

APORTES PARA LA CLASIFICACIÓN DE LAGUNAS SUBTROPICALES SEGÚN LA PERMANENCIA DE SUS AGUAS. EL CASO DE CONCEPCIÓN CORRIENTES (ARGENTINA)

Humberto Smichowski, Griselda Isabel Saucedo, Félix Ignacio Contreras

RESUMEN

El conocimiento tanto de la distribución como de las fluctuaciones en los niveles del agua, junto con las dinámicas ecológicas derivadas, es fundamental para lograr una comprensión holística necesaria para la gestión efectiva de los humedales, tanto en términos de conservación como de uso sustentable de este recurso. En este contexto, el objetivo de este trabajo es analizar el efecto de los eventos de inundación y sequía sobre las lagunas subtropicales del paisaje de lomadas arenosas en la provincia de Corrientes, determinando la superficie cubierta de agua durante eventos extremos. Para el estudio, se utilizaron imágenes Landsat 8 procesadas en la plataforma Google Earth Engine. Se calculó el índice MNDWI para los años 2017 (período húmedo) y 2020 (período seco) con el fin de identificar áreas con presencia de agua superficial. Las máscaras de superficie con agua obtenidas se superpusieron a la capa de lagunas de lomadas arenosas de Corrientes. Los resultados permitieron clasificar las lagunas según la permanencia del agua, además de discriminar aquellas que están parcial o totalmente cubiertas por macrófitas flotantes, las cuales pueden generar errores de detección en clasificaciones no supervisadas si no se consideran.

Palabras clave: Humedales; lagunas; eventos climáticos extremos; sequía; Corrientes.

CONTRIBUTIONS TO THE CLASSIFICATION OF SUBTROPICAL SHALLOW LAKES ACCORDING TO THE PERMANENCE OF THEIR WATERS. THE CASE OF CONCEPCION CORRIENTES (ARGENTINA)

ABSTRACT

The knowledge of both the distribution and fluctuations in water levels, along with the resulting ecological dynamics, is essential for achieving a holistic understanding necessary for the effective management of wetlands, both in terms of conservation and the sustainable use of this resource. In this context, the objective of this study is to analyze the effect of flood and drought events on the subtropical shallow lakes of the sandy hill landscape in the province of Corrientes, by determining the water-covered surface during extreme events. For this study, Landsat 8 images processed on the Google Earth Engine platform were used. The MNDWI index was calculated for the years 2017 (wet period) and 2020 (dry period) to identify areas with the presence of surface water. The obtained water surface masks were superimposed onto the sandy hill lagoons layer of Corrientes. The results allowed for the classification of shallow lakes based on water permanence, in addition to distinguishing those that are partially or completely covered by floating macrophytes, which can cause detection errors in unsupervised classifications if not considered.

Key words: Wetlands; shallow lakes; extreme climatic events; drought; Corrientes.

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento acerca de las dinámicas de los humedales como respuesta a los eventos de inundación y sequía constituye la base para lograr un ordenamiento territorial funcional, principalmente en regiones como el noreste argentino, donde las variaciones son extremas, incluso dentro de un mismo año (MARTÍNEZ *et al.*, 2021; FORASTIER *et al.*, 2024). En este sentido, los cuerpos de agua someros, y sobre todo aquellos que dependen de las precipitaciones locales, están directamente expuestos a las condiciones meteorológicas actuales (GERTEN y ADRIAN, 2001); mientras que los más profundos pueden verse influenciados por condiciones climáticas pasadas (FERRELLI y ALIAGA, 2015) o por el aporte de napas freáticas.

La morfometría de un humedal, así como el contexto ambiental en el que se encuentra, pueden constituir variables que condicione un efecto particular del clima (GERTEN y ADRIAN 2001; MOOIJ *et al.*, 2005; FERRELLI y ALIAGA, 2015). A su vez, la morfología de una laguna y su batimetría son factores clave que determinan su estructura térmica y patrones de sedimentación influyendo así en la distribución de las comunidades biológicas en su interior (WOOLWAY *et al.*, 2017). Por lo tanto, en este marco, las lagunas son centinelas y pueden ser utilizadas como indicadores de cambios ambientales que ocurren en el paisaje (CONTRERAS y DUVAL, 2021).

Para comprender la respuesta de un humedal, en este caso de las lagunas, es necesario conocer la recurrencia y severidad de los eventos climáticos extremos. No obstante, los estudios de carácter regional requieren mecanismos que permitan evaluar la situación en grandes extensiones y en un mismo momento (SMICHOWSKI *et al.*, 2022). De esta manera, se busca reducir al mínimo variables que puedan generar cambios significativos en cortos períodos de tiempo, como por ejemplo el aumento de la superficie de la cobertura con agua tras abundantes precipitaciones, como las mencionadas por CONTRERAS *et al.*, (2020) para este sistema de lagunas.

En este sentido, la teledetección combinada con sistemas de información geográfica (SIG) se presentan como herramientas claves para abordar esta problemática. El avance en el campo de las tecnologías espaciales en las últimas décadas ha propiciado el desarrollo de métodos avanzados de sensado remoto para monitoreo de la superficie terrestre (LOGROÑO-NARANJO *et al.*, 2020). La disponibilidad continua de imágenes satelitales de un mismo sitio, con gran resolución y transmisión inmediata, permite que los usuarios puedan disponer de información constante de grandes áreas a nivel mundial, posibilitando el análisis de la evolución de los fenómenos a lo largo del tiempo. Además, la posibilidad de realizar operaciones entre bandas espectrales facilita la detección de diferentes coberturas, lo que contribuye al conocimiento de la dinámica de la superficie.

Por ello, el procesamiento de imágenes satelitales se ha convertido en una herramienta esencial para el monitoreo de los cambios en cuerpos de agua, especialmente en áreas donde estos cambios generan problemas para la población residente. En base a lo expuesto, el objetivo del trabajo es realizar un análisis de los eventos de inundación y sequía sobre las lagunas de lomadas arenosas en el departamento Concepción de la provincia de Corrientes, con el fin de determinar la superficie cubierta de agua en períodos húmedos y secos y clasificarlas según la permanencia de sus aguas.

2. ESTADO DEL ARTE

Las masas de agua superficial constituyen recursos naturales limitados y vulnerables (GAUTAM, 2023), que desempeñan funciones esenciales en la regulación climática, el sostenimiento de los ecosistemas y el desarrollo humano sostenible (PEKEL *et al.*, 2016). Numerosos estudios han evidenciado que tanto los factores climáticos como las actividades antrópicas influyen en la distribución del agua superficial, provocando variaciones espaciales y temporales notables (KLEIN *et al.*, 2015).

Frente a estas dinámicas, el monitoreo multitemporal mediante sensores remotos se ha consolidado como una herramienta eficaz para la detección, caracterización y seguimiento de cuerpos de agua superficial (CHEN *et al.*, 2022; LI *et al.*, 2023; SHENG *et al.*, 2016; YANG *et al.*, 2020). La observación continua de estos sistemas resulta fundamental para la planificación

ecológica y ambiental, la gestión sostenible de los recursos hídricos y la prevención de eventos extremos como inundaciones y sequías (XING *et al.*, 2018).

Las técnicas de teledetección permiten acceder a información superficial en tiempo casi real, de forma dinámica, eficiente y a bajo costo. El aumento reciente en la disponibilidad y accesibilidad de datos satelitales, junto con el desarrollo de plataformas de procesamiento en la nube, ha incrementado la demanda por técnicas más precisas y robustas para la detección de cuerpos de agua (NAGARAJ y KUMAR, 2024). En este contexto, se han desarrollado múltiples métodos basados en imágenes de sensores ópticos, los cuales pueden agruparse en tres grandes categorías: índices espectrales (McFEETERS, 1996; XU, 2006; FEYISA *et al.*, 2014), algoritmos de aprendizaje automático (ACHARYA *et al.*, 2019; LI *et al.*, 2021) y técnicas de aprendizaje profundo (CHENG *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2020; MAYER *et al.*, 2021).

A pesar del avance de los enfoques basados en inteligencia artificial, los índices espectrales continúan siendo ampliamente utilizados debido a su simplicidad, estabilidad operativa y eficiencia computacional (CHE *et al.*, 2025). Entre los más empleados se encuentran el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) (GAO, 1996; McFEETERS, 1996), el Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI) (XU, 2006), el Índice de Extracción Automática de Agua (AWEI) (FEYISA *et al.*, 2014) y el Índice de Agua Mejorado (EWI) (WANG *et al.*, 2015). Sin embargo, uno de los principales desafíos asociados a estos índices es su sensibilidad a interferencias espectrales, lo cual compromete la precisión en la delimitación de los cuerpos de agua. Factores como la topografía, la presencia de nieve, hielo, nubes, sombras o vegetación macrofita alteran la señal espectral y dificultan su detección confiable (KHALID *et al.*, 2021).

Respecto de la vegetación macrofita, VILLA *et al.* (2014) afirman que, aunque la respuesta espectral del dosel vegetal acuático y terrestre puede ser similar, la presencia de agua—ya sea superficial o subyacente—introduce elementos adicionales que modifican la firma espectral, tales como la profundidad de la columna de agua, sus propiedades ópticas y el efecto de fondo. Estos factores influyen particularmente en la identificación y diferenciación de la vegetación acuática. Por ello, los autores lograron discriminar con éxito entre vegetación terrestre y acuática mediante el uso del Índice de Vegetación Acuática de Diferencia Normalizada (NDAVI) y el Índice de Vegetación Ajustado al Agua (WAVI), aunque señalaron que su aplicación en imágenes de resolución media aún presenta limitaciones relacionadas con la mezcla de píxeles y la heterogeneidad espacial.

Por otra parte, la teledetección activa ha demostrado ser altamente eficaz en la caracterización de la superficie terrestre bajo condiciones de nubosidad, humo o cobertura vegetal densa (XING *et al.*, 2018; ADELI *et al.*, 2020). Particularmente, los sensores radar de apertura sintética (SAR) en banda L han mostrado gran utilidad para detectar agua oculta bajo vegetación, especialmente en zonas boscosas (HESS *et al.*, 2003; ROSENQVIST *et al.*, 2007; EVANS *et al.*, 2010).

A diferencia de la mayoría de los estudios internacionales, centrados en cuerpos de agua de gran escala y con escasa cobertura vegetal, este trabajo aborda un tipo de sistema hidrológico poco representado: lagunas someras subtropicales con alta presencia de vegetación flotante y emergente. Se propone una tipología que integra la permanencia del agua y el grado de cobertura vegetal, facilitando una caracterización más precisa de su dinámica.

3. METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio

El paisaje del noroeste de la provincia de Corrientes se encuentra íntimamente influenciado por el desarrollo del mega abanico aluvial del Paraná que determina sus características fisiográficas (HERBST y SANTA CRUZ, 1999; IRIONDO, 2010; CONTRERAS y CONTRERAS, 2018). El elemento positivo del relieve se encuentra está constituido por una serie de lomadas arenosas con dirección predominante noreste – sudoeste que sobresalen aproximadamente 10 metros por encima de una zona de planicies inundables (POPOLIZIO, 1986; SERRA, 2001; CONTRERAS y PARUZZO, 2020).

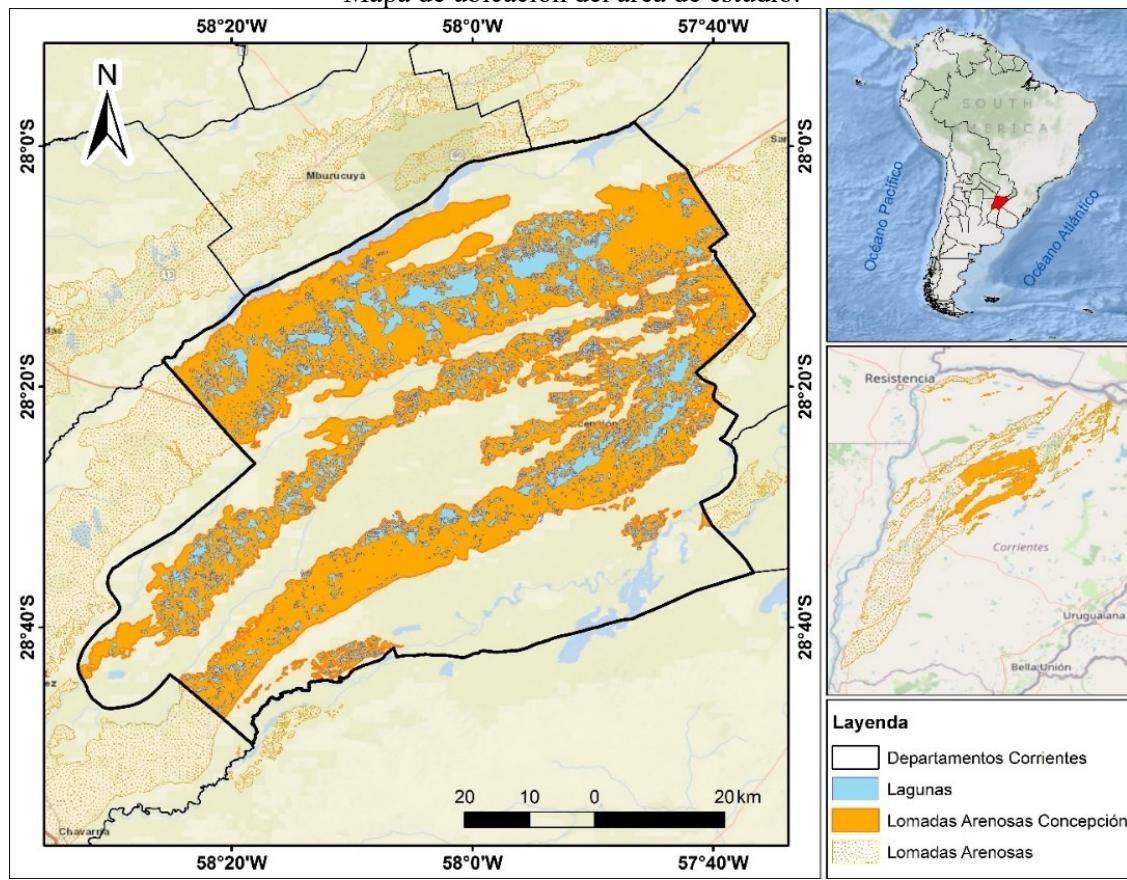
Al constituir la parte positiva del relieve de la región, las lomadas arenosas adquieren gran importancia para la sociedad. Prácticamente todas las localidades de la zona se encuentran sobre estas lomadas, y las vías de comunicación en general están trazadas siguiendo su desarrollo. Además, estas áreas soportan actividades productivas, como la agrícola y forestal, que no pueden realizarse en las áreas bajas inundables (CONTRERAS y FANTÍN, 2015).

El rasgo más característico de este paisaje lo constituye la gran cantidad de lagunas, las cuales fueron inventariadas por CONTRERAS y CONTRERAS (2017) con un total de 38.926 cubetas de diferentes tamaños y formas, cuyo origen se asocia a procesos poligenéticos superficiales y subsuperficiales (CONTRERAS y CONTRERAS, 2018). En este sentido, no solo es importante el número total de cuerpos de agua, sino también su densidad, la cual es de 3 cubetas por km², representando, en algunos casos, valores que superan al 20 % de este paisaje, si se tienen en cuenta las divisiones departamentales.

El área de estudio comprende el departamento de Concepción, ubicado en el centro de la provincia de Corrientes, sobre la margen occidental de los esteros del Iberá (Figura 1). Sola la mitad de la superficie departamental se considera apta para asentamientos humanos o para actividades agrícolas y/o forestales, ya que el resto está compuesto por ambientes anegadizos, localmente conocidos como esteros y cañadas, que son áreas deprimidas con pendiente muy reducida y un lento escurrimiento (CONTRERAS y CONTRERAS, 2017).

Este departamento posee 6.327 lagunas del total de 38.926, con una densidad de 2,4 lagunas por km² y una densidad lacustre del 20 %, ocupando el tercer lugar entre los departamentos con mayor cantidad lagunas en toda la provincia de Corrientes (CONTRERAS y CONTRERAS, 2017). Esta situación genera problemas para la expansión urbana y productiva de la región, debido a que la superficie efectiva apta para uso antrópico es muy reducida. Además, se ejerce una presión sobre los cuerpos de agua naturales, que a menudo se ven afectados por las actividades humanas, influyendo en su comportamiento ecosistémico y ecológico (MARTÍNEZ *et al.*, 2021)

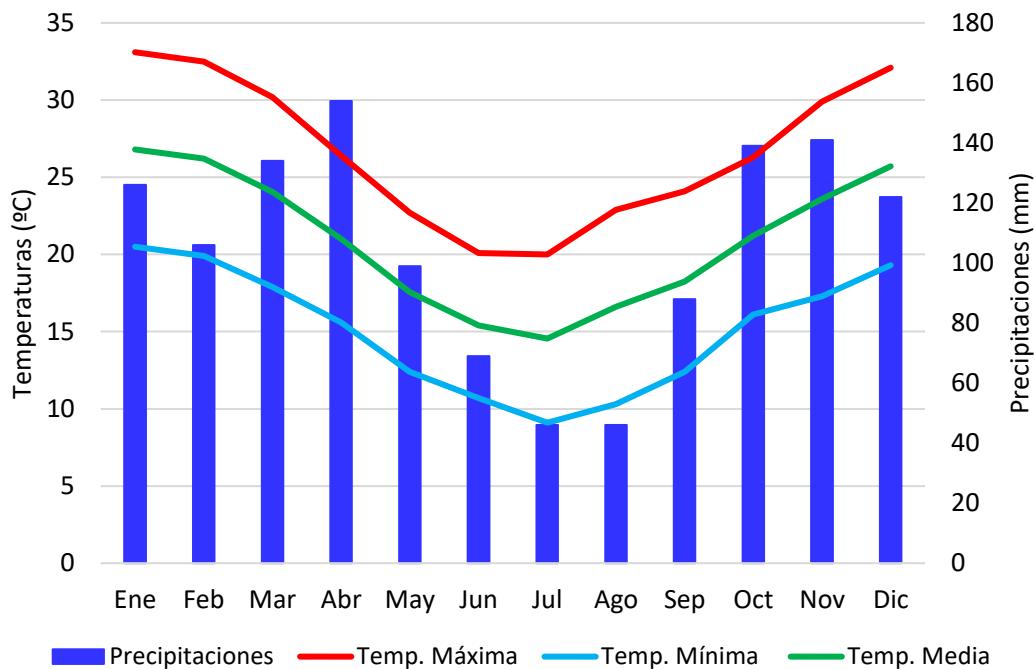
FIGURA 1
Mapa de ubicación del área de estudio.



Fuente: Elaboración propia

Concepción posee un clima subtropical, con temperaturas medias anuales que rondan los 21 °C, según el SMN. Según CONTRERAS *et al.*, (2020), la precipitación media anual de la región es de 1.400 mm (ver Figura 2), aunque esta puede variar normalmente entre 1.200 y 1.500 en ciclos que duran aproximadamente dos años, y está fuertemente influenciada por el fenómeno El Niño – Oscilación del Sur (ENSO) (SMICHOWSKI *et al.*, 2022). A partir del año 2015, asociado a la manifestación del fenómeno de El Niño, se han registrado durante cuatro años consecutivos precipitaciones que superaron los 2.000 mm anuales, 600 mm por encima del promedio. En contraste, desde mediados del año 2018 y especialmente en 2020, se han registrado eventos de sequía (CONTRERAS *et al.*, 2020; SMICHOWSKI *et al.*, 2022).

FIGURA 2
Climograma del Departamento Concepción (Corrientes, Argentina) para el período 1980-2020.



Fuente: Elaboración propia con datos del dataset TerraClimate disponible en GEE.

3.2. ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA

La determinación de los períodos de eventos secos y húmedos se realizó aplicando el Índice de Evapotranspiración y Precipitación Estandarizada (SPEI por sus siglas en inglés), que considera tanto las precipitaciones como la evapotranspiración potencial en su formulación para expresar las relaciones de oferta y demanda de agua, ayudando a comprender las influencias del cambio climático (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2012; CONTRERAS y DUVAL, 2021; MARTÍNEZ *et al.*, 2021).

Los valores normales del índice poseen un rango de -0,99 a 0,99, siendo los valores positivos indicativos de eventos de exceso y los valores negativos de eventos de sequía (Tabla 1). Estos valores pueden ser utilizados con distintas escalas temporales, siendo el SPEI 1 para un análisis mensual y el SPEI-12 para análisis anuales (CONTRERAS y DUVAL, 2021)

TABLA 1

Rangos del Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración Potencial utilizando para clasificar severidad de eventos extremos.

Índice	Categoría
2,0 o más	Extremadamente húmedo
1,5 a 1,99	Muy húmedo
1,0 a 1,49	Moderadamente húmedo
-0,99 a 0,99	Normal o aproximadamente normal
-1,0 a -1,49	Moderadamente seco
-1,5 a -1,99	Severamente seco
-2 y menos	Extremadamente seco

Fuente: Elaboración propia en base a CONTRERAS *et al.*, (2022)

Para el estudio de las lagunas de Concepción, se optó por la utilización del SPEI 3, que realiza una descripción trimestral entre el mes seleccionado y los 2 anteriores. Con ellos se hicieron comparaciones de los últimos 40 años (1980 en adelante), este análisis histórico sirvió para contextualizar la intensidad de los eventos en relación con la historia reciente de la región. Por otro lado, el área de estudio abarca dos píxeles del SPEI (-28.75, -57.75 y -28.75, -58.25). Los datos se descargaron del sitio web (<https://spei.csic.es/map/maps.html#months=1#month=4#year=2021>) como “región”, obteniendo así datos promediados entre ambos píxeles.

3.3. TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Dada la alta densidad de cuerpos de agua en el área de estudio, se empleó teledetección para su identificación. Las imágenes fueron adquiridas y procesadas en la plataforma *Google Earth Engine* (GEE), las cuales ofrecen imágenes ortorectificadas y con corrección de reflectancia a nivel de superficie. GEE cuenta con una amplia base de datos de información espacial y permite a los usuarios trabajar con serie de imágenes en simultáneo a través de Python o JavaScript, facilitando el procesamiento de grandes volúmenes de datos (GORELICK *et al.*, 2017; LISS *et al.*, 2017; ANAYA *et al.*, 2018).

Se utilizaron imágenes multiespectrales Landsat 8 procesadas en Google Earth Engine (GEE), correspondientes a períodos hidrológicos contrastantes: marzo a mayo de 2017 (excedente hídrico) y agosto a octubre de 2020 (sequía). Las imágenes fueron seleccionadas bajo un umbral de nubosidad <10% y se generaron compuestos temporales mediante estadísticas de reflectancia (media) para cada período (Tabla 2).

Para la detección de agua superficial se aplicó el *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI) sobre los dos compuestos obtenidos. El MNDWI maximiza la reflectancia del agua al utilizar longitudes de ondas en el verde, y maximiza la reflectancia de la vegetación y minimiza la reflectancia de masas de agua gracias a la banda del infrarrojo cercano (IRC) y del infrarrojo medio (IRM). De esta manera, la presencia de agua se identifica en la imagen obtenida, con valores de cada pixel en un rango de -1 y 1 debido a su definición matemática, donde los valores positivos del MNDWI indican presencia de agua (MAESTRI *et al.*, 2019).

$$\text{MNDWI} = (\text{GREEN} - \text{SWIR}) / (\text{GREEN} + \text{SWIR}) \quad (1)$$

$$\text{Landsat 8} = (\text{B3} - \text{B6}) / (\text{B3} + \text{B6}) \quad (2)$$

El MNDWI ha sido probado en áreas de océanos, lagos y ríos con el fondo de tierras construidas y/o tierras con vegetación, y en cuerpos de agua limpios y contaminados, mejorando significativamente la información ofrecida por el NDWI (GAO, 1996; McFEETERS, 1996), y permitiendo extraer con mayor precisión cuerpos de agua en las áreas de estudio (XU, 2006). Para la generación de la máscara se utilizó el umbral NDWI > 0 para detección de zonas con agua en superficie (SMICHOWSKI *et al.*, 2022) y los resultados fueron exportados para análisis espacial en QGIS.

TABLA 2
Resumen del material utilizado

<i>Condición</i>	<i>Período considerado</i>	<i>Satélite / Sensor</i>	<i>Resolución espacial</i>	<i>Resolución temporal</i>	<i>Criterio de nubosidad</i>	<i>Imágenes (nº)</i>	<i>Compuesto temporal</i>
Húmedo	marzo, abril y mayo de 2017	Landsat 8 - OLI	30 metros	16 días	<10%	17	Promedio trimestral
Sequía	agosto, septiembre y octubre del 2020	Landsat 8 - OLI	30 metros	16 días	<10%	13	Promedio trimestral

Fuente: Elaboración propia

3.4. CLASIFICACIÓN DE CUBETAS SEGÚN CONDICIONES HIDROLÓGICAS Y COBERTURA DE EMBALSADO

La base para la clasificación de cubetas en función de condiciones hidrológicas fue el *shapefile* de lagunas correspondiente a las lomadas arenosas de la provincia de Corrientes (Contreras y Contreras, 2017), restringido en este estudio a su porción correspondiente al departamento de Concepción. Las máscaras de agua, generadas a partir de imágenes satelitales, fueron superpuestas sobre esta capa vectorial. Esta metodología permitió distinguir entre escenarios de inundación y sequía, incorporando además la presencia de embalsados, entendidos como formaciones de macrófitas flotantes que pueden cubrir parcial o totalmente una laguna. Estos embalsados pueden ser yacentes, anclados o flotantes, y se originan por la colonización de plantas palustres sobre camalotales de vegetación flotante libre o arraigada (Neiff, 1982; Pacella y Di Pasquo, 2020). Las cubetas constituyen las unidades geomorfológicas de análisis y fueron evaluadas bajo ambos regímenes hidrológicos:

- En *condiciones de inundación*, la presencia de agua superficial detectada se interpreta como una cubeta libre de embalsado o con embalsado parcial. En cambio, si no se detecta agua, se asume la existencia de embalsado total, es decir, una cubierta vegetal que oculta completamente el espejo de agua.
- En *condiciones de sequía*, si se detecta agua en superficie, la cubeta se clasifica como permanente, dado que mantiene agua incluso en ausencia de aportes significativos. Por el contrario, cuando no se detecta agua, se contemplan dos posibles interpretaciones: si la cubeta está efectivamente seca, se clasifica como semipermanente, lo que indica que su llenado depende de precipitaciones estacionales o eventos extremos; si la ausencia de agua visible se debe a un embalsado total, se clasifica como no detectable bajo condiciones de sequía.

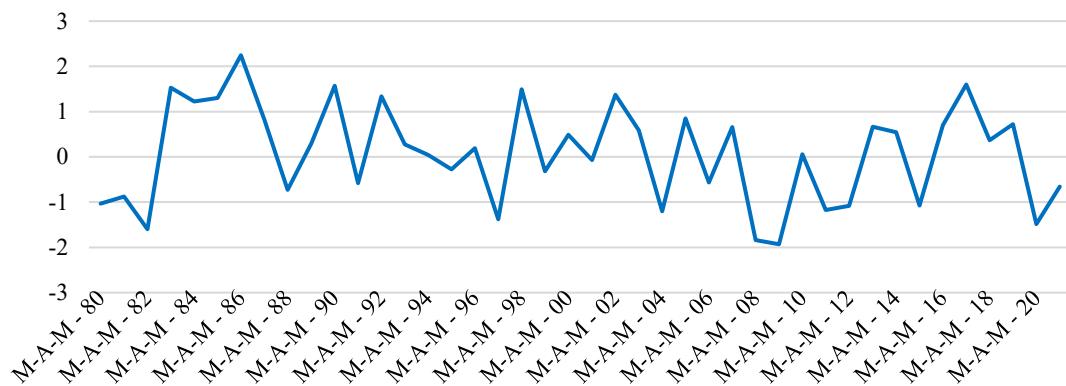
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Los resultados obtenidos del SPEI 3 del mes de mayo para el período húmedo muestran que, en el momento de la captura de las imágenes satelitales, se estaba produciendo un evento de inundación severa (1,60), solo superado en los últimos 40 años por el evento de 1986 (2,24), con eventos de inundación extrema (ver Figura 3). Cabe destacar que ambas situaciones extremas no estaban relacionadas con el evento de “El Niño”, según la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (<https://www.noaa.gov/>).

FIGURA 3

Valores de SPEI – 3 del mes de mayo correspondientes a los trimestres con mayores precipitaciones anuales, Concepción, Rep. Argentina. Período 1980-2022.

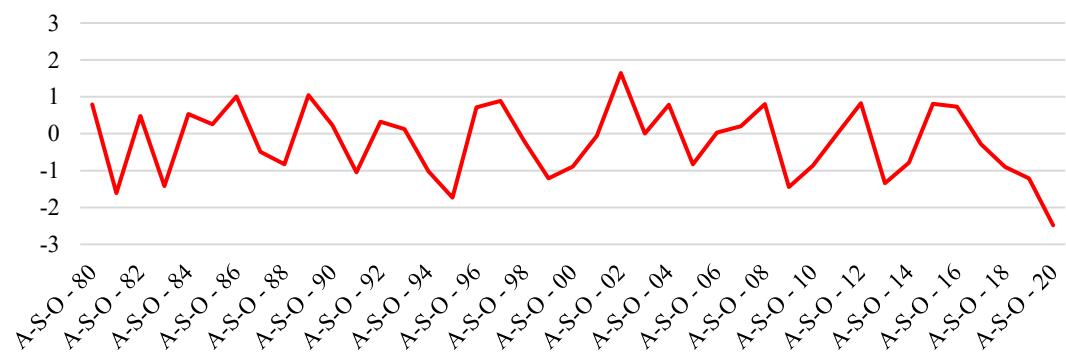


Fuente: Elaboración propia en base a datos del SPEI 3 del mes 5

Por su parte, se observa que los meses de agosto, septiembre y octubre de 2020 fueron extremadamente secos (-2,48) y representan el período más seco de los últimos 40 años en el área (ver Figura 4). Estos datos coinciden con la gran sequía que ha afectado a la región en general, destacándose la bajante extraordinaria del río Paraná (SAUCEDO *et al.*, 2020).

FIGURA 4

Valores de SPEI – 3 del mes de octubre correspondientes a los trimestres con menores precipitaciones anuales, Concepción, Rep. Argentina. Período 1980-2022.



Fuente: Elaboración propia en base a datos del SPEI 3 del mes 10

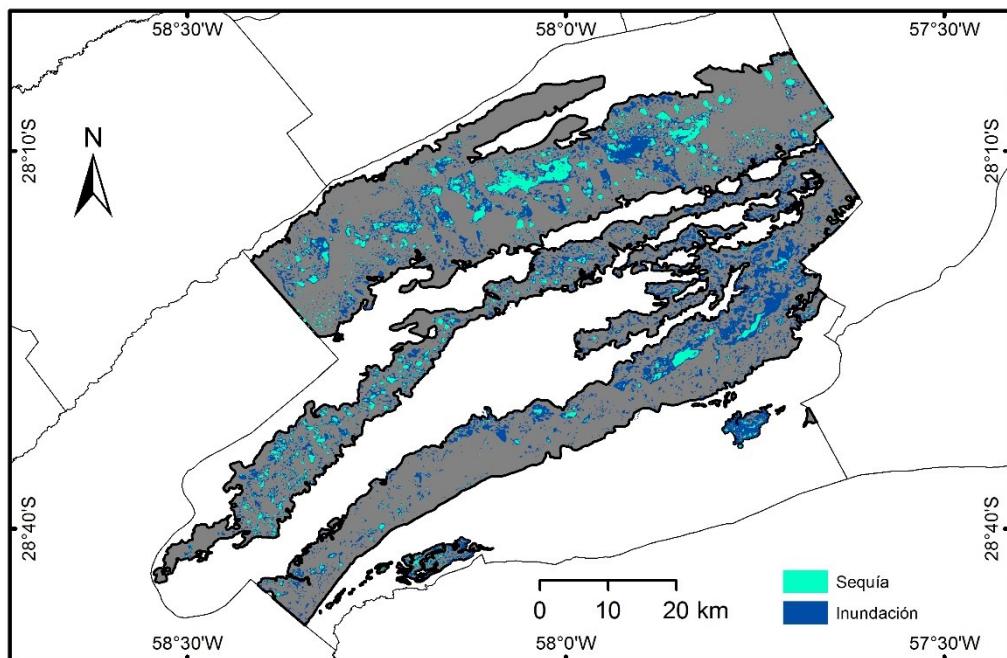
4.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS LAGUNAS EN EVENTOS HÚMEDOS Y SECOS

La Figura 5 muestra la distribución espacial de lagunas tanto en el período húmedo como en el seco. Se observa un mayor número de cubetas en el sector norte, donde las de mayor superficie mantienen una alineación general con las lomadas, mientras que las más pequeñas presentan una disposición perpendicular. Estas diferencias fueron descriptas en CONTRERAS y CONTRERAS (2020), quienes demostraron la influencia de la pendiente en la morfometría y alineación de las lagunas.

Según los mismos autores, durante períodos de inundación, además de reaparecer charcas temporales, se reactivan las áreas de interconexión entre cubetas y, en algunos casos, se producen desbordes someros. Por esta razón, la morfología de las lagunas tiende a ser más irregular en

comparación con los procesos de secado, donde predominan las formas circulares (CONTRERAS y PAIRA, 2016).

FIGURA 5
Distribución espacial de lagunas en lomadas arenosas del departamento Concepción (Corrientes, Argentina) durante eventos climáticos extremos (inundación y sequía)



Fuente: Elaboración propia

Durante el período húmedo se detectaron 6.327 cubetas activas que ocupaban una superficie total de 52.040 hectáreas (Tabla 3). En contraste, en el período seco, solo 1.634 cubetas mantenían agua en superficie, lo que representa el 26 % del total, y ocupaban 13.303 hectáreas (Tabla 2). Esta marcada reducción confirma la alta elasticidad hidrológica del sistema, con una contracción estacional del 74 % en el número de cuerpos de agua activos y una pérdida de 75 % de la superficie inundada.

En definitiva, se confirma lo estimado por CONTRERAS y PAIRA (2016), quienes afirman que el número de cubetas se reduce a un 25 % del total. Este dato, que destaca la elasticidad del ambiente, es importante porque, si los períodos secos se prolongan, muchas de estas áreas inundables-anegables pueden ser ocupadas por asentamientos humanos, aumentando la población expuesta a peligros de inundación, como ya ha ocurrido en otros sectores de la provincia (CONTRERAS *et al.*, 2020).

TABLA 3 Cantidad de cubetas con agua y superficie ocupada durante evento húmedo y seco		
Período	Cantidad de cubetas y porcentaje	Superficie total (en has)
Húmedo	6.327 (100 %)	52.040
Seco	1.634 (26 %)	13.303

Fuente: Elaboración propia

4.3. CLASIFICACIÓN DE LAGUNAS SEGÚN LA PERMANENCIA DE SUS AGUAS

La clasificación de las lagunas según la permanencia de sus aguas se basó en la detección o no de agua superficial durante el período seco, considerando además la influencia de la cobertura de embalsados (Figura 6). Se definieron tres categorías:

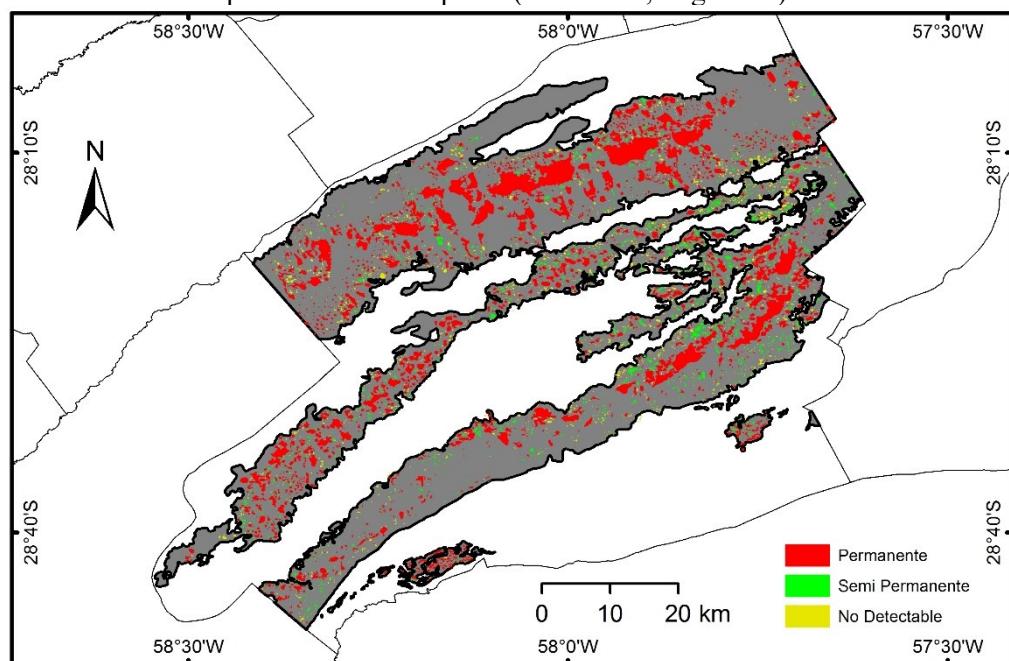
- *Permanente*: Cubetas en las que se detecta agua en superficie tanto en períodos de inundación como en sequía. Su expresión hídrica se mantiene activa incluso en

condiciones climáticas secas, lo que indica una alta estabilidad hidrológica. Estas lagunas no se encuentran cubiertas por embalsados, lo que permite su detección mediante sensores ópticos.

- *Semipermanente*: Cubetas que presentan agua en superficie únicamente durante los períodos de inundación. En épocas secas, no se detecta agua y tampoco se observan embalsados que impidan la visualización del espejo de agua. En estos casos, la ausencia de agua responde a una dinámica hidrológica estacional genuina, por lo que se las considera lagunas secas durante la sequía.
- *No detectable*: Cubetas donde no se detecta agua en superficie durante el período seco debido a la cobertura total por embalsados flotantes. Esta vegetación impide la observación del espejo de agua mediante sensores ópticos, por lo que no es posible confirmar visualmente su condición hidrológica.

FIGURA 6

Clasificación de lagunas según la permanencia de sus aguas en lomadas arenosas del departamento Concepción (Corrientes, Argentina)



Fuente: Elaboración propia.

La clasificación de las lagunas según la permanencia de sus aguas muestra una distribución proporcional entre cubetas permanentes (26 %) y semipermanentes (25 %), mientras que un 49 % no presenta señales de agua detectables en períodos secos (Tabla 4), presumiblemente debido a la cobertura densa de embalsados. Esta última categoría pone en evidencia una limitación en los métodos de detección ópticos para interpretar la hidrología de las lagunas, ya que el agua subyacente queda enmascarada por la vegetación flotante.

TABLA 4
Cantidad de cubetas clasificadas según la permanencia de sus aguas

Cubetas	Cantidad de cubetas	%
Permanente	1.634	26
Semi Permanente	1.605	25
No detectable	3.088	49

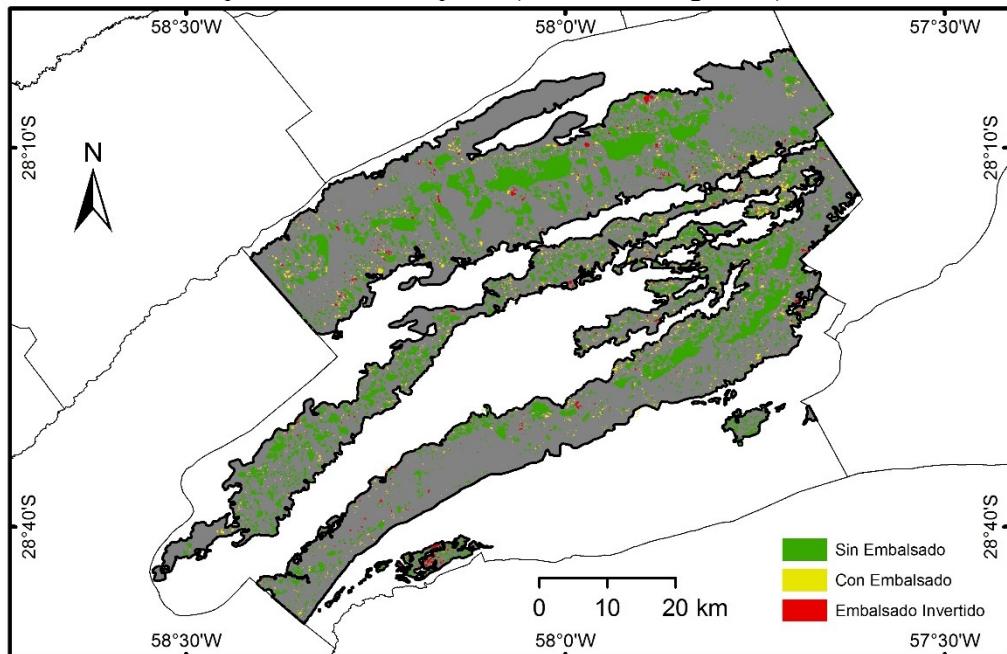
Fuente: Elaboración propia

4.4. CLASIFICACIÓN DE LAGUNAS SEGÚN LA PRESENCIA DE EMBALSADOS

Durante el período de inundación, la presencia de macrófitas flotantes (embalsados) puede interferir con la detección de agua en superficie. Por esta razón, se clasificaron las cubetas según el grado de cobertura vegetal observada en sus áreas limnéticas (Figura 7), a partir de dos condiciones principales: la detección de agua en superficie y la interferencia generada por los embalsados. Se definieron tres categorías:

- *Libre de embalsado o embalsado parcial*: Cubetas en las que se detecta agua en superficie durante la inundación. La cobertura vegetal es inexistente o escasa, permitiendo observar el espejo de agua mediante sensores ópticos.
- *Embalsado total*: Cubetas donde no se detecta agua en superficie en eventos húmedos, debido a que se encuentran completamente cubiertas por vegetación flotante.
- *Embalsado dinámico o invertido*: Cubetas en las que se detecta agua únicamente durante el período seco, ya que los embalsados presentes en época húmeda desaparecen total o parcialmente durante la sequía. Estas lagunas coinciden con la categoría de permanentes, ya que mantienen agua en período seco.

FIGURA 7
Clasificación de lagunas según la presencia de embalsado en lomadas arenosas del departamento Concepción (Corrientes, Argentina)



Fuente: Elaboración propia

El análisis del tipo de embalsado aporta información complementaria sobre la cobertura vegetal en el espejo de agua. Se identificó que el 49 % de las lagunas presenta embalsado total, lo que coincide con la categoría de “no detectables” en la clasificación anterior. Un 46 % de las cubetas están libres de embalsados o presentan una cobertura parcial, lo que permite la detección del agua en eventos húmedos. Finalmente, un 5 % corresponde a un comportamiento hidrológico particular, denominado embalsado dinámico o invertido, donde las lagunas resultan visibles solo durante los períodos secos, cuando los embalsados se retraen y permiten la observación del espejo de agua (Tabla 5).

TABLA 5
Cantidad de cubetas clasificadas según la presencia de embalsado

Cubetas	Cantidad de cubetas	%
---------	---------------------	---

Embalsado total	3.088	49
Embalsado parcial	2.925	46
Embalsado invertido	314	5

Fuente: Elaboración propia

4.5. IMPLICANCIAS METODOLÓGICAS

Una de las principales limitaciones que enfrentan los estudios basados en teledetección óptica es la presencia de embalsados, formaciones de macrófitas flotantes que pueden cubrir total o parcialmente el espejo de agua. Esta vegetación interfiere con la detección espectral del agua, ya que su firma espectral es similar a la de otras coberturas vegetales. En este trabajo, dicha limitación fue abordada mediante el uso del shapefile, que permitió restringir el análisis exclusivamente a las áreas lacustres previamente definidas. Esto posibilitó inferir la presencia de agua en cubetas donde no se detectaba directamente, pero que presentaban cobertura vegetal flotante.

Si bien existen enfoques alternativos para detectar agua oculta bajo vegetación, como el uso combinado de sensores radar (SAR), índices espectrales adaptados o algoritmos de clasificación supervisada con validación de campo, estos métodos suelen requerir mayores volúmenes de procesamiento, múltiples fuentes de datos y una mayor carga operativa.

En consecuencia, el uso del shapefile aportó una solución metodológica práctica y robusta, brindando coherencia espacial, comparabilidad temporal y capacidad de interpretación frente a una de las principales limitantes de los sensores ópticos en ambientes con vegetación flotante densa. Esta estrategia hizo posible la elaboración de clasificaciones detalladas sobre permanencia hídrica y presencia de embalsados en un contexto subtropical.

4.6. IMPLICANCIAS TERRITORIALES

Los resultados obtenidos en este estudio permiten reflexionar sobre diversos aspectos territoriales vinculados a la dinámica hidrológica de las lagunas de lomadas arenosas del departamento Concepción. Una de las principales observaciones es que, si bien un alto porcentaje de lagunas no presenta agua detectable mediante sensores ópticos en períodos secos, esto no implica su inactividad hidrológica. Se identificaron numerosas cubetas, especialmente de menor tamaño, que se secan estacionalmente, y otras que reducen significativamente su superficie cubierta de agua durante la sequía. Esta condición de aparente inactividad puede llevar a una falsa percepción de estabilidad territorial.

En ese contexto, la retracción estacional del espejo de agua deja sectores periféricos temporalmente secos, lo que favorece el avance de actividades antrópicas como la urbanización, la forestación o el uso agropecuario. Sin embargo, en ciclos húmedos, estas mismas áreas pueden volver a inundarse, generando conflictos de uso del suelo, impactos ambientales y riesgos para las poblaciones que ocupan o intervienen estos espacios. Este fenómeno, identificado también por Contreras y Paire (2016), evidencia que el régimen hidrológico de las lagunas es altamente dinámico, y que su gestión requiere una perspectiva temporal más amplia que contemple su comportamiento cíclico.

Por otro lado, se observó que más del 50 % de las cubetas presenta cobertura de embalsados, lo que añade una capa de complejidad ecológica y funcional a estos ambientes. Estas formaciones vegetales flotantes no solo dificultan la detección del agua superficial mediante teledetección óptica, sino que además cumplen funciones ecológicas clave: influyen en los caracteres físicos y químicos de las aguas; sirven de hábitat para el desarrollo de numerosos organismos y establecen complejas relaciones comunitarias; inciden en la vida de otras comunidades (plancton, bentos, etc); participan en los procesos morfogenéticos de las cuencas y actúan como medio de dispersión de muchas especies florísticas y faunísticas (TUR, 1972). Además, el estudio de los embalsados puede proporcionar información sobre el comportamiento de los ambientes pasados (paleoambiente) y su evolución hasta el estado actual (NEIFF, 1982; PACELLA y DI PASQUO,

2020). Desde esta perspectiva, los embalsados deben ser considerados como elementos fundamentales dentro de la matriz territorial de los humedales.

Finalmente, los resultados obtenidos destacan la necesidad de integrar el conocimiento sobre la dinámica natural de estos sistemas en los procesos de ordenamiento territorial y planificación del uso del suelo. La conservación de cubetas permanentes, por ejemplo, es fundamental para garantizar la disponibilidad de agua en contextos de sequía extrema, condición vital para muchas especies asociadas a estos ambientes. Asimismo, la adecuada interpretación de áreas aparentemente secas, pero con potencial de anegamiento estacional resulta clave para evitar intervenciones inapropiadas y promover un desarrollo más compatible con la funcionalidad ecológica de los humedales.

5. CONCLUSIONES

El estudio de las lagunas ubicadas sobre las lomadas arenosas del departamento Concepción, provincia de Corrientes, permitió caracterizar la dinámica hidrológica y ecológica de estos sistemas a través de un enfoque multitemporal basado en teledetección y análisis geoespacial. La clasificación de cubetas según la permanencia del agua y la presencia de embalsados ofreció una visión integral del comportamiento de estas unidades durante eventos climáticos extremos, revelando patrones estacionales que tienen implicancias tanto ambientales como territoriales.

Desde el punto de vista metodológico, el uso del shapefile como unidad espacial de análisis fue decisivo para garantizar la coherencia y precisión del estudio. Esta capa permitió superar una de las principales limitaciones de la teledetección óptica —la dificultad para detectar agua cubierta por vegetación flotante— al restringir el análisis a las áreas lacustres previamente delimitadas. Si bien existen metodologías más complejas que integran sensores radar o modelos multifuente, el enfoque adoptado resultó adecuado y eficiente para los objetivos propuestos.

En términos territoriales, los resultados advierten sobre la alta sensibilidad de las lagunas al régimen climático. La retracción estacional del espejo de agua en cubetas permanentes y semipermanentes deja sectores temporalmente secos, que suelen ser ocupados o transformados sin considerar su condición potencialmente anegable. Esta subestimación del riesgo puede derivar en conflictos de uso del suelo, impactos ambientales y vulnerabilidad social. Además, la identificación de embalsados como componente ecológico clave resalta la necesidad de incorporar estas formaciones vegetales en las estrategias de monitoreo, conservación y ordenamiento territorial.

En suma, este trabajo aporta evidencia y herramientas para comprender mejor la dinámica de los humedales subtropicales, destacando la importancia de integrar información multitemporal, criterios ecológicos y conocimiento geográfico en la gestión sustentable del territorio. Su aplicación resulta fundamental para la toma de decisiones informadas en escenarios de cambio climático, expansión de la frontera productiva y creciente presión sobre los ecosistemas acuáticos.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por los proyectos PIBAA CONICET, PI 20Q001 y Programa PROFIN, ambos de la SGCyT – UNNE.

7. REFERENCIAS

- ABATZOGLOU, J. T., DOBROWSKI, S. Z., PARKS, S. A. y HEGEWISCH, K. C. (2018): “Terraclimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015”, *Scientific Data*, vol. 5, artículo 170191. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- ACHARYA, T. D., SUBEDI, A. y LEE, D. H. (2019): “Evaluation of machine learning algorithms for surface water extraction in a Landsat 8 scene of Nepal”, *Sensors*, vol. 19, nº 12, artículo 2769. <https://doi.org/10.3390/s19122769>

- ADELI, S., SALEHI, B., MAHDIANPARI, M., QUACKENBUSH, L. J., BRISCO, B., TAMIMINIA, H. y SHAW, S. (2020): “Wetland monitoring using SAR data: A meta-analysis and comprehensive review”, *Remote Sensing*, vol. 12, nº 14, artículo 2190. <https://doi.org/10.3390/rs12142190>
- ANAYA, J. A., SIONE, W. y RODRÍGUEZ-MONTELLANO, A. (2018): “Burned area detection based on time-series analysis in a cloud computing environment”, *Revista de Teledetección*, nº 51, pp. 61–73. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.8618>
- CHE, L., LI, S. y LIU, X. (2025): “Improved surface water mapping using satellite remote sensing imagery based on optimization of the Otsu threshold and effective selection of remote-sensing water index”, *Journal of Hydrology*, vol. 654, artículo 132771. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.132771>
- CHENG, G., XIE, X., HAN, J., GUO, L. y XIA, G.-S. (2020): “Remote sensing image scene classification meets deep learning: Challenges, methods, benchmarks, and opportunities”, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 13, pp. 3735–3756. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3005403>
- CHEN, Z. H., WU, Q., WANG, L. y LIU, S. (2022): “Automatic monitoring of surface water dynamics using Sentinel-1 and Sentinel-2 data with Google Earth Engine”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 112, artículo 102919. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102919>
- CONTRERAS, F. I. (2015): “El impacto ambiental del crecimiento espacial de la ciudad de Corrientes sobre lagunas periurbanas”, *Boletín Geográfico*, nº 37, pp. 29–42. <https://doi.org/10.1002/joc.5079>
- CONTRERAS, F. I. (2019): “Las lagunas y sus dinámicas geomorfológicas en la transformación de los paisajes de lomadas arenosas de la provincia de Corrientes (Argentina)”, *Huellas*, vol. 23, nº 1, pp. 117–121. <https://cerac.unlpam.edu.ar/index.php/huellas/article/view/3586>
- CONTRERAS, F. I. y CONTRERAS, S. A. (2017): “La Incidencia de la Pendiente en la Distribución de las Morfologías de las Lagunas sobre Lomadas Arenosas (Corrientes, Argentina)”, *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, vol. 40, nº 1, pp. 15–25. http://dx.doi.org/10.11137/2017_1_15_25
- CONTRERAS, F. I. y CONTRERAS, S. A. (2018): “Contribución al conocimiento sobre origen de las lagunas de la región de lomadas arenosas del mega abanico aluvial del río Paraná”, *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 41, nº 1, pp. 66–79. http://dx.doi.org/10.11137/2018_1_66_79
- CONTRERAS, F. I. y DUVAL, V. S. (2021): “Dinámica morfométrica de las lagunas de los valles transversales de la provincia de La Pampa como respuesta a eventos extremos de inundación y sequía”, *Boletín Geográfico*, vol. 43, nº 1, pp. 13–31. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8031029>
- CONTRERAS, F. I. y FANTÍN, M. A. (2015): “El riesgo de la población a inundaciones por lluvias como consecuencia de la dinámica de expansión urbana sobre paisajes anegadizos. El caso de la ciudad de Corrientes (Argentina)”, *Folia Histórica del Nordeste*, nº 23, pp. 97–112. <https://doi.org/10.30972/fhn.02336>
- CONTRERAS, F. I. y PAIRA, A. R. (2016): “Aplicación del ‘índice de cambio’ a las variaciones morfométricas de las lagunas de lomadas arenosas. El caso de Bella Vista (Corrientes, Argentina)”, *Revista de Geografía*, vol. 21, pp. 31–38. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/102247>
- CONTRERAS, F. I. y PARUZZO, Y. A. (2020): “Validation of SRTM 3 Arc/seg images in the generation of flood threats cartography: Case of San Luis del Palmar, Corrientes, Argentina”, *Revista Geográfica Venezolana*, vol. 61, nº 2, pp. 302–313. <http://hdl.handle.net/11336/163690>
- CONTRERAS, F. I., FERRELLI, F. y PICCOLO, M. C. (2020): “Impactos de eventos secos y lluviosos sobre cuerpos de agua periurbanos subtropicales: Aporte al ordenamiento del espacio urbano de Corrientes (Argentina)”, *Finisterra*, vol. 55, nº 114, pp. 3–22. <https://doi.org/10.18055/Finis19436>
- CHEN, B., XIAO, X., LI, X., PAN, L., DOUGHTY, R., MA, J., DONG, J., QIN, Y., ZHAO, B., WU, Z., SUN, R., LAN, G., XIE, G., CLINTON, N. y GIRI, C. (2017): “A mangrove forest

- map of China in 2015: Analysis of time series Landsat 7/8 and Sentinel-1A imagery in Google Earth Engine cloud computing platform”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 131, pp. 104–120. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.07.011>
- EVANS, T. L., COSTA, M., TELMER, K. y SILVA, T. S. F. (2010): “Using ALOS/PALSAR and RADARSAT-2 to map land cover and seasonal inundation in the Brazilian Pantanal”, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 3, nº 4, pp. 560–575. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2010.2089042>
- FERRELLI, F. y ALIAGA, V. S. (2015): “Variabilidad de las precipitaciones y sus efectos sobre la respuesta espacio-temporal de cuerpos de agua en la Región Pampeana, Argentina”, Tesis doctoral, Universidad Nacional de Luján.
- FEYISA, G. L., MEILBY, H., FENSHOLT, R. y PROUD, S. R. (2014): “Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 140, pp. 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
- GAO, B. C. (1996): “NDWI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 58, nº 3, pp. 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- GAUTAM, I. M. (2023): “We need to talk about water”, *Nature*, vol. 622, nº 7984, p. 435. <https://doi.org/10.1038/d41586-023-03676-0>
- GERTEN, D. y ADRIAN, R. (2001): “Differences in the persistency of the North Atlantic Oscillation signal among lakes”, *Limnology and Oceanography*, vol. 46, nº 2, pp. 448–455. <https://doi.org/10.4319/lo.2001.46.2.00448>
- GOOGLE EARTH ENGINE (2020): “Reducer Overview”. Recuperado de: https://developers.google.com/earth-engine/guides/reducers_intro [Consulta: 10 de marzo de 2020].
- GORELICK, N., HANCHER, M., DIXON, M., ILYUSHCHENKO, S., THAU, D. y MOORE, R. (2017): “Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 202, pp. 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- HERBST, R. y SANTA CRUZ, J. N. (1999): “Mapa Litoestratigráfico de la Provincia de Corrientes”, *D'Orbignyana*, nº 2, pp. 1–69. <https://revistas.unne.edu.ar/index.php/dor/article/view/7122>
- HESS, L. L., MELACK, J. M., NOVO, E. M. L. M., BARBOSA, C. C. F. y GASTIL, M. (2003): “Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 87, nº 4, pp. 404–428. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.04.001>
- IRIONDO, M. H. (2010): *Geología del Cuaternario en Argentina*. Museo Provincial de Ciencias Naturales Florentino Ameghino, Santa Fe, Argentina, 437 pp.
- KHALID, H. W., KHALIL, R. M. Z. y QURESHI, M. A. (2021): “Evaluating spectral indices for water bodies extraction in western Tibetan Plateau”, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, vol. 24, nº 3 (Parte 2), pp. 619–634. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.09.003>
- KLEIN, I., GEISSNER, U. y KUENZER, C. (2015): “Regional surface water dynamics and driving climatic and anthropogenic factors in Southern Mongolia – A multi-scale analysis”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 164, pp. 15–31. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.03.014>
- LI, J. J., ZHAO, F., WANG, Y., LIU, Y. y ZHANG, Y. (2023): “A robust large-scale surface water mapping framework with high spatiotemporal resolution based on the fusion of multi-source remote sensing data”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 120, artículo 103313. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103313>
- LI, K., WANG, J. y YAO, J. (2021): “Effectiveness of machine learning methods for water segmentation with ROI as the label: A case study of the Tuul River in Mongolia”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 103, artículo 102497. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102497>
- LISS, B., HOWLAND, M. D. y LEVY, T. E. (2017): “Testing Google Earth Engine for the automatic identification and vectorization of archaeological features: A case study from

- Faynan, Jordan”, *Journal of Archaeological Science: Reports*, vol. 15, pp. 299–304. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.08.013>
- LOGROÑO-NARANJO, S. I., LÓPEZ-PAREDES, C. R., MOYANO-JÁCOME, M. G. y OYAGUE-BAJAÑA, E. S. (2020): “El alcance de la teledetección satelital utilizando modelos estadísticos y físicos y sus beneficios en áreas contables”, *Dominio de las Ciencias*, vol. 6, nº 2, pp. 25–40. <https://doi.org/10.23857/dc.v6i2.1142>
- MAESTRI, M. L., CASTETS, F., BAYALA, M. y CANZIANI, G. (2019): “Análisis comparativo de cinco métodos de procesamiento para calcular el área de lagunas pampeanas a partir de imágenes satelitales Landsat”, *Biología Acuática*, nº 33, artículo 003. <https://doi.org/10.24215/16684869e003>
- MARTÍNEZ, S. E., BARUZZO, M. N., SMICHOWSKI, H., FORASTIER, M. E. y CONTRERAS, F. I. (2021): “El efecto de las precipitaciones en las características limnológicas en lagunas periurbanas (Bella Vista, Corrientes, año 2019)”, *Revista Senderos*, vol. 2, nº 1, pp. 122–135. <https://revistas.unf.edu.ar/index.php/senderos/article/view/50>
- MAYER, T., POORTINGA, A., BHANDARI, B., NICOLAU, A. P., MARKERT, K., THWAL, N. S., MARKERT, A., HAAG, A., KILBRIDE, J., CHISHTIE, F., WADHWA, A., CLINTON, N. y SAAH, D. (2021): “Deep learning approach for Sentinel-1 surface water mapping leveraging Google Earth Engine”, *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 2, artículo 100005. <https://doi.org/10.1016/j.phot.2021.100005>
- McFEETERS, S. K. (1996): “The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features”, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 17, nº 7, pp. 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- MOOIJ, W. M., HULSMAN, S., DE SERERPONT DOMIS, L. N., NOLET, B. A., BODELIER, P. L. E., BOERS, P. C. M., PIRES, M. L. D., GONS, H. J., IBELINGS, B. W., NOORDHUIS, R., PORTIELJE, R., WOLFSTEIN, K. y LAMMENS, E. H. R. R. (2005): “The impact of climate change on lakes in the Netherlands: A review”, *Aquatic Ecology*, vol. 39, nº 4, pp. 381–400. <https://doi.org/10.1007/s10452-005-9008-0>
- NAGARAJ, R. y KUMAR, L. S. (2024): “Extraction of surface water bodies using optical remote sensing images: A review”, *Earth Science Informatics*, vol. 17, pp. 893–956. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01196-0>
- NEIFF, P. J. J. (1982): “Esquema sucesional de la vegetación en islas”, *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, vol. 21, nº 1–4, pp. 325–341. <https://botanicaargentina.org.ar/wp-content/uploads/2018/09/325-341019.pdf>
- PACELLA, L. F. y DI PASQUO, M. (2020): “Aportes al conocimiento de los embalsados holocenos de Corrientes, Argentina”, *Revista Brasileira de Paleontología*, vol. 23, nº 1, pp. 63–72. <http://hdl.handle.net/11336/148452>
- PEKEL, J. F., COTTAM, A., GORELICK, N. y BELWARD, A. S. (2016): “High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes”, *Nature*, vol. 540, nº 7633, pp. 418–422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
- ROSENQVIST, A., FINLAYSON, C. M., LOWRY, J. y TAYLOR, D. (2007): “The potential of long-wavelength satellite-borne radar to support implementation of the Ramsar Wetlands Convention”, *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, vol. 17, nº 3, pp. 229–244. <https://doi.org/10.1002/aqc.835>
- SAUCEDO, G. I., CONTRERAS, F. I. y KURTZ, D. (2021): “Comparación de superficies cubiertas por agua en el río Paraná en diferentes períodos hidrológicos”, *Investigaciones y Ensayos Geográficos*, vol. 18, nº 1, pp. 74–88.
- SERRA, P. (2001): Características geomorfológicas e hidrográficas de la provincia de Corrientes y su incidencia en asentamientos humanos, Tesis doctoral, Universidad del Salvador. <https://racimo.usal.edu.ar/4243/>
- SHENG, Y. W., YANG, J. y CUI, Y. (2016): “Representative lake water extent mapping at continental scales using multi-temporal Landsat-8 imagery”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 185, pp. 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.071>
- SMICHOWSKI, H., CONTRERAS, F. I. y GIESE, A. C. (2022): “Seguimiento de la extensión real de los humedales subtropicales del noreste de Argentina mediante la aplicación de Google

- Earth Engine”, *Investigaciones Geográficas*, nº 78, pp. 131–152. <https://doi.org/10.14198/INGEO.21343>
- TUR, N. M. (1972): “Embalsados y camalotales de la región isleña del Paraná Medio”, *Darwiniana*, pp. 397–407. <https://www.jstor.org/stable/23215053>
- VICENTE-SERRANO, S. M., BEGUERÍA, S., LORENZO-LACRUZ, J., CAMARERO, J. J., LÓPEZ-MORENO, J. I., AZORÍN-MOLINA, C., REVUELTO, J., MORÁN-TEJEDA, E. y SÁNCHEZ-LORENZO, A. (2012): “Análisis comparativo de diferentes índices de sequía para aplicaciones ecológicas, agrícolas e hidrológicas”, *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología*, Serie A, nº 8. <http://hdl.handle.net/10261/62168>
- VILLA, P., MOUSIVAND, A. y BRESCIANI, M. (2014): “Aquatic vegetation indices assessment through radiative transfer modeling and linear mixture simulation”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 30, pp. 113–127. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.01.017>
- WANG, S., FENG, M., OUYANG, Z., HAO, F. y ZHANG, C. (2015): “A simple enhanced water index (EWI) for percent surface water estimation using Landsat data”, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 8, nº 1, pp. 90–97. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2387196>
- WANG, Z., GAO, X., ZHANG, Y. y ZHAO, G. (2020): “MSLWENet: A novel deep learning network for lake water body extraction of Google remote sensing images”, *Remote Sensing*, vol. 12, nº 24, artículo 4140. <https://doi.org/10.3390/rs12244140>
- WOOLWAY, R. I., MEINSON, P., NÔGES, P., JONES, I. D. y LAAS, A. (2017): “Atmospheric stilling leads to prolonged thermal stratification in a large shallow polymictic lake”, *Climatic Change*, vol. 141, pp. 759–773. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1909-0>
- XING, L., TANG, X., WANG, H., FAN, W. y WANG, G. (2018): “Monitoring monthly surface water dynamics of Dongting Lake using Sentinel-1 data at 10 m”, *PeerJ*, vol. 6, e4992. <https://doi.org/10.7717/peerj.4992>
- XU, H. (2006): “Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery”, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, nº 14, pp. 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- YANG, X. C., XIE, Z. y ZHAN, W. (2020): “Monthly estimation of the surface water extent in France at a 10-m resolution using Sentinel-2 data”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 248, artículo 111985. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111985>