperatura denotan una tendencia de descenso de acuerdo a las rectas. Las mismas sugieren que en temperaturas estacionales cercanas a la primavera y verano acontecen una mayor concentración de valores debajo de 100 ha. Los rangos de temperatura entre las medias de otoño e invierno indican mayor concentración de valores entre 500 ha y 100 ha.

Figura 10. Cantidad de hectáreas inundadas en la cuenca respecto a la variación de temperatura y ordenadas al origen durante la serie de tiempo 1986-2020



Elaboración propia

4. Discusión de resultados

Los índices espectrales de agua (NDWI) utilizados para el análisis de frecuencias permite obtener diferentes escenarios hidrográficos de la cuenca que evidencian un contraste respecto a períodos húmedos y secos (Figuras 3 y 4). El análisis reconstruye los patrones temporales de la dinámica hídrica (Gayol et al., 2019) en relación a la identificación, distribución y variación superficial con lo que es posible obtener una mayor precisión de aquellos cuerpos de agua someros reduciendo las incertidumbres de límites borrosos con respecto a otros ecosistemas (Borro et al., 2014). Se observa diversidad y abundancia de cuerpos someros que hasta el momento no han sido identificados con carácter temporal y fuerte dependencia ante el efecto climático y sus variaciones. En comparación con la información obtenida de la cartografía nacional (Instituto Geográfico Nacional) y los lineamientos del inventario de humedales de la provincia de Buenos Aires (Inventario de humedales de la provincia de Buenos Aires, 2019) se vislumbran lagunas someras y potenciales humedales en los sistemas de paisajes de la cuenca Encadenadas del Oeste que hasta el momento no habían sido identificados.

La distribución de estos cuerpos someros posee máximas concentraciones en el área transicional de la cuenca correspondiente al dominio ambiental de llanura. Esta zona se caracteriza por un decrecimiento de la energía del agua debido a su dispersión como es característico en este tipo de cuencas (Wetzel, 2001; Geraldí, 2009). El desagüe completo puede quedar impedido por la falta de pendiente dada la horizontalidad del terreno lo cual propicia condiciones para la existencia estos ecosistemas. En este sentido, la subcuenca Cochicó posee la mayor concentración de lagunas someras respecto a otras subcuencas y podría explicarse a la baja densidad de drenaje y a la morfometría oblonga que ocurre en este sector en donde el tiempo de concentración de agua es más largo que las subcuencas alargadas (Geraldí et al., 2016). Ante el impacto de un período seco intenso y prolongado estas lagunas se desecan, pero poseen frecuencias por encima del 40 % lo cual indicaría una importante resistencia. Es importante destacar que esta subcuenca se encuentra en un estadio erosional joven con potencial morfodinámico importante para generar procesos erosivos (Geraldí, 2009).

Las subcuencas del este, especialmente subcuenca Arroyo Corto, presenta mayor cantidad de cuerpos de agua pequeños con frecuencias muy bajas y que se activan en períodos húmedos infiriendo su fuerte dependencia al ingreso de precipitaciones y baja evapotranspiración. Su corta temporalidad y tamaño podrían ser factores cruciales para definirlos como sistemas de charcas y en algunos casos áreas de acumulación de bañados. Biggs et al., (2017) explica que las charcas incluyen una amplia variedad de cuerpos de agua temporales que solo pueden retener agua durante unos pocos días después de la lluvia, hasta cuerpos de agua más permanentes que pueden secarse solo durante unas pocas semanas en la mayoría de los años y, en algunos años, permanecer permanentemente húmedos. Este sector posee un estado de madurez más avanzado con pendientes medias menores respecto a otras y en los últimos períodos (2014-2021) presentó mayor cantidad de presencia de pequeños cuerpos de agua que antes no habían sido registradas a lo largo de la serie temporal (Vidal Quini & Geraldi, 2021). Específicamente, en el año 2017 aparecieron nuevos cuerpos de agua que no habían sido registrados anteriormente y sería posible plantear la hipótesis de que sus formaciones podrían deberse a la intensa actividad agrícola que se constituye un factor principal de la transformación del paisaje hidrográfico en la región (Wetzel, 2001; McDonald et al., 2012; Matthew et al., 2016).

En la misma línea, la subcuenca Norte es la que se destaca, particularmente en el año 2017 con un considerable aumento. Esta subcuenca es un área de transición entre la pampa arenosa y la depresión de la cuenca Las Encadenadas del Oeste propiamente dicha. Se caracteriza por la presencia de médanos y la presencia de mayor proporción de píxeles con agua podría deberse a la presencia de mantos de arena, depresiones intermedanasas y cubetas de deflación. Estos rasgos geomorfológicos favorecen la presencia de agua durante períodos de precipitación abundante. En una región contigua al área de estudio Contreras et al. (2021) indican que esta geomorfología aumenta el riesgo de inundaciones dado al desarrollo de dunas longitudinales alineadas que permite encauzar los desbordamientos de cuerpos de agua someros en eventos de inundación al tiempo que contribuye a la permanencia del agua durante las sequías. Sin embargo, las dunas parabólicas responden de manera inversa, en eventos de sequía extrema las áreas interdunares son áridas lo cual podría explicar la presencia de frecuencias bajas en escenarios secos en este estudio.

La variabilidad climática posee una importante influencia en los cuerpos de agua someros y sus niveles de agua. Los resultados del SPEI en la serie de tiempo demostraron una predominancia de condiciones secas sobre condiciones húmedas con diferencias importantes en cuanto a la prolongación e intensidad. En el registro histórico de datos meteorológicos de la región observado en Geraldi (2009) indica que durante fines de la década del 60 hasta el 2006 se instala un período húmedo que provocó una acelerada pérdida de suelos por erosión hídrica en la región. Sin embargo, esta tendencia se revierte a fines de la década 2000 en donde se observan importantes anomalías negativas de hectáreas con agua y que induce a encontrar en estos años mayor frecuencia de escenarios secos (Figuras 3 y 4). Bohn et al., (2016) y Tengroth y Geraldi (2022), también observaron en la región importantes variaciones en la disminución del tamaño de cuerpos de agua durante este lapso.

Los datos meteorológicos describen con mayor detalle las variaciones climáticas y sugiere que para estaciones frías, especialmente en el invierno, existe mayor permanencia de agua en un lugar. Esta situación podría relacionarse dado las temperaturas bajas que atenúan los procesos de evaporación y evapotranspiración y la baja frecuencia y prolongación de temperaturas sobre precipitaciones que ocurre en este período. En este aspecto, el análisis ANCOVA demostró una alta significancia de las temperaturas con respecto al tamaño de los cuerpos de agua someros. Es decir, dado el contexto climático templado transicional, el tamaño de estos cuerpos de agua evidencia un efecto de magnitud más fuerte de las temperaturas con respecto a precipitaciones que influyen en la presencia o ausencia de estos sistemas someros. A su vez, sería crítico entender que si ocurren precipitaciones extraordinarias en invierno condicionaría la cantidad de hectáreas en niveles muy superiores como el caso de 2017 en relación a inundaciones y anegamientos. Esto sugiere que inviernos lluviosos donde las temperaturas son muy reducidas permiten mantener las aguas superficiales y que, también podrían tener injerencia el aporte subterráneo que viene descendiendo de la cuenca alta de los arroyos para dichos aumentos.

En escenarios húmedos para estaciones cálidas, también se evidencia mayor cantidad de hectáreas con alta frecuencia lo que sugiere que mayor es la permanencia de agua en un lugar influenciado por el mayor ingreso de precipitaciones durante la primavera y el verano. Sin embargo, a pesar de incrementar las precipitaciones se evidencian la mayor prolongación de anomalías de temperaturas por sobre precipitaciones. Los efectos de alta evaporación y evapotranspiración podrían condicionar la situación de dichos cuerpos de agua. En el inicio del período frío se encuentran valores mínimos similares a los veranos y parecería posible que las hectáreas con agua en la estación de otoño se ven influidas por las condiciones de la estación antecesora.

Estas situaciones hidrográficas podrían ser indicios del tiempo de recomposición de los sistemas de cuerpos de agua someros y expone al otoño y la primavera como las estaciones más críticas para la permanencia de agua.

En otros estudios globales y de caso como Downing et al. (2006), Marín Comitre et al. (2020) obtuvieron una alta correlación ($R^2 = 0,8$) entre la proporción de la superficie de cuerpos de agua poco profundos que se inundan periódicamente y se secan durante períodos del año y la precipitación media anual. No obstante, en el área de estudio las temperaturas parecen tener mayor significancia que las precipitaciones. Tengroth y Gernaldi (2022) discuten que las dinámicas de tamaño para el conjunto de lagunas Encadenadas del Oeste dependen de la temperatura debido a que posee mayor significancia que la precipitación que podría deberse al tiempo que tarda el lago poco profundo en responder a las variaciones de esta última variable. Estos resultados concuerdan con lo expresado en el trabajo y demostrarían que en la cuenca el efecto de las temperaturas es mayormente significativo para todo el sistema hídrico con lo cual podría ser el principal factor de control del régimen hidrográfico.

De acuerdo con el diagrama de dispersión entre temperaturas y hectáreas con agua evidencia que los aumentos de temperatura superiores a la media (15°C) disminuye de manera considerable la cantidad de estos sistemas de cuerpos de agua someros. En estos rangos se ubican las medianas estacionales de primavera y verano e indican valores totales con tendencias menores a 100 hectáreas. Esto comprometería a los cuerpos de agua de menor tamaño y que se encontrarían mayormente vulnerables dado los efectos de evaporación de corto plazo y consecuente desecación (Echegoyen et al., 2022). En cuerpos de agua muy pequeños con baja capacidad calorífica, la temperatura del agua superficial responde rápidamente al intercambio de calor por radiación y evaporación y a la irradiación solar (Adrian et al., 2006, 2009). Cuando ocurre lo contrario como en temperaturas cercanas a las medias de otoño e invierno los valores totales oscilan entre 500 ha y 100 ha.

En el análisis de este trabajo y en relación al estudio realizado por Tengroth y Gernaldi (2022) los períodos secos e intensos compromete los tamaños de las lagunas y los cuerpos someros y exponen al conjunto de lagunas encadenadas del oeste como un eje principal en el sistema socio-económico (Gernaldi et al., 2011). Es importante considerar que dichas lagunas se encuentran en estados eutróficos e hipertróficos con lo cual remite a la degradación que están padeciendo estos sistemas de cuerpos someros por efectos climáticos y acciones antropogénicas que comprometen al recurso y a sus servicios ecosistémicos.

5. Conclusiones

La información obtenida en este trabajo resulta relevante para el estudio del paisaje, el marco hidrográfico y el territorio debido a que los cuerpos de agua someros son parte fundamental de la dinámica socio-económica de la región. La comprensión de los sistemas ambientales ante agentes de peligro como la variabilidad climática y la acción antropogénica evidencia diferentes vulnerabilidades en sectores de la cuenca y aporta para prácticas de gestión vinculados al riesgo ambiental.

Los resultados de este estudio evidencian la configuración espacial de la hidrografía de la cuenca a lo largo del tiempo la cual es un indicador del sentido de cambio en el paisaje y del contexto estructural del territorio. Las apariciones de nuevos cuerpos de agua revelan dicho sentido de cambio y que podrían deberse a cambios en la hidrografía de la cuenca vinculados con la actividad agrícola y obras hidráulicas.

Las notorias diferencias de las extensiones de los cuerpos de agua han permitido confirmar la influencia de la variabilidad climática y del rol fundamental que poseen las temperaturas como principal factor de control que permite suponer a la evaporación potencial como factor determinante para la desecación de los cuerpos de agua someros del área de estudio dado por otros factores de control como el escaso escurrimiento por bajas pendientes.

Dicha información genera contribuciones para el análisis de cambios en la susceptibilidad que puedan integrarse con otros atributos territoriales. A medida que se profundice en la caracterización de los componentes del paisaje incorporando otros niveles y escalas y, se analice la información de diversos atributos, se estará en condiciones de realizar una integración y visualización de una matriz del paisaje territorial.

La propuesta metodológica es una alternativa práctica al monitoreo de los sistemas fluviales y aporta por primera vez una caracterización ambiental más detallada acerca de cuerpos de agua someros temporarios y potenciales humedales que se constituyen como una de las principales variables ambientales afectadas

por las influencias de los sistemas sociales. En este sentido, la identificación y estimación de abundancia y frecuencias asocia cambios en las aguas superficiales en un contexto de usos de suelos agrícolas que los mantienen en constante presión y que ya han sido intervenidos a través de obras de canalización y modificación de drenajes acentuando su degradación y conflictos socio ambientales.

Financiación

El trabajo pertenece al Proyecto de Investigación PGI: “Aplicación de Tecnologías de la información Geográfica al estudio integral y comparativo de problemáticas ambientales. Segunda Parte”.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los revisores anónimos por sus comentarios y sugerencias que ayudaron a mejorar el trabajo. También agradecen a los miembros del Laboratorio de Geotecnologías del Departamento de Geografía y Turismo de la Universidad Nacional del Sur, así como al personal de apoyo del Instituto Argentino de Oceanografía Dr. Martín Amodeo por su colaboración en el procesamiento estadístico de los datos.

Referencias

- Adrian, R., Wilhelm, S., & Gerten, D. (2006). Life-history traits of lake plankton species may govern their phenological response to climate warming. *Global Change Biology*, 12(4), 652–661. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01125.x>
- Adrian, R., O'Reilly, C.M., Zagarese, H., Baines, S.B., Hessen, D.O., Keller, W. Livingstone, D. M., Sommaruga, R., Straile, Van Donk, E., Weyhenmeyer, G. A., & Winder, M. (2009). Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography*, 54(6 PART 2), 2283–2297. <https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6.part.2.2283>
- Barragán, F. G., & Gernaldi, A. M. (2018). Aplicación de teledetección para la determinación de zonas inundadas en la llanura Pampeana de Argentina. *X Congreso Internacional Geomática 2018*. <http://www.informaticahabana.cu/sites/default/files/ponencias2018/GEO143.pdf>
- Beguiría S., Vicente-Serrano S.M., Reig F., & Latorre B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *Int. J. Clima-tol.*, 34(10), 3001-3023. <https://doi.org/10.1002/joc.3887>
- Biggs, J., von Fumetti, S., & Kelly-Quinn, M. (2017). The importance of small waterbodies for biodiversity and eco-system services: Implications for policy makers. *Hydrobiologia*, 793, 3–39. <https://doi.org/10.1007/s10750-016-3007-0>
- Bohn, V.Y, Delgado, A.L., Piccolo, M.C., & Perillo, G.M.E. (2016). Assessment of climate variability and land use effect on shallow lakes in temperate plains of Argentina. *Environ. Earth Sci.*, 75(9), p. 818. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5569-6>
- Borro, M., Morandeira, N., Salvia, M., Minotti, P., Perna, P., & Kandus, P. (2014). Mapping shallow lakes in a large South American floodplain: A frequency approach on multitemporal Landsat TM/ETM data. *Journal of Hydrology*, 512, 39-52. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.057>
- Contreras F.I., Mavo-Mastretta G.M., Piccolo M.C., & Perillo G.M. (2021). Spatio-temporal variability monitoring of the floods in the center-west of the Buenos Aires province (Argentina) using remote sensing techniques. The role of sand dunes. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 47, 337-354. <https://doi.org/10.18172/cig.4477>
- Downing, J.A., Prairie, Y.T., Cole, J.J., Duarte, C.M., Tranvik, L.J., Striegl, R.G., McDowell, W.H., Kortelainen, P., Caraco, N.F., Melack, J.M., & Middelburg, J.J. (2006). The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. *Limnology and Oceanography*, 51(5), 2388-2397. <https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.5.2388>
- Downing, J.A. (2010), Emerging global role of small lakes and ponds: Little things mean a lot, *Limnetica*, 29, 9-24. <https://doi.org/10.23818/limn.29.02>
- Echegoyen, C.V., Campodonico, V.A., Lecomte, K.L., Jobbágy, E.G., Yaciuk, P.A., & Sepulveda, L.D. (2022). Surface-water/groundwater exchange in a sand dune lake in the Dry Pampean Plain, Argentina: stable isotopic evidence. *Hydrogeol J*, 30, 783-796. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02449-w>
- Fisher, A., Flood, N., & Danaher, T. (2016). Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. *Remote Sensing of Environment*, 175, 167- 182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.055>
- Gayol, M.P., Morandeira, N., & Kandus, P. (2019). Dynamics of shallow lake cover types in relation to Paraná River flood pulses: assessment with multitemporal Landsat data. *Hydrobiologia*, 833(1), 9-24. <https://doi.org/10.1007/s10750-018-3847-x>
- Gernaldi, A. M. (2009). *Estudio geoambiental de la cuenca lagunar las encadenadas del oeste* [Doctoral thesis, Universidad Nacional del Sur]. Repositorio Institucional del Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur. <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/2233>
- Gernaldi, A. M., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2011). El rol de las lagunas bonaerenses en el paisaje pampeano. *Revista Ciencia Hoy*, 21(123), 16-22. <http://www.cienciahoy.org.ar/ch/ln/hoy123/lagunas.htm>
- Gernaldi, A. M., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2016). Drainage Basin Morphometry Of The Encadenadas Del Oeste Lakes, Argentina. *Journal of Geography and Regional Planning*, 9(2), 12 – 27. <https://doi.org/10.5897/JGRP09.050>

- Guo, M., Jing Li, C.S., Jiawei X., & Li W. (2017). A Review of Wetland Remote Sensing Sensors, 17(4), 777. <https://doi.org/10.3390/s17040777>
- Hernandez, E.A., & Uddameri, V. (2014). Standardized precipitation evaporation index (SPEI)-based drought assessment in semi-arid south Texas. *Environ. Earth Sci.*, 71(6), 2491-2501. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2897-7>
- Huang, C., Chen, Y., Zhang, S., & Wu, J. (2018). Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: A review. *Reviews of Geophysics*, 56, 333-360. <https://doi.org/10.1029/2018RG000598>
- Instituto Geográfico Nacional (2001). SIG 250. <http://www.ign.gob.ar/sig250>. http://www.ign.gob.ar/archivos/sig250/publicacion-conae-2012/004_Cuerpos_De_Agua.zip
- Inventario de humedales de la provincia de Buenos Aires. (2019). *Sistemas de Paisajes de Humedales. Primer Informe: Aspectos metodológicos, identificación y delimitación*. Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible. (OPDS). https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/inh_propuesta_de_marco_conceptual.pdf
- Kandus P., Minotti P., Morandeira N., Grimson R., González Trilla G., González E.B., San Martín L., & Gayol M.P. (2018). Remote sensing of wetlands in South America: status and challenges. *International Journal of Remote Sensing*, 39(4), 993-1016. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1395971>
- Kandus, P., & Minotti, P. (2019a). *Propuesta de un marco conceptual y lineamientos metodológicos para el Inventario Nacional de Humedales Informe Final*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33517.95201>
- Kandus, P., & Minotti, P. (2019b). Conceptos y enfoques metodológicos para un inventario de humedales a escala nacional: el paisaje como organizador. *Revista de la Asociación Argentina de Ecología de Paisajes*, 9(1). 84-89. [https://asadep.com.ar/files/200000102-a9dc7a9dc9/21_Kandus_CAEP_inventario%20\(1\).pdf](https://asadep.com.ar/files/200000102-a9dc7a9dc9/21_Kandus_CAEP_inventario%20(1).pdf)
- Laffeuillade, L.M., Barragán, F.G., Geraldi, A.M., & Arias, J. (2020). Modelo de localización óptima de balnearios mediante análisis espacial. *Cuadernos Geográficos*, 59, 330-348. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v59i2.9810>
- Maldonado, G. (2019). Territorio y agriculturización en Argentina. Objetos, acciones y acontecimientos / Territory and agriculturization in Argentina. Objects, actions and events. *Estudios Rurales*, 9(17), 164-197. <https://doi.org/10.48160/22504001er17.421>
- Marín Comitre, U., Schnabel S., & Pulido-Fernández, M. (2020). Hydrological Characterization of Watering Ponds in Rangeland Farms in the Southwest Iberian Peninsula. *Water*, 12(4), 1038. <https://doi.org/10.3390/w12041038>
- Matthew, M., Chumchal, R.W.D., & Kimberly, J.A. (2016) Abundance and size distribution of permanent and temporary farm ponds in the southeastern Great Plains. *Inland Waters*, 6(2), 258-264. <https://doi.org/10.5268/IW-6.2.954>
- McDonald, C.P., Rover J.A., Stets, E.G., & Striegl, R.G. (2012). The regional abundance and size distribution of lakes and reservoirs in the United States and implications for estimates of global lake extent. *Limnol Oceanogr.*, 57, 597-606. <https://doi.org/10.4319/lo.2012.57.2.0597>
- McFeeters, S.K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Rem. Sens.*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Mckee, T.B., Doesken, N.J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*. https://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf
- Miraglia, M. (1996). Diagnóstico ambiental de la Cuenca de las Encadenadas del oeste de la Pcia. de Buenos Aires. Bases históricas preliminares para el manejo de los recursos naturales del partido de Adolfo Alsina (Pcia. de Buenos Aires). http://www.rubenprofe.com.ar/11misc/Historia_ambiental.pdf
- Monachesi, A. (1995). Las inundaciones en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina: Un problema de actores y estrategias. *Revista Semestral de la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina*, 5, 1-9. <https://www.desenredando.org/public/revistas/dys/rdys05/dys5-1.0-liespbaa.pdf>

- Murray, N.J., Keith, D.A., Bland, L.M., Ferrari, R., Lyons, M.B., Lucas, R., Pettorelli, N., & Nicholson, E. (2018). The role of satellite remote sensing in structured ecosystem risk assessments. *Science of The Total Environment*, 619-620, 249-257. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.034>
- Oficina de vinculación científico-legislativa (2021). *Humedales de la provincia de Buenos Aires: Conservación, protección y uso racional y sostenible*. Comisión de investigaciones científicas. CONICET. https://reab.conicet.gov.ar/download/informes/Informe-Humedales_compressed.pdf
- Paruelo, J.M., Guerschman, J.P., Piñeiro, G., Jobbagy, E.G., Verón, S.R., Baldi, G., & Baeza, S. (2006) Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia*, 10(2), 47-61. <https://doi.org/10.31285/AGRO.10.929>
- Palmer, W.C. (1965). *Meteorological drought*. Research Paper No. 45, 58 p. Washington, DC: U.S. Department of Commerce Weather Bureau. <https://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/docs/palmer.pdf>
- Quirós, R., Rennella A., Boveri M., Rosso J., & Sosnovsky A. (2002). Factores que afectan la estructura y funcionamiento de las lagunas pampeanas. *Ecología Austral*, 12, 175-185. http://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia_Austral/article/view/1556
- Quirós, R., Boveri M.B., Petracchi C.A., Rennella A.M., Rosso J.J., Sosnovsky A. & Von Bernard H.T. (Eds.). (2006). Los efectos de la agriculturización del humedal pampeano sobre la eutrofización de sus lagunas. In J.G. Tundisi, T. Matsumura-Tundisi, C. SidagisGalli (Eds), *Eutrofização na América do Sul: Causas, conseqüências e tecnologias de gerenciamento e controle* (pp. 1-16). Instituto Internacional de Ecologia, Instituto Internacional de Ecologia e Gerenciamento Ambiental, Academia Brasileira de Ciências, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Inter - Academy Panel on International Issues, InterAmerican Network of Academies of Sciences. <https://www.agro.uba.ar/users/quiros/Eutrofizacion/Quirosetal2006EUTROSUL.pdf>
- Salvia, M., Karszenbaum, H., Kandus, P., & Grings, F. (2009). Datos satelitales ópticos y de radar para el mapeo de ambientes en macrosistemas de humedal. Asociación Española de Teledetección. *Revista de Teledetección*, 31, 35-51. <http://hdl.handle.net/11336/20682>
- Sandi, S.G., Saco, P.M., Saintilan, N., Wen, L., Riccardi, G., Kuczera, G., Willgoose, G., & Rodríguez, J.F. (2019). Detecting inundation thresholds for dryland wetland vulnerability. *Advances in Water Resources*, 128, 168-182. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.04.016>
- Scarpati, O.E., Forte Lay, J.A., & Capriolo, A.D. (2008). La inundación del año 2001 en la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Mundo Agrario*, 9(17). <https://www.mundoagrario.unlp.edu.ar/article/view/v09n17a05>
- Schindler, D. W. (2009). Lakes as sentinels and integrators for the effects of climate change on watersheds, airsheds, and landscapes. *Limnology and Oceanography*, 54(6 part 2), 2349-2358. https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2349
- Sohn, S.J, Joong-Bae A., & Chi-Yung T. (2013). Six month-lead downscaling prediction of winter to spring drought in South Korea based on a multimodel ensemble. *Geophys. Res. Lett*, 40, 579-583. <https://doi.org/10.1002/grl.50133>
- Solana, M.X., Quiroz Londoño, O.M., Romanelli, A., Donna, F., Martínez, D.E., & Weinzettel, P. (2021). Connectivity of temperate shallow lakes to groundwater in the Pampean Plain, Argentina: A remote sensing and multi-tracer approach. *Groundwater for Sustainable Development*, 13, 100556. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100556>
- Somoza, A., Vazquez, P.S., Zulaica, M.L., & Sacido, M.B. (2020). Dinámica espacio-temporal de usos del suelo en sistemas ecológicos de la región pampeana austral, Argentina: Agriculturización en el Partido de Tandil. *M+A. Revista Electrónica de Medio Ambiente*, 21(1), 82-10. <https://www.ucm.es/iuca/volumen-21-numero-1-revista-elecde-medioambiente>
- Spinoni, J., Barbosa, P., De Jager, A., McCormick, N., Naumann, G., Vogt, J.V., Magni, D., Masante, D., & Mazzeschi, M. (2019). A new global database of meteorological drought events from 1951 to 2016. *Journal of Hydrology*, 22, 100593. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2019.100593>
- Stagge, J.H., Kohn, I., Tallaksen, L.M., & Stahl, K. (2015). Modeling drought impact occurrence based on meteorological drought indices in Europe. *J. Hydrol.*, 530, 37-5. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.039>

- Svoboda, M., Fuchs, B., & Hayes, M.J. (2012). An Interface to Drought Mitigation: Decision Support Tools from the National Drought Mitigation Center, 2012. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2012AGUFM.H43H..01S/abstract>
- Tengroth, C., & Geraldi, A.M. (2022). Assessment of climate change and prospective analysis on shallow lakes, Las Encadenadas del Oeste watershed, Buenos Aires - Argentina. *Investigaciones Geográficas*, 77, 221-237. <https://doi.org/10.14198/INGEO.18640>
- Vicente-Serrano, S.M, Beguería, S. & López-Moreno, J.I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Clim.*, 23(7), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Vidal Quini, N.E., & Geraldi, A.M. (2021). Estudio de la situación hídrica de la cuenca Encadenadas del Oeste (2015-2019) mediante sensores remotos y sistemas de información geográfica. In *III Jornadas Internacionales y V Nacionales de Ambiente*. <https://jornadasambiente.ar/>
- Wetzel, R.G. (2001). *Limnology. Lake and river ecosystems* (3ra ed). Academic Press.
- Xia, H., Zhao, J., Qin, Y., Yang, J., Cui, Y., Song, H., Ma, L., Jin, N. & Meng, Q. (2019). Changes in Water Surface Area during 1989–2017 in the Huai River Basin using Landsat Data and Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 11(15),1824. <https://doi.org/10.3390/rs11151824>