

**Cita bibliográfica:** Smichowski, H., Contreras, F. I., & Giese, A. C. (2022). Seguimiento de la extensión areal de los humedales subtropicales del noreste de Argentina mediante la aplicación de Google Earth Engine. *Investigaciones Geográficas*, (78), 131-152. <https://doi.org/10.14198/INGEO.21343>

# Seguimiento de la extensión areal de los humedales subtropicales del noreste de Argentina mediante la aplicación de Google Earth Engine

*Monitoring the surface area of the subtropical wetlands of northeastern Argentina using the Google Earth Engine*

Humberto Smichowski<sup>1\*</sup> 

Felix Ignacio Contreras<sup>2</sup> 

Adriana Carolina Giese<sup>3</sup> 

## Resumen

El estudio sobre las fluctuaciones de los niveles de agua en los humedales como respuestas a la variabilidad pluviométrica, es el punto de partida si se pretende lograr su conservación y/o uso sustentable como recurso. En este sentido, utilizando Google Earth Engine, en este trabajo se realiza como estudio de caso un seguimiento de la variación espacio-temporal de la superficie de los humedales subtropicales en el noreste de Argentina desde 1990 hasta el 2020 en periodos quinquenales. Para ello, fueron procesadas 931 escenas de Landsat sobre las cuales se generaron máscaras de nubes, compuestos de calidad basados en índices de agua y se extrajeron las cubiertas de agua con técnicas de umbrales. Para el análisis climático, se correlacionaron datos pluviométricos directos, índices de precipitaciones y los efectos del El Niño-Oscilación del Sur. Los resultados indican con alta precisión que existe una gran diferencia entre momentos húmedos y secos, con máximos que superan el 60 % del área cubierta con agua y mínimos menores al 5 %. Se comprobó la relación directa entre los montos pluviométricos y las extensiones de agua en superficie y la elasticidad del sistema. Los resultados obtenidos se consideran muy valiosos para la gestión integral de los recursos hídricos y del riesgo.

**Palabras clave:** Humedales subtropicales; Google Earth Engine; Variabilidad pluviométrica; Corrientes.

## Abstract

The study of water level fluctuations in wetlands in response to rainfall variability represents a starting point for their conservation and/or use as a sustainable resource. In this respect, by using Google Earth Engine, this contribution constitutes a case study of the spatio-temporal variation of the surface area of the subtropical wetlands in northeastern Argentina from 1990 to 2020 in five-year periods. For this purpose, we processed 931 Landsat scenes, generating cloud masks, and quality composites based on water indices, and extracted water covers using thresholding techniques. For climate analysis, we correlated direct pluviometric data, precipitation indices and the effects of the El Niño-Southern Oscillation. The results obtained accurately indicate a large difference between wet and dry times, with maximums exceeding 60% of the area covered with water and minimums of less than 5%. The findings also show that there is a direct relationship between rainfall amounts and surface water expanses and the system's elasticity. The results are considered to be highly valuable for integrated water resources and risk management.

**Keywords:** Subtropical wetlands; Google Earth Engine; Rainfall variability; Corrientes.

1 Centro de Ecología Aplicada del Litoral (CONICET – UNNE), Argentina. [cepismichowski@gmail.com](mailto:cepismichowski@gmail.com). \* Autor para correspondencia  
2 Centro de Ecología Aplicada del Litoral (CONICET – UNNE), Argentina. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura – Universidad Nacional del Nordeste, Argentina. [figcontreras@hotmail.com](mailto:figcontreras@hotmail.com)  
3 Centro de Ecología Aplicada del Litoral (CONICET - UNNE), Argentina. [carolina.giese@gmail.com](mailto:carolina.giese@gmail.com)

## 1. Introducción

Monitorear la distribución del agua superficial en varios entornos es esencial para la gestión integral de los recursos hídricos y para respaldar el diseño de políticas asociadas, que resultan fundamentales en la promoción del bienestar ambiental natural contribuyendo al desarrollo humano mediante un uso sostenible del recurso (Xia et al., 2019; Wen et al., 2021). La comprensión de la dinámica del agua constituye una herramienta que permite minimizar los riesgos ambientales (como las inundaciones), o bien reducir al mínimo los impactos ambientales generados por las actividades humanas (Contreras & Paira 2017; Li et al., 2021). El agua superficial posee un rol significativo en la regulación de las condiciones atmosféricas, el ciclo biogeoquímico, el balance energético de la superficie, el mantenimiento de los ecosistemas, entre otros (Wang et al., 2018).

Con el desarrollo de diferentes índices de agua, como el Índice de diferencia de agua normalizado (NDWI) y el Índice de diferencia de agua normalizado modificado (mNDWI), la identificación de esta cobertura se volvió más eficiente. En este sentido, se han utilizado variedad de sensores remotos para estimar el área de inundación y determinar las extensiones areales de las coberturas con agua (Wang et al., 2018). En la actualidad, se pueden citar numerosos estudios donde se aplica teledetección con estos fines (Wang et al., 2018; Che et al., 2019; Xia et al., 2019; Wen et al., 2021; Li et al., 2021; Bi et al., 2020; Sisay, 2016; Clement et al., 2018; Uddin et al., 2019; DeVries et al., 2020).

El avance de las tecnologías espaciales ha ayudado a adquirir información valiosa al proporcionar grandes cantidades de imágenes que cubren la superficie de la Tierra durante un período de 40 años. Sin embargo, tradicionalmente, la adquisición y el almacenamiento de datos y la multitud de marcos de procesamiento geoespaciales, son obstáculos importantes para aprovechar al máximo estas imágenes, especialmente en aplicaciones a gran escala y a largo plazo (Bi et al., 2020). Google Earth Engine (GEE) surge como una alternativa para eliminar la limitante computacional de algunos usuarios en analizar gran cantidad de datos producidos durante todos los años de sensoramiento remoto (Perilla & Mas, 2020). La plataforma de procesamiento y desarrollo GEE posibilita el acceso a petabytes de imágenes satelitales y conjuntos de datos espaciales en la nube, para su análisis a escala planetaria (Xia et al., 2019). Además, se encuentra vinculada directamente a varios programas satelitales (Landsat, Sentinel, MODIS, etc.) que permiten integrar en las bases de datos las imágenes que acaban de ser tomadas, transformándose en una solución innovadora para afrontar problemas globales, dando resultados con celeridad (Gorelick et al., 2017)

Gracias al desarrollo de la plataforma GEE, se elaboraron mapas globales de extensión de agua en superficie (Pekel et al., 2016). Sin embargo, el método automático para una escala global, no asegura su veracidad a una escala regional. La diversidad de características locales puede generar inconsistencias en la precisión de los resultados. Por otra parte, no es frecuente encontrar investigaciones relacionadas con la dinámica de las aguas superficiales regionales y los análisis de los factores que las originan (Wang et al., 2018).

El continente sudamericano tiene un vínculo muy estrecho con los humedales, ya sea desde una perspectiva ecológica y/o socio-económica (Neiff, 2021). Según Neiff (2021) la mayor cantidad de agua superficial de Sudamérica se produce en clima tropical y subtropical, la cual tienen un origen pluvial. Es por ello que surge la necesidad de realizar un seguimiento de las respuestas de estos humedales a la variabilidad pluviométrica, y en este marco, la provincia de Corrientes ubicada al noreste de la República Argentina, se encuentra influenciada por el paso del río Paraná y su mega abanico aluvial, el cual define las características geomorfológicas de la región. Las reducidas pendientes y las dificultades para el drenado de las aguas pluviométricas hacen que toda el área sea anegadiza, con esteros y cañadas, y lentos escurrimientos, como principales rasgos distintivos (Herbst & Santa Cruz, 1999; Iriondo, 2011). El paisaje de la región es muy sensible ante variaciones en las cantidades precipitadas, generando riesgos de inundaciones y limitando el desarrollo de actividades productivas (Contreras et al., 2020; Aliaga & Piccolo, 2021). Por lo tanto, realizar un análisis de variabilidad pluviométrica resulta esencial para comprender la dinámica del agua superficial en la zona.

El objetivo del trabajo fue analizar la extensión areal del agua superficial en humedales pluviales subtropicales relacionados a mega abanicos fluviales, desde 1990 hasta la actualidad, utilizando imágenes de la constelación Landsat trabajadas sobre la plataforma Google Earth Engine y aplicando Sistemas de Información Geográfica. En este sentido, el área de estudio propuesta se ubica al noroeste de la provincia de Corrientes (Argentina), que se encuentra por completo dentro del mega abanico fluvial del río Paraná. Se pretende establecer las extensiones máximas y mínimas de agua en superficie para períodos de 5 años, en relación con la variabilidad pluviométrica de la región. Con los resultados de este trabajo se busca contribuir con el conocimiento acerca de las dinámicas naturales de los humedales frente a la variabilidad

pluviométrica regional y con ello generar herramientas para la conservación de estos ambientes; como también en mitigar los impactos socioambientales resultantes de dicha interacción.

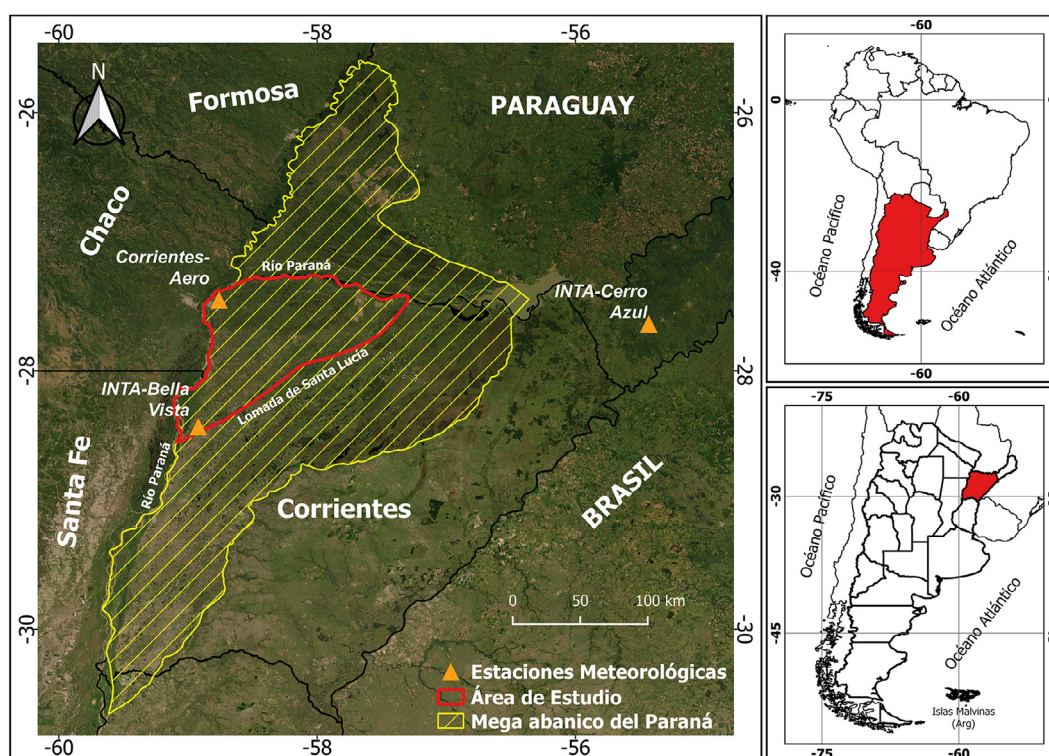
## 2. Metodología

La metodología fue planificada para distinguir zonas con agua en superficie con la mayor precisión posible. En primer lugar, se procesaron las imágenes satelitales en GEE. Luego, combinando procesamientos en Sistemas de Información Geográfica con el tratamiento de imágenes satelitales, fueron obtenidos los umbrales óptimos y construidas las máscaras de agua para cada período. Por último, se calcularon las áreas con extensión mínima y máxima de agua y se generaron las salidas gráficas. El análisis climático se realizó combinando datos pluviométricos directos medidos por estaciones meteorológicas, datos obtenidos del Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI), e información del Niño y la Niña adquirida de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA, 2021).

### 2.1. Área de estudio

El área de estudio comprende al triángulo noroccidental de la provincia de Corrientes (Argentina), limitada al norte y al oeste por el río Paraná y por las lomadas de Santa Lucía en todo el sudeste (Figura 1). Posee una superficie total de 12.110 km<sup>2</sup> y se encuentra emplazada sobre el mega abanico fluvial del río Paraná, que define sus principales características fisiográficas.

Figura 1. Área de Estudio



Elaboración propia

El río Paraná ingresa a la planicie mesopotámica generando un gran abanico fluvial que se extiende 260 km de E a W y 500 km de N a S, ocupando el sur de Paraguay y el noroeste de la provincia de Corrientes (Iriondo, 2010). Durante el Cuaternario Superior, el Paraná fue creando cursos relativamente estables que finalmente fueron abandonados por la corriente principal y sustituidos por grandes áreas anegadizas localmente conocidas como esteros y por cursos autóctonos como San Lorenzo, Empedrado, Sombrero y Riachuelo (Contreras & Contreras, 2017). En este escenario, las áreas elevadas están representadas por las lomadas arenosas, que son antiguas llanuras aluviales de los cauces abandonados del río Paraná, elevadas unos 10 metros por encima de las planicies circundantes, delimitando las áreas de escurrimiento. (Contreras & Contreras, 2017).

En esta región, en las áreas interfluviales, cuyos paisajes no corresponden al de las lomadas arenosas, el drenaje superficial es muy pobre y el agua precipitada discurre de forma muy lenta, manteniéndose en el ambiente durante varios días luego de eventos de precipitaciones importantes (Iriondo, 2011). El servicio ecosistémico que ofrecen estos humedales se vincularía con la retención del agua meteórica y la amortiguación de la misma en eventos extremos de inundación, atenuando los picos de los hidrogramas y, en consecuencia, retardando la salida del agua del sistema (Popolizio, 1981).

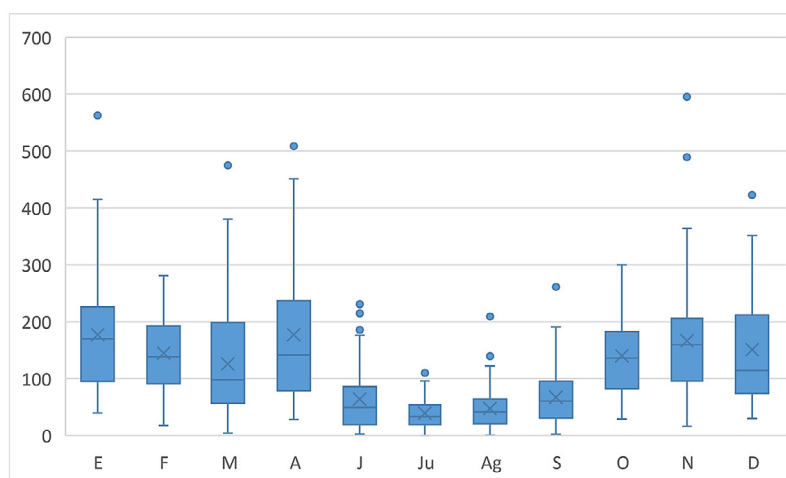
Las cuencas exhiben en general tres sectores, de los cuales solo el final representa un curso fluvial encauzado. Los sectores medio y superior tienen gran dificultad de avenimiento y están sometidos a inundaciones estacionales, permitiendo únicamente actividades ganaderas y cultivo de arroz (Herbst & Santa Cruz, 1999).

Uno de los rasgos distintivos del paisaje de lomadas arenosas es la gran cantidad de lagunas, descritas como pequeñas lagunas circulares (Contreras & Contreras, 2017). No obstante, estos cuerpos de agua someros cobran importancia, ya que, al responder rápidamente a la variación climática local, actúan como centinelas que permiten detectar cambios vinculados a eventos meteorológicos (Martínez et al., 2021). En este sentido el 24 % de las lagunas se seca por completo en años de sequías extremas. Esto permite dar cuenta de la limitada capacidad de amortiguación hídrica que poseen y permite explicar la razón por la que en períodos húmedos o luego de lluvias intensas, grandes extensiones de tierra, que se encuentran próximas a ellas, quedan anegadas o inundadas (Contreras & Paira, 2017).

Al constituir la parte positiva del relieve, las lomadas arenosas adquieren gran importancia para la sociedad. Todas las actividades vinculadas al desarrollo humano, como el crecimiento espacial de las ciudades y las actividades agrícolas y forestales, generan una fuerte demanda por este paisaje debido a su desarrollo espacial y la necesidad de ocupar áreas con buen drenaje. No obstante, pese a tratarse de un ambiente sobre elevado, estas lomadas arenosas poseen una densidad lacustre del 20 % (Contreras & Contreras, 2017; Contreras et al., 2020), motivo por el cual los riesgos asociados al anegamiento o inundación no quedarían excluidos en las mismas.

Si bien la temperatura media anual es de 21° C, las temperaturas máximas pueden superar los 40° C desde finales de septiembre hasta mediados de marzo. Se registran 1.400 mm de precipitaciones anuales en promedio (Contreras et al., 2020) y presentan grandes contrastes en su distribución a lo largo del año, siendo mínimas en invierno; es decir que posee un clima subtropical con estación seca (Figura 2). Sin embargo, es en este período donde hay un mayor número de registros atípicos mensuales. Durante los meses de más cálidos a partir de mediados de la primavera a mediados del otoño, de noviembre a abril, las precipitaciones mensuales pueden superar los 400 mm, produciéndose una cuarta parte del total de los montos anuales observados, fundamentalmente, por las lluvias de tipo ciclónicas y de inestabilidad local (tipo conectivas) por recalentamiento de la superficie (Contreras et al., 2020). Esto, sumado a las escasas pendientes regionales, hace que el ambiente sea extremadamente anegadizo, convirtiéndose en un factor limitante para los asentamientos humanos y el desarrollo de actividades productivas como la agricultura y la forestación de bosques implantados.

Figura 2. Variabilidad de las precipitaciones medias mensuales (mm), con datos de mediana incluida y registros atípicos de la ciudad de Corrientes (Argentina). Período 1962-2021



Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Elaboración propia

## 2.2. Preparación de las imágenes

La distribución del agua superficial puede variar con frecuencia anual, estacional o mensualmente. Para adquirir más información sobre su extensión, se utilizó una serie temporal extensa de imágenes Landsat del área de estudio. Las mismas tienen una resolución espacial de 30 m<sup>2</sup>, por lo que se las consideró adecuadas para monitorear las cubiertas terrestres regionales (Wang et al., 2018).

La cobertura completa del área de estudio se logra con mosaicos de 6 Path/Rows (227/79, 227/80, 226/79, 226/80, 225/79, 225/80). En este estudio, se adquirieron imágenes ortorrectificadas con corrección de reflectancia a nivel de superficie y calibradas por Landsat del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) para los años 1990 hasta 2020, disponibles en GEE como colecciones de imágenes. GEE cuenta con una amplia base de datos de información espacial que incluye los catálogos completos de Landsat, Sentinel, MODIS, entre otros, ofreciendo a los usuarios la capacidad de trabajar con serie de imágenes en simultáneo a través de modelos de Python y JavaScript, lo que facilita el procesamiento de grandes volúmenes de datos (Gorelick et al., 2017; Liss et al., 2017; Anaya et al., 2018).

El total de 931 imágenes seleccionadas se ha logrado a partir del filtrado de la colección completa de Landsat disponible para el período, teniendo en cuenta un bajo porcentaje nubosidad. A aquellas imágenes que aun presentaban cobertura nubosa significativa, se les realizaron máscaras utilizando la función interna *SimpleCloudScore* implementada en GEE, que elimina píxeles con diferente valor de nubosidad determinado por el usuario (GEE, 2021a).

En la Tabla 1, se proporcionó información sobre las imágenes Landsat *Thematic Mapper (TM)*, *Enhanced Thematic Mapper (ETM+)* y *Operational Land Imager (OLI)* utilizadas en este estudio para cada período.

Tabla 1. Cantidad de imágenes seleccionadas por intervalos de cinco años.

Período	Satélite	Recuento de Imágenes
1990-1995	Landsat 5 TM	97
1995-2000	Landsat 5 TM	121
2000-2005	Landsat 5 TM	129
2005-2010	Landsat 5 TM	134
2010-2015	Landsat 7 ETM+	213
2015-2020	Landsat 8 OLI	237

Elaboración propia

## 2.3. Máscaras de agua

Dado que existe una gran variación en el agua superficial dentro de un año dado, para obtener información sobre la misma, se calcularon sus extensiones mínimas y máximas para cada período. En este estudio el agua superficial mínima significa agua superficial permanente y el agua superficial máxima significa toda el agua superficial estacional.

Para la identificación de superficies cubiertas con agua, se utilizaron índices espectrales por sobre clasificaciones de imágenes ya que en general, su utilización resulta más eficaz (Dornes et al., 2016; Sisay, 2016; Brendel et al., 2019). En este sentido, se calcularon los índices, Normalized Difference Water Index (NDWI) (Gao, 1996), Modified Normalized Difference Water Index (mNDWI) (Xu, 2006), Automated Water Extraction Index (AWEI) (Feyisa et al., 2014). Para obtener la extensión mínima de agua (agua permanente) se utilizó el índice Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Richardson & Wiegand, 1977):

$$\begin{aligned} \text{NDWI} &= (\text{NIR}-\text{SWIR}) / (\text{NIR}+\text{SWIR}) \\ \text{NDWI} &= (\text{GREEN}-\text{SWIR}) / (\text{GREEN}+\text{SWIR}) \\ \text{AWEI} &= 4 * (\text{GREEN}-\text{MIR}) - (0,25 * \text{NIR} + 2,75 * \text{SWIR}) \\ \text{NDVI} &= (\text{NIR}-\text{RED}) / (\text{NIR}+\text{RED}) \end{aligned}$$

Los índices fueron calculados para cada imagen de la colección y añadidos como bandas espectrales a través de la función. `map()` (Smichowski et al., 2021), cuyos umbrales se detallan en el próximo apartado.

El método *QualityMosaic* introducido en GEE construye un compuesto en el que cada pixel es tomado en función de la imagen de la colección que contenga el valor máximo para la banda especificada (GEE, 2021b). Con las bandas NDWI, mNDWI y AWEI se crearon imágenes de mosaico de calidad que se componen de los píxeles “más húmedos”, mientras que la banda NDVI se usó para crear un mosaico compuesto de los píxeles “más verdes” (Wang et al., 2018). La imagen más húmeda representa la máxima agua superficial posible en los períodos estudiados y la imagen más verde muestra la mayor extensión de vegetación observada en los períodos estudiados con una extensión mínima de agua superficial. No obstante, se corroboraron los resultados para evitar errores de clasificación debido a la presencia de afloramientos algales o por la presencia de macrófitas flotantes, localmente conocidos como embalsados. Se generaron cuatro mosaicos por período, uno por cada índice espectral calculado, dando un total de 24 mosaicos, los cuales fueron exportados para su posterior tratamiento con sistemas de información geográfica.

#### 2.4. Sistemas de Información Geográfica

A fin de establecer un límite para diferenciar de manera precisa los píxeles “con y sin agua”, se utilizaron técnicas de umbrales sobre los compuestos generados en GEE (Arellano et al., 2017; Anaya et al., 2018; Feng et al., 2016; Li et al., 2021). Para ello, se realizaron múltiples clasificaciones con valores en incrementos de 0,05 (0,1; 0,15; 0,2...; n). Esto permitió definir los umbrales más groseros, para luego disminuir el valor de incremento a 0,05, con el fin de aumentar la precisión del ajuste. Cada nuevo valor asignado como umbral, definió un nuevo mapa de “agua y no agua” y se calcularon los errores de comisión y omisión, estableciendo el umbral como el valor mínimo de la suma de los errores (Smichowski et al., 2021). Los umbrales de clasificación para detectar superficie con agua quedaron definidos de la siguiente manera: mNDWI > 0; NDWI > 0,35; AWEI > 0,1.

Los mapas fueron contrastados con información de referencia como un modelo digital de elevación, imágenes de alta resolución y mapas globales de agua en superficie (Pekel et al., 2016) corroborando su validez. También se realizaron correcciones ópticas sobre áreas con conocimiento de campo y se estimaron la precisión y los errores. Por último, se realizaron mosaicos entre las máscaras calculadas sobre NDWI, mNDWI y AWEI, para obtener un único mapa de cobertura de sobre el cual calcular las superficies máxima y mínima para la región.

#### 2.5. Análisis climático

Los datos de mediciones directas de precipitaciones fueron obtenidos de la estación meteorológica de Corrientes (Corrientes Aero), cuya serie de tiempo está comprendida entre los años 1962 y 2021, y la estación del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) - Bella Vista. También se utilizó la información de la estación del INTA - Cerro Azul (Misiones) que, si bien se encuentra fuera del área de estudio, es la única estación con la serie completa de datos hacia el este. Se realizaron análisis de Anomalías de Precipitaciones (Gómez, 2019; Gil-Guirado & Pérez-Morales, 2019) con el fin de definir años húmedos y secos dentro de cada período y establecer tendencias.

La relación de las Anomalías de Precipitaciones, para cada año, con el *Oceanic Niño Index* (ONI) se evaluó mediante regresión lineal múltiple utilizando la estación meteorológica como variable categórica. Además, se avaluaron las relaciones de la superficie máxima de agua superficial con la precipitación acumulada por período y de la superficie mínima de agua superficial con la precipitación anual más baja durante el período, utilizando los datos de la estación meteorológica Corrientes Aero, mediante regresiones lineales. Los supuestos de las regresiones lineales se evaluaron mediante pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk, pruebas de homocedasticidad de Breusch-Pagan (Breusch & Pagan, 1979) y visualmente usando gráficos Q-Q y de residuos estandarizados *versus* valores ajustados. Todos los análisis se llevaron a cabo en el lenguaje estadístico R (R Core Team, 2021).

Los análisis fueron complementados con información del Índice de Evapotranspiración y Precipitación Estandarizada (SPEI por su sigla en inglés), el cual tiene en cuenta en su formulación tanto las precipitaciones como la evapotranspiración potencial en su formulación para expresar las relaciones de oferta y demanda de agua, a fin de comprender las influencias del cambio climático (Vicente-Serrano et al., 2012; Martínez et al., 2021). El conjunto de datos corresponde al punto de cuadrícula Lat. -28,25 y Long: -58,25, cuya resolución espacial es de 0,5 °, descargados del sitio web ([spei.csic.es](http://spei.csic.es)). Los valores normales del índice poseen un rango de -0,99 a 0,99 siendo los valores positivos los que indican eventos

de exceso mientras que los valores negativos muestran eventos de sequía. Estos valores pueden ser utilizados con distintas escalas temporales, siendo el SPEI 1 el que muestra un análisis mensual y el SPEI 12 del mes 12 para análisis anual (Contreras & Duval, 2021). A su vez, toda esta información fue asociada a la intensidad de los eventos Niño y Niña registrados dentro del período, con información adquirida del Oceanic Niño Index (NOAA, 2021). Se construyó una tabla que relaciona las variables utilizadas para el análisis climático (ONI, Anomalía de precipitaciones y SPEI 12) para cada uno de los 31 años de estudio.

Tabla 2. Interpretación de las Anomalías de Precipitaciones, SPEI y ONI

Anomalías de Precipitaciones		SPEI		ONI	
0-29	Muy por debajo de lo normal	>-2	Extremadamente seco	>-2	Niña muy Fuerte
30-59	Moderadamente por debajo de lo normal	-1,5 a -2	Severamente seco	-1,5 a -1,9	Niña Fuerte
60-89	Ligeramente por debajo de lo normal	-1 a -1,5	Moderadamente seco	-1 a -1,4	Niña Moderada
90-109	Normal	-0,1 a 0,1	Normal o aproximadamente normal	-0,5 a -0,9	Niña Leve
110-139	Ligeramente por encima de lo normal	1 a 1,5	Moderadamente húmedo	0,4 a -0,4	Normal
140-169	Moderadamente por encima de lo normal	1,5 a 2	Muy húmedo	0,5 a 0,9	Niño Leve
>170	Muy por encima de lo normal	>2	Extremadamente húmedo	1 a 1,4	Niño Moderado
				1,5 a 1,9	Niño Fuerte
				>2	Niño muy Fuerte

Fuente: Gómez, 2019; Martínez et al., 2021. Elaboración propia

### 3. Resultados

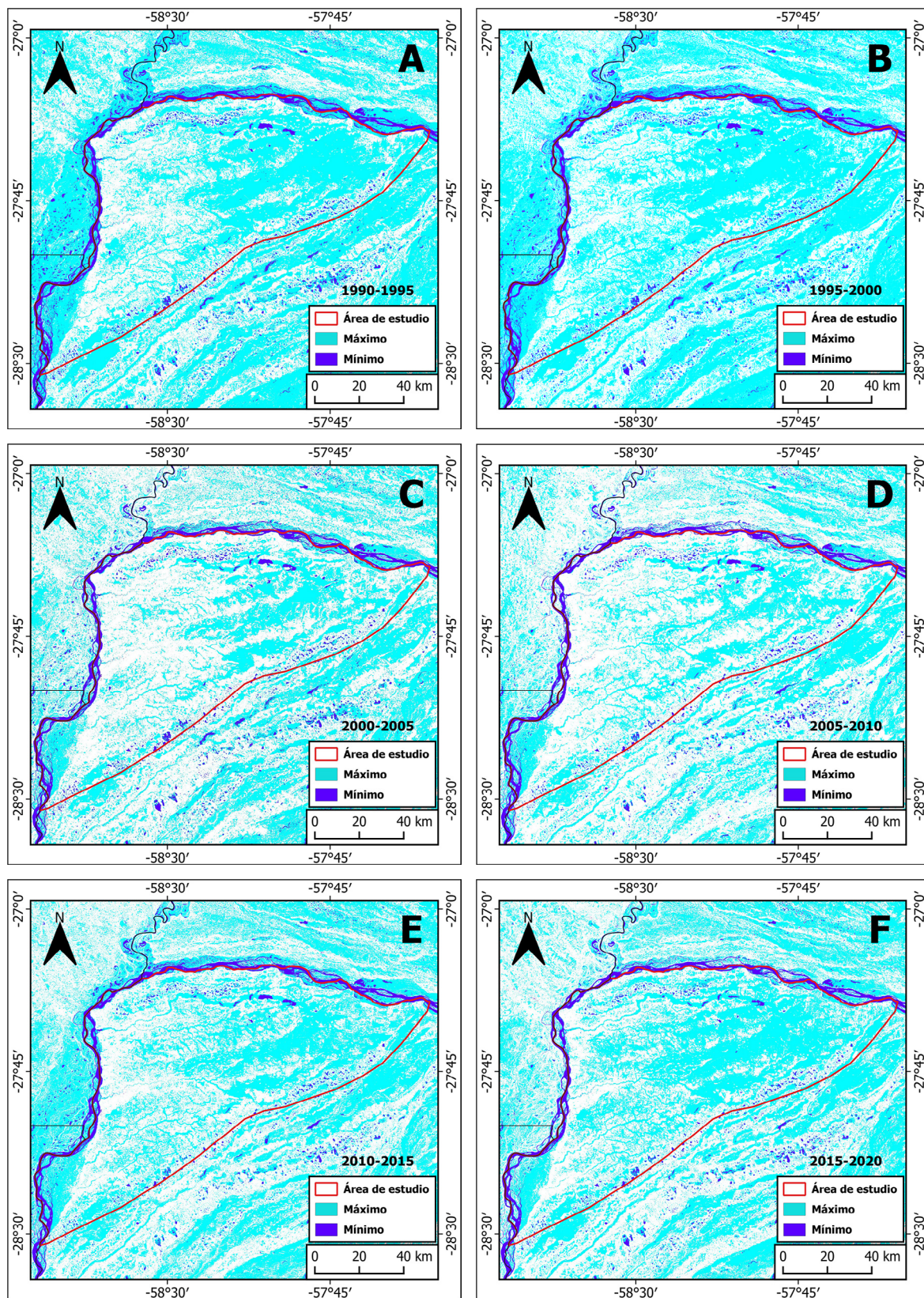
A continuación, se presentaron los mapas con las máscaras de agua mínima y máxima confeccionadas para los diferentes períodos trabajados (Figura 3), en los cuales se observan marcadas diferencias entre la porción oriental y occidental, preferentemente en períodos de sequía. Esta situación se explica por dos variables principalmente. La primera, asociada al gradiente pluviométrico donde en el extremo este del área de estudio precipitan anualmente 200 mm más. En segundo lugar, y quizás el condicionante más significativo, es la morfología del relieve. Al oriente, el escurrimiento es de tipo laminar, cubriendo grandes extensiones anegadizas, localmente conocidos como esteros y cuya principal característica, es la presencia de agua superficial durante todo el año. Por el contrario, sobre el extremo occidental, estos escurrimientos se encauzan formando ríos y arroyos, cuyas inundaciones, y en consecuencia, la cobertura con agua en sus llanuras aluviales, sólo registran agua luego de eventos pluviométricos de magnitud considerable. Además, se construyó una tabla donde se muestran las superficies de agua calculadas, donde se evidencian evidentes diferencias entre los diferentes períodos (Tabla 3).

Tabla 3. Superficie con agua máxima y mínima por período

	Período	Máxima (área km <sup>2</sup> )	Máxima (%)	Mínima (área km <sup>2</sup> )	Mínima (%)
A	1990-1995	6.644	54,86	585	4,83
B	1995-2000	7.498	61,92	576	4,76
C	2000-2005	4.540	37,49	578	4,77
D	2005-2010	4.368	36,07	554	4,57
E	2010-2015	4.944	40,83	518	4,28
F	2015-2020	5.803	47,92	510	4,21

Elaboración propia

Figura 3. Cobertura máxima y mínima de agua en cada periodo analizado



A. Periodo 1990-1995. B. Periodo 1995-2000. C. Periodo 2000-2005. D. Periodo 2005-2010. E. Periodo 2010-2015.  
F. Periodo 2015-2020

Elaboración propia



### 3.1. Análisis de precisión

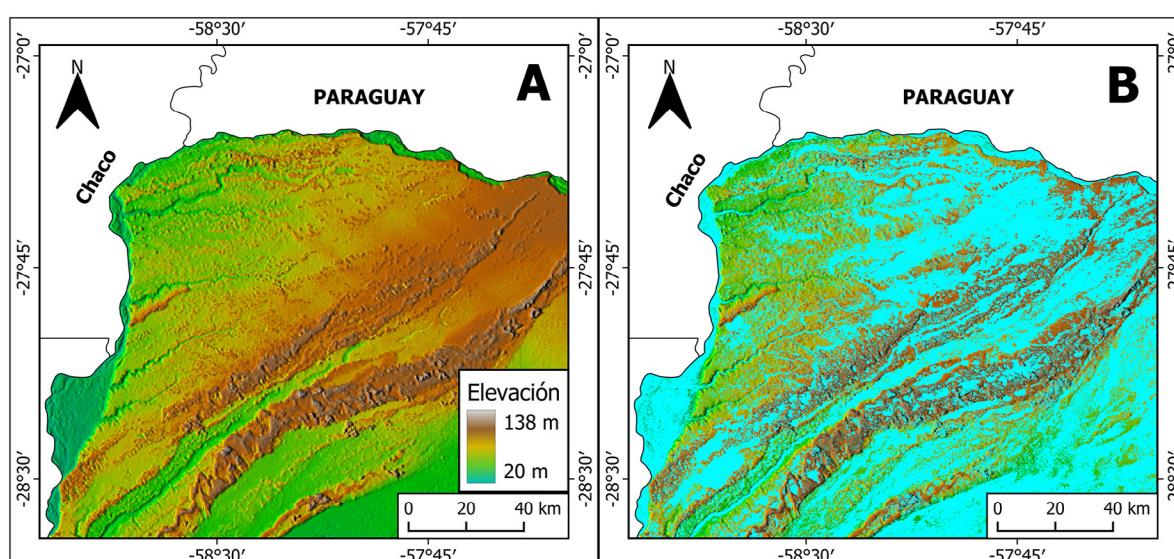
Las muestras para la validación se tomaron de manera digital sobre imágenes satelitales como áreas de entrenamiento. Estas fueron adquiridas sobre áreas inundables, cuyas unidades de paisaje fueron identificadas por Contreras y Contreras (2017) y se validaron teniendo como referencia un modelo digital de elevación (Figura 4). Como se muestra en la Tabla 4, se calcularon precisión general, verdad en el terreno y los errores de comisión y omisión para cada mosaico de calidad construido por periodo. En todos los casos la precisión fue alta, superior al 85 % y los promedios de precisión superaron el 93 %; mientras que el error global inferior al 6 %, mostrando que los resultados de la extracción de agua superficial son consistentes con la realidad del terreno.

Tabla 4. Cálculo de precisión y error

Índice	Precisión y errores (%)	1990-1995	1995-2000	2000-2005	2005-2010	2010-2015	2015-2020
NDWI Umbral > 0,35	Precisión general	93	93	92,6	96,5	88,2	92,8
	Verdad terreno	96	98,2	92,3	96,2	85,3	91,2
	Comisión	5,6	7,4	4,9	1,8	2	1,3
	Omisión	4	1,8	4,8	3,5	14,7	8,8
mNDWI Umbral > 0	Precisión general	98,2	96,1	92,7	96,5	89,6	94,2
	Verdad terreno	98	98,1	94,9	96,8	87,1	93,2
	Comisión	0,5	3,5	7,1	2,2	1,8	1,3
	Omisión	2	1,9	5,1	3,2	12,9	6,8
AWEI Umbral > 0,1	Precisión general	97,8	96,3	92,6	96,5	88,6	93,7
	Verdad terreno	97,3	98,1	93,8	96,5	85,5	92,2
	Comisión	0,3	3,2	6,2	6,6	1,5	1
	Omisión	2,8	1,9	6,2	3,5	14,5	7,8
NDVI Umbral > 0,3	Precisión general	99,5	98,9	99,2	98,2	97,9	97
	Verdad terreno	98,5	99,9	97,1	94	93,2	89,9
	Comisión	0	1,4	0	0	0	0
	Omisión	1,5	0	2,9	6	6,9	10

Elaboración propia

Figura 4. Comparación máscara de agua máxima en superficie y modelo digital de elevación (DEM)



A. MDE área de estudio. B. MDE área de estudio con máscara de agua

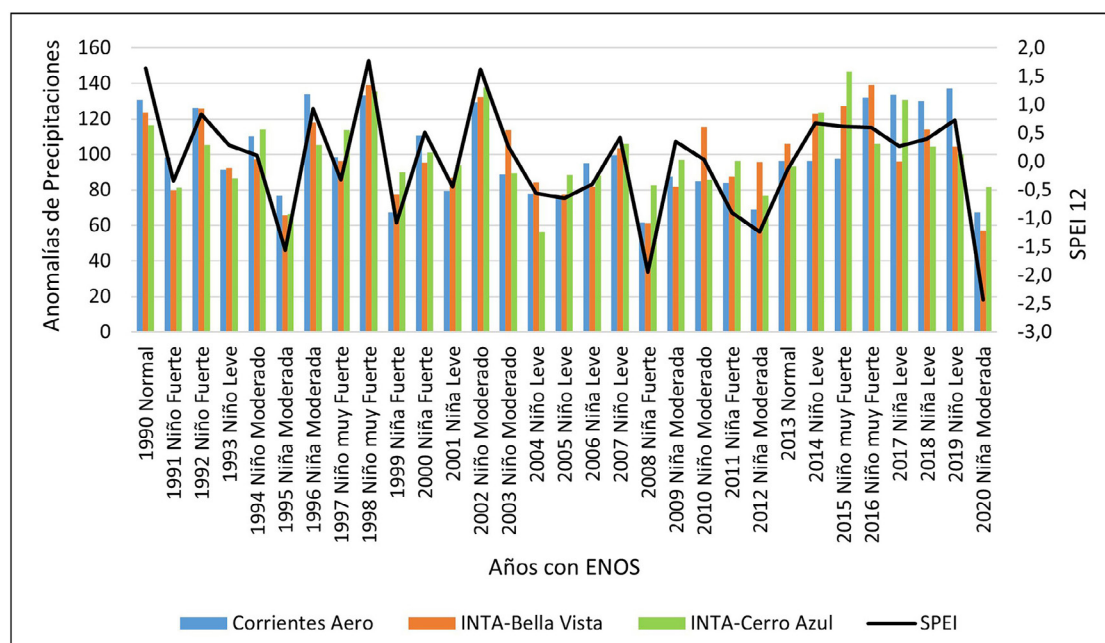
Fuente: SRTM. Elaboración propia

En la cartografía A (Figura 4), las áreas que aparecen como elevaciones son las lomadas arenosas descritas anteriormente, mientras que las zonas más planas de inter-lomadas es donde se encuentran los esteros y cañadas. Es posible advertir en la cartografía B que las lomadas arenosas se encuentran libres de agua debido a que tienen mejor drenaje, mientras que donde mayor superficie de agua se distingue es en todas las zonas de esteros. Es posible corroborar que las máscaras de agua coinciden con lo que sucede en el terreno, respetando de forma clara la topografía.

### 3.2. Análisis climático

Los valores del ONI en la región variaron entre -1,7 y 2,6 para los años comprendidos entre 1990 y 2020. La regresión lineal que modela la relación de las Anomalías de Precipitaciones con el Oceanic Niño Index mostró una relación positiva significativa entre las variables (intercepto =  $97,9 \pm 2,11$ ; pendiente =  $7,24 \pm 1,54$ ; g.l. = 91; valor  $t = 4,71$ ; valor  $p < 0,001$ ) y un coeficiente de correlación de Pearson  $r = 0,44$ , donde no se observan diferencias para las tres estaciones (valor  $F \approx 0$ ; valor  $p \approx 1$ ). La Figura 5 muestra la relación entre los eventos Niño o Niña por año y su intensidad, las anomalías calculadas en base a los datos de medición directa y el SPEI 12.

Figura 5. Análisis climático



Fuente: NOAA, Servicio Meteorológico Nacional, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria y SPEI. Elaboración propia

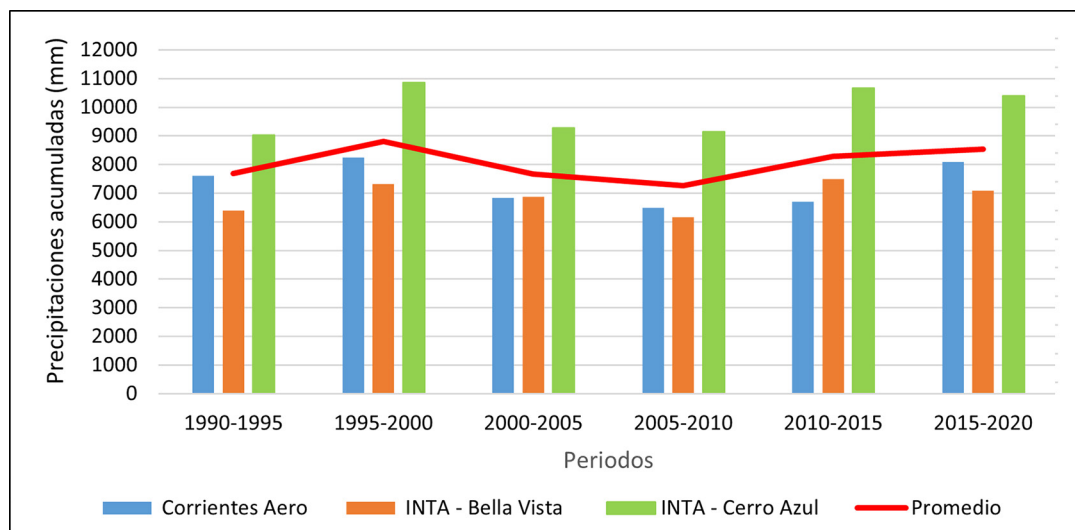
Respecto a la variabilidad climática, en la Figura 5 se pudo observar la relación existente entre el ENOS y los montos pluviométricos. En general, en los años donde se manifiesta un evento El Niño, las precipitaciones son mayores que lo normal (1.400 mm anuales de promedio), mientras que cuando se desarrolla un año La Niña, las precipitaciones son menores que el valor medio. Sin embargo, existen excepciones como el año 1990, donde se observó un año normal si se tiene en cuenta el ENOS (ONI = 0,3), pero tanto el análisis de anomalías (120), como el índice SPEI (1,64) denotan un año con precipitaciones por encima de lo normal para la región. Algo semejante se pudo ver para el año 1996, donde el desarrollo del evento de La Niña no repercutió en precipitaciones bajas, mientras que, en los años 2003 y 2010, donde si bien se ven años de El Niño, las precipitaciones fueron bajas.

En cuanto a los momentos húmedos y secos, si bien se observó diferencias entre años consecutivos, es posible establecer tres grandes períodos generales que se reflejan de manera notoria en las precipitaciones acumuladas y sus promedios por período. El primer segmento comprende desde 1990 a 1998, donde se observó un período húmedo, cuyos años, en su mayoría, se corresponden con precipitaciones por encima de la media (1.400 mm anuales) y supremacía de años El Niño sobre años La Niña, donde únicamente se percibe al año 1995 como año seco (SPEI = -1,56) dentro del período. En un segundo momento se

percibió que la tendencia se invierte, con una continuidad de años con lluvias por debajo de lo normal (1.400 mm anuales) y preminencia de años La Niña, con el año 2002 como único año húmedo según datos del SPEI. Por último, a partir del año 2014 el proceso se revirtió y nuevamente se encadenaron años húmedos con más frecuencia de eventos de El Niño (4) que de La Niña (2), el cual se interrumpe con la sequía extrema del año 2020 (Tabla 5).

La Figura 6 muestra las precipitaciones acumuladas por período quinquenal para cada estación meteorológica y el promedio de las 3 estaciones. Se advierte un comportamiento similar para todas las estaciones, aunque estas se encuentren a distancias importantes (300 km entre Corrientes y Cerro Azul, y 100 km entre Corrientes y Bella vista) unas de otras, denotando el carácter regional de las tendencias climáticas de las últimas tres décadas.

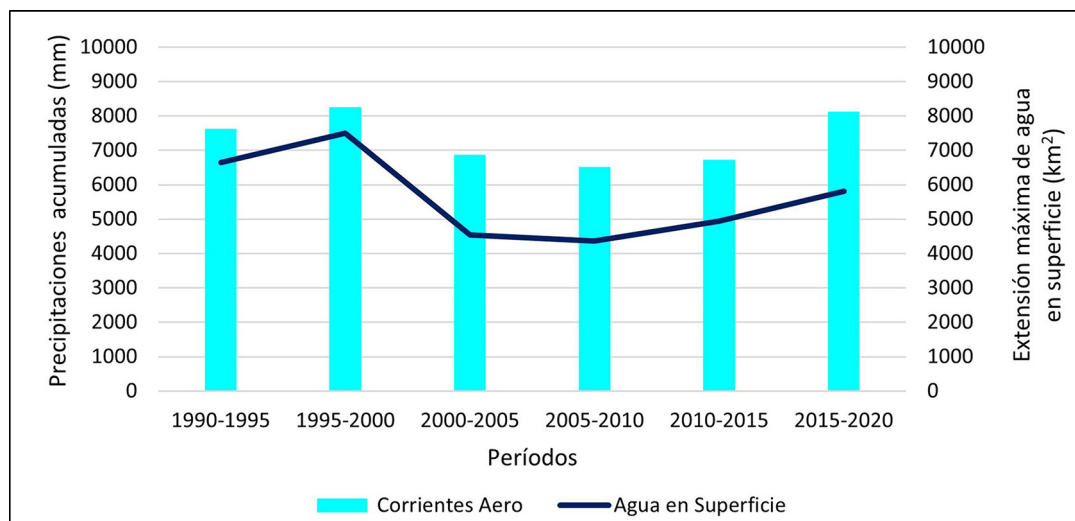
Figura 6. Precipitaciones acumuladas por período para estaciones meteorológicas y promedio entre estaciones



Fuente: SMN e INTA. Elaboración propia

La Figura 7 relaciona las precipitaciones de la estación Corrientes Aero con la extensión máxima de agua en superficie calculada con las técnicas de teledetección. Se percibe una relación directa entre ambas variables, observando cómo las máximas extensiones de agua en superficie se producen en los períodos de mayores precipitaciones.

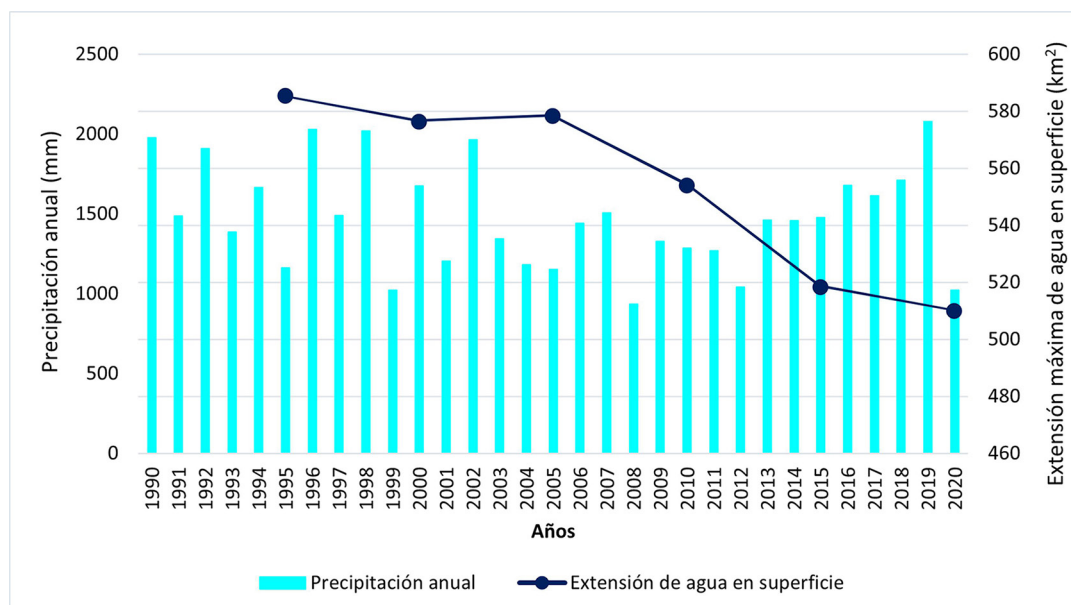
Figura 7. Precipitaciones acumuladas por período (Corrientes Aero) y extensión máxima de agua en superficie



Fuente: SMN. Elaboración propia

La regresión lineal entre la superficie máxima de agua superficial con la precipitación acumulada por período mostró una relación positiva significativa (g.l. = 4; valor  $t = 3,71$ ; valor  $p = 0,021$ ) y un coeficiente de correlación de Pearson  $r = 0,88$ . En cuanto a las extensiones de agua permanente (sequía), se observa una tendencia decreciente, casi constante, con un leve incremento entre los períodos 1995-2000 y 2000-2005. Esta tendencia diferente a la observada por los años húmedos se debe a los efectos de las sequías de 1995, 1999, 2008, 2012 y 2020 (Contreras, et al., 2020). Esto se puede ver en la Figura 8 que muestra las precipitaciones totales anuales de la estación Corrientes Aero y su relación con la extensión de agua permanente. La relación entre la superficie mínima de agua superficial con la precipitación anual más baja durante el período resultó no ser significativa (g.l. = 4; valor  $t = 1,34$ ; valor  $p = 0,252$ ).

Figura 8. Precipitaciones acumuladas anuales (Corrientes Aero) y extensión de agua permanente



Fuente: SMN. Elaboración propia

### 3.3. Análisis por período de la extensión superficial de la cobertura con agua

#### 3.3.1. 1990-1995

Se advirtió que existe una extensión de agua en superficie de 6.644 km<sup>2</sup> que representa casi el 55 % del área de estudio, es decir, que más de la mitad del área se encontró con agua en superficie en algún momento del período. Esto se debe principalmente a que en el período se dio un evento de El Niño Fuerte entre 1991 y 1992 y uno Moderado en el año 1994, los cuales impactaron en la región aumentando los niveles de precipitación. Esto ha hecho que, durante los años 1990, 1992 y 1994 lloviera por encima del valor medio (1.976,4; 1.909,9 y 1.666,4 mm/año respectivamente.). La extensión de agua permanente fue de 585 km<sup>2</sup>, un 4,83 % de la superficie total estudiada. Si bien la diferencia no es demasiado grande con otros períodos, es la extensión más amplia de agua permanente de toda la serie de tiempo estudiada y se explica porque en el período, no se advierte la presencia de un evento de sequía significativo.

#### 3.3.2. 1995-2000

Es el período con mayor extensión de agua en superficie y se debe a El Niño extraordinario sucedido entre fines del año 1997 y principio de 1998 (ONI = 2,4), uno de los momentos de eventos extremos más significativos registrados en la región. Para el año 1998, se observaron precipitaciones por encima de lo normal en todas las estaciones meteorológicas analizadas. La estación Corrientes Aero registró 2.019,3 mm y la estación INTA Bella Vista 1.932,1 mm en el año, siendo que ambas cuentan con un promedio de 1.400 mm/año, mientras que la estación INTA Cerro Azul, que tiene un promedio cercano a los 1.950 mm anuales, registró 2.692,6 mm/año. A su vez, el índice SPEI marcó que fue un año Muy Húmedo (1,77). Esto hizo que la extensión de agua en superficie ascienda a 7.498 km<sup>2</sup>, cubriendo más del 60 % del área total de estudio.

Por otra parte, la extensión de agua en momentos de sequía es menor que en el período anterior, a pesar del desarrollo de El Niño Extraordinario anteriormente mencionado, dando como resultado una reducción de la misma a 576 km<sup>2</sup>, un 4,76 % del área. Esto se debe al efecto de los eventos La Niña que se produjeron tanto al principio como al final del período.

### 3.3.3. 2000-2005

Para el período 2000-2005, se observó una disminución importante de la extensión máxima de agua en superficie, pasando a representar cerca de la mitad del período anterior (4.540 km<sup>2</sup> y 37,5 %). Esto se debe a que en cuatro de los cinco años que componen el período las precipitaciones estuvieron por debajo de lo normal (1.203; 1.344,3; 1.180,4 y 1.151,4 mm/año para los años 2001, 2003, 2004 y 2005 respectivamente), haciendo que la extensión máxima de agua en superficie disminuya (2.958 km<sup>2</sup>). Por otro lado, la ocurrencia de dos años de Niña fuerte (1999-2000) y una leve (2021), produjeron fuertes sequías a comienzos del período. Esto generó que el único evento El Niño importante en el período (2002-2003, ONI = 1,3), no impactara de manera significativa, siendo que las precipitaciones fueron moderadamente por encima de lo normal (1.962,4 mm) y el índice SPEI lo marque como un año Muy Húmedo (1,63).

Por su parte, la extensión de agua en períodos secos (578 km<sup>2</sup> y 4,77 %) se mantuvo prácticamente igual al período anterior, con un leve aumento, aunque existieron precipitaciones acumuladas relativamente inferiores. Esto se explica porque, si bien el período tuvo menos precipitaciones, no hubo una sequía extrema como en el período anterior.

### 3.3.4. 2005-2010

Es el período con menor superficie máxima de agua (4.368 km<sup>2</sup> y 36 %) y menor precipitación acumulada total. La mayoría de los años del período tuvieron precipitaciones por debajo del valor medio y no se observó ningún fenómeno El Niño Fuerte o Muy Fuerte. Al mismo tiempo, se observó un evento La Niña Fuerte (ONI = -1,6), la cual provocó que el año 2008 tenga precipitaciones por debajo de los 1.000 mm anuales (932,6 mm/año), algo no muy frecuente en la región, al punto de constituir el año con menor registro pluvial del que se tiene registro en la estación meteorológica de Corrientes Aero desde el año 1962.

Si bien es el período con menor cantidad de precipitaciones acumuladas y se percibió La Niña fuerte anteriormente descrita que produjo sequías importantes, no es el período con menor extensión de agua permanente. En este sentido, El Niño Débil ocurrido en el año 2007 (ONI = 0,9) generó un aumento mínimo en las precipitaciones (1.507,4), amortiguando el impacto de la fuerte sequía ocurrida al año siguiente (-1,94). Esta situación originó que este período, siendo el de menor extensión de agua en momentos húmedos, no sea el de menor extensión con agua permanente.

### 3.3.5. 2010-2015

En este período, se observó un nuevo aumento del nivel de precipitaciones generales, unos 1.000 mm más que en el período anterior. Esto se refleja en un aumento del área cubierta de agua en período de inundación, nuevamente por encima de 40 % llegando a 4.944 km<sup>2</sup>, con la influencia de los años 2013 y 2014, únicos 2 años del período donde se percibieron precipitaciones por encima de lo normal (1.459,1 y 1.458 mm/año respectivamente). La continuación de la disminución de la extensión de agua superficial en período de sequía (518 km<sup>2</sup> y 4,28 %), puede deberse a la concatenación de 2 eventos La Niña, uno Fuerte en 2010-2011 (ONI = -1,6) y otro Moderado en 2011-2012 (ONI = -1,1) en el inicio del período, que hicieron que ambos años tengan precipitaciones por debajo de lo normal. También se puede inferir que el impacto de estos años secos fue mayor debido a que los años precedentes fueron secos.

### 3.3.6. 2015-2020

En el período, se pudo analizar una continuación del aumento de la extensión máxima de agua en superficie llegando nuevamente cerca del 50 % y casi 6.000 km<sup>2</sup>. En los primeros años del período, las precipitaciones estuvieron por encima del valor medio anual (superando incluso los 2.000 mm anuales), generando severos y reiterados casos de inundaciones en la región, vinculados con El Niño Muy Fuerte del 2015-2016 (ONI = 2,6).

Sin embargo, se advirtió nuevamente la existencia de una disminución de la superficie cubierta por agua en período seco (510 km<sup>2</sup> y 4,21 %) y esto se relacionó con la sequía extrema del 2020 (ONI = -1,3 y SPEI = -2,44), donde las lluvias estuvieron cercanas a los 1.000 mm anuales (1.022,3 mm/año).

#### 4. Discusión de resultados

En general, en la región, en los años El Niño, las precipitaciones son mayores a lo normal y el índice SPEI suele presentar valores positivos, mientras que, cuando se produce un evento La Niña, esta tendencia se invierte y las precipitaciones registradas son inferiores al valor medio anual y en consecuencia con el dominio de los valores negativos de SPEI. No obstante, en algunos casos, no se observan estas relaciones directas entre los eventos de El Niño (años) y La Niña (años) con los valores de SPEI. Este comportamiento va en consonancia con lo planteado por Grimm et al. (2000), quienes afirma que por debajo de los 15° de latitud en Sudamérica, las precipitaciones aumentan en años El Niño y disminuyen en años La Niña. A su vez, en estudios climáticos realizados por Gómez (2019) y Hurtado et al., (2020) es posible confirmar el carácter regional de la influencia del ENOS. Por otro lado, Yokobori et al. (2018) afirman que esta relación se manifiesta especialmente en los eventos extremos, tanto secos (1995, 1999 y 2008) como los húmedos (1998 y 2002).

Si bien se observa una relación entre la manifestación del ENOS y las precipitaciones, esta no siempre es directa, es decir que no porque ocurra uno, se manifieste el otro. Un comportamiento similar se puede observar en la región Pampeana, donde las precipitaciones también se encuentran asociadas al ENOS (Brendel et al., 2021). En este sentido, diversos autores han investigado la posibilidad de que otros elementos de gran escala actúen como forzantes. Por ejemplo, Doyle y Barros (2002) encontraron relación entre la temperatura de la superficie del mar en el Atlántico suroccidental en verano y el acceso de humedad al continente. Por otro lado, Silvestri y Vera (2003) relacionaron la lluvia de las estaciones de transición con la oscilación antártica y Barros et al. (2000) vincularon la actividad de la Convergencia del Atlántico Sur con la precipitación estival en el sudeste de Sudamérica. Por otra parte, hay que tener en cuenta que los fenómenos El Niño y La Niña, generalmente se producen a fines de un año y principio del siguiente, lo que genera un desfase entre el momento en que se desarrollan y sus efectos.

En lo que respecta a los momentos de humedad y sequía, algunos estudios realizados para las provincias de Misiones y Corrientes muestran resultados similares a los obtenidos, destacando la presencia de un período húmedo comprendido entre 1985 y 1998 y un estadio seco que comienza en 1999 y se prolonga hasta 2006 (Gómez, 2019). En el caso del área noroeste de la provincia de Corrientes, se observa que el período seco se prolonga hasta el 2013 aproximadamente, y tiene una relevancia sumamente significativa, ya que la recurrencia y severidad de las sequías ha generado la reducción de grandes extensiones de humedales, las cuales incluyen el secado por completo de cubetas de lagunas someras correspondientes al paisaje de lomadas arenosas. A su vez, una fuerte demanda de nuevos espacios impulsada por la especulación inmobiliaria, como consecuencia del crecimiento espacial de las áreas urbanas y periurbanas, fue el desencadenante para la ocupación de estos ambientes, los cuales fueron descritos en Contreras (2015). A partir del 2014 nuevamente comienza un período húmedo hasta el 2020 (Contreras et al., 2020). Estos períodos húmedos y secos son generales y no son homogéneos, dado que, dentro de períodos húmedos pueden aparecer años secos y viceversa (Gómez, 2019). Esto se puede observar con claridad cuando se muestran las precipitaciones acumuladas anuales (Figura 7). Por otro lado, en estudios sobre variaciones en las precipitaciones en la región Pampeana (Ferrelli et al., 2020; Ferrelli et al., 2021) también se observan la ocurrencia y alternancia de momentos húmedos y secos, y se destaca su importancia debido al impacto sobre el ambiente y la sociedad.

Las extensiones de agua en superficie, tanto máxima como mínima, muestran una relación directa con los diferentes niveles de precipitaciones para los períodos estudiados. Esto se debe a que el sistema en general (cursos de agua, esteros y lagunas) responden exclusivamente a las precipitaciones locales, sin tener una entrada de agua externa (Contreras & Paira, 2017). De acuerdo con los autores, la única excepción es el valle aluvial del río Paraná, donde pueden sucederse desbordes en períodos secos debido a que su alta cuenca se encuentra fuera del área en cuestión y, por lo tanto, no responde únicamente a las precipitaciones locales. No obstante, si bien el ingreso de agua constituye una variable significativa, en Martínez et al. (2020) y Contreras et al. (2020) se destacó que, hasta incluso en años de precipitación extremas (2015-2018), donde se superaron los 2.000 mm anuales, se observaron reducciones en las

superficies lagunares vinculados a altas tasas de evaporación en relación con las elevadas temperaturas que se registran a lo largo del año y de allí la importancia del vincular estos datos con el SPEI. En este sentido, la severidad y recurrencia de inundaciones en la región fueron trabajadas por Contreras et al. (2020). La sequía extraordinaria se ve reflejada no solo en la reducida superficie con agua detectada, sino también en la gran cantidad de incendios que afectaron a toda la región (Smichowski et al., 2021; Montiel et al., 2021) y a la bajante extraordinaria del río Paraná, la cual ha comenzado en el 2020 y aún año después se sigue manifestando (Saucedo et al., 2021). En este marco, nuevamente se observa desarrollo de infraestructura urbana sobre humedales exponiendo a riesgos de inundación y anegamiento a la población recientemente ubicada en áreas periurbanas, lo que valida lo expuesto en Contreras (2015).

#### **4.1. Contribución sobre las respuestas de los humedales subtropicales a los eventos extremos de inundación y sequía: Un aporte para su conservación y uso sustentable**

A partir de los resultados obtenidos del seguimiento de las respuestas morfométricas vinculadas a las variaciones espacio temporales de la superficie de los humedales subtropicales asociados al abanico aluvial del río Paraná, es posible generar algunos lineamientos, tanto para investigaciones científicas, como para la toma de decisiones vinculadas a la gestión del agua. En este sentido, es importante comprender que dentro de una región puede existir una heterogeneidad de ambientes, que no necesariamente responderán de una misma manera frente a un mismo evento. Como se ha mostrado en la Figura 3, los lugares con mayor exposición a ser inundados o anegados son claramente identificables. No obstante, no basta con delimitarlos, sino que, además, es importante comprender los procesos que en ellos ocurren, como la recurrencia de inundaciones y anegamientos, el tipo de escurrimiento (laminar o encauzado) y principalmente la permanencia del agua en superficie.

Por otro lado, es importante tener en cuenta que muchas veces se comete el error de analizar las extensiones areales de la cobertura con agua sin tener en cuenta las situaciones previas. Es decir que, no solo es importante relacionar los eventos de variabilidad pluviométrica con las respuestas de los humedales y más cuando los mismos dependen exclusivamente de ellas, sino que también lo es conocer la situación de años previos y los ejemplos en las Figuras 6 y 7 dan cuenta de ello. Si bien los dos quinquenios con mayor precipitación acumulada (1995-2000 y 2015-2020) superan los 8.000 mm, la extensión de los humedales difieren considerablemente. Esto se debe a que, para el primer caso, si bien en el período anterior el monto fue relativamente inferior, en los dos quinquenios anteriores (1980-1985 y 1985-1990) la precipitación acumulada es de 8.525 mm y 8.138 mm respectivamente, con lo cual los suelos se encontraban completamente saturados. Es importante remarcar que, en el año 1983 el río Paraná registró la mayor inundación durante el Siglo XX, cuyo caudal superó los 60.000 m<sup>3</sup>/s.

Contrariamente, lo ocurrido en el último período estudiado posee una situación inversa. Es decir, los años que lo anteceden poseen precipitaciones acumuladas inferiores, con una gran recurrencia de eventos extremos de sequía. No obstante, también es importante remarcar que, si bien durante el 2015-2018 las precipitaciones anuales superaron los 2.000 mm, las mismas se concentraban en los primeros cinco meses del año, presentando eventos extremos de sequía hasta el año siguiente, según los valores registrados en el SPEI 1. Por lo tanto, estas situaciones anuales e interanuales previas, se manifiestan, tanto en la reducción de las mayores extensiones con agua superficial en eventos extremos de inundación, como en la disminución de las superficies con agua permanente durante los eventos extremos de sequía.

Períodos prolongados de sequía extrema pueden desencadenar procesos de colmatación de humedales, que con el tiempo reducen la capacidad de almacenamiento de agua, y, en consecuencia, la elasticidad hídrica del paisaje, es decir, las diferencias de áreas cubiertas con agua en eventos extremos. Procesos similares fueron identificados en llanuras aluviales por Paira y Drago (2007) y al sur de la región Pampeana por Brendel et al., 2020. Sin embargo, la diferencia se encuentra en que los primeros dependen de las precipitaciones locales, mientras que los segundos de los pulsos de inundación de los ríos. En este sentido, identificar y garantizar la permanencia de los humedales permanentes durante períodos de sequía extrema, es clave pensando en futuros escenarios asociados al cambio climático global. A su vez, si bien en este trabajo se hace foco en una porción del territorio argentino, los procesos y dinámicas que se mencionan pueden trasladarse a otros ambientes de características similares, como la región de los Esteros del Ñeembucú en Paraguay y a la región de Nhecolândia (Pantanal Mato-grossense, Brasil). Sin embargo, no se descarta la posibilidad de que puedan considerarse para otros humedales someros, cuya disponibilidad de agua dependa de precipitaciones locales (Zunino et al., 2018).

## 4.2. Ventajas de Google Earth Engine

Google Earth Engine proporciona una plataforma de procesamiento robusto que da acceso a series de datos de imágenes Landsat gratuitas permitiendo una evaluación rápida de la dinámica de aguas superficiales (Wang et al., 2018). Su adopción se adaptó de muy buena manera a los objetivos planteados en el trabajo, posibilitando el cálculo de varios índices espectrales en conjunto sobre series amplias de imágenes, permitiendo realizar comparaciones y ajustes en diferentes áreas. En este sentido, la plataforma brinda los scripts de manera accesible y de acceso público, los cuales se encuentran acompañados con citas bibliográficas donde fueron implementados.

Los diferentes índices de agua tienen un rendimiento generalmente aceptable para cartografía de agua superficial, siendo simples y de fácil uso. Sin embargo, deben considerarse algunas cuestiones acerca de la selección del índice y la determinación del umbral adecuado, ya que estas pueden estar atravesadas por factores subjetivos como las preferencias y/o desconocimientos del área de estudio por parte del investigador. Como plantea Wen et al. (2021), una manera de superar estos posibles inconvenientes es realizar una correlación de varios índices en conjunto. La utilización de 4 índices distintos permitió realizar ajustes en las máscaras finales de agua por período, ya que los índices responden de manera diferente ante la diversidad de ambientes del área de estudio (Bi et al., 2020).

A su vez, muchos estudios previos sobre la extensión, el patrón y el impacto de las inundaciones se han basado en el análisis de imágenes individuales, a pesar de las conocidas dificultades para su adquisición debido a la alta cobertura de nubes después de que se haya producido el flujo máximo (Chignell et al., 2015; Li et al., 2018). Sin embargo, la generación de compuestos derivados de Landsat utilizando la plataforma GEE permite el análisis de imágenes de varios días para una temporada de lluvias determinada, lo que garantiza que todas las imágenes de satélite con una cobertura de nubes adecuadamente baja se puedan utilizar para aumentar la precisión del mapeo de inundaciones (Li et al., 2018). En este sentido, cabe aclarar que, si bien existen filtros globales, al ser aplicado a estudios de casos, presentan errores debido a las particularidades locales que le restan precisión.

Por otro lado, una de las dificultades de mapear extremos regionales de agua en superficie radica en que no siempre se producen lluvias con una misma intensidad y de manera homogénea en toda el área, lo que implica un análisis de tormentas y eventos pluviométricos diarios a gran escala. Es decir que, cuanto mayor es el área de estudio, mayor será el número y distribución de registros con información pluviométrica. A esto debe sumarse que las características morfométricas y morfológicas de los humedales, pueden potenciar o mitigar el escurrimiento, ya sea acelerando o retardando la circulación del agua. Por lo tanto, las máximas extensiones de agua en superficie pueden darse en momentos diferentes en cada sector de la región. Con la aplicación de mosaicos de calidad para series de imágenes es posible establecer cuáles fueron los píxeles con contenido de agua y, así determinar áreas de inundación máxima en una sola imagen compuesta (Zhou et al., 2021).

Aunque el método de detección remota tradicional permite identificar y extraer agua en superficie, se ve limitado, no por la falta de información, sino, por el contrario, a la ausencia de capacidad para analizar todos los datos disponibles, quedando sujeto a estudios con reducidas cantidades de datos y áreas pequeñas (Bi et al., 2020; Perilla & Mas, 2020). GEE cumple bien con los requisitos de la era *big data*, debido a que es una plataforma de computación en la nube para el procesamiento, análisis y visualización en línea a escala global de conjuntos masivos de datos geospaciales que pueden procesar una gran cantidad de imágenes de satélite en muy poco tiempo (Gorelick et al., 2017). Así es que se pudieron procesar más de 900 imágenes de la serie Landsat de 30 años de manera ágil, permitiendo tener un panorama mucho más amplio que en los estudios tradicionales.

Por otro lado, la realización de estudios de largo término permite monitorear la evolución de los fenómenos en el tiempo. Las facilidades que presenta en este sentido la aplicación de GEE son indiscutibles, dado que permite procesar grandes cantidades de datos de manera simple y rápida, pudiendo detectar cambios en el terreno. (Li et al., 2018; Li et al., 2021)

Por último, las máscaras de agua obtenidas con la aplicación de la metodología se compararon con el historial anual de clasificación de aguas del *JRC Yearly Water Classification History* (Pekel et al., 2016). El conjunto de datos del historial de clasificación anual del agua del *JRC Yearly Water Classification History* contiene mapas de la ubicación y distribución temporal del agua superficial de 1984 a 2015 generados a partir del procesamiento de 3.066.102 escenas de Landsat 5, 7 y 8, donde los píxeles se clasificaron en



“agua y no agua” utilizando un sistema experto (Xia et al., 2019). Mediante la clasificación de la estacionalidad del agua a lo largo del año, las aguas superficiales se dividieron en aguas superficiales estacionales y aguas superficiales permanentes (Wang et al., 2018)

El JRC es muy eficiente para identificar coberturas con agua en climas templados y fríos, donde la vegetación acuática es más bien palustre y en donde se pueden diferenciar concentraciones algales o de sedimentos en suspensión, pero el área limnética se mantiene descubierta. Por el contrario, en humedales subtropicales y tropicales, las macrófitas que pueden generar significativos errores de clasificación son las arraigadas y las flotantes (Figura 9).

Figura 9. Fotografía de una laguna con macrófitas en el área limnética durante un evento extremo de sequía (Corrientes, Argentina)



Fuente: Fotografía de Edwin Harvey (2011)

Las primeras, dependiendo de su altura, densidad y nivel del agua del humedal en cuestión, imposibilitan la detección del agua, principalmente en eventos extremos de sequía. Del mismo modo, la vegetación flotante puede llegar a alcanzar un espesor de 3 m, conocido localmente como embalsados y en los cuales, como generan suelo orgánico (Histosol), adquieren una mayor capacidad de soporte mecánico (Neiff, 2004) y de allí que en ellos puede desarrollarse vegetación arbórea.

Sin dudas, ambas situaciones potencian la subestimación de los sensores ópticos y por lo tanto es clave contar con estrategias que permitan mitigar este error. Esto es un claro ejemplo de cómo las características paisajísticas locales determinan que los algoritmos no respondan adecuadamente, demostrando que las cuestiones de escala regional no siempre pueden ser resueltas con criterios globales. Para el caso del sector noroeste de la provincia de Corrientes, la corrección de este tipo de errores se realizó de manera óptica en base a imágenes de alta resolución y con ayuda de los NDVI calculados, sustentado con conocimiento de campo.

## 5. Conclusiones

Existe una marcada relación entre las anomalías de precipitaciones y el *Oceanic Niño Index*, sin embargo, una parte importante de la variación de los datos no es explicada por este modelo, dando la pauta de que hay factores locales de similar importancia. La extensión máxima de agua superficial está determinada en gran medida por las cantidades precipitadas en el área. En cambio, la superficie mínima de agua superficial no guarda relación con la precipitación anual mínima para cada período, lo que permite suponer que otros factores, como por ejemplo la evaporación potencial y en menor medida el escurrimiento superficial, serían determinantes en la pérdida de reservorios de agua en períodos secos. También es posible advertir que el impacto del ENOS es de carácter regional y que muchas veces existe un desfase entre su ocurrencia y las consecuencias, donde el efecto suele notarse al año siguiente.

Queda claro que los humedales subtropicales poseen una rápida respuesta en cuanto a su extensión areal como consecuencia de los efectos de la variabilidad pluviométrica. En este sentido, no basta con caracterizar la severidad de los eventos de inundación y sequía para una fecha en cuestión, sino que se debe partir de las situaciones previas.

Con el trabajo realizado fue posible confirmar con alto nivel de confianza la gran elasticidad del paisaje, donde se observan notorias diferencias de extensiones de agua en superficie en momentos húmedos y secos. La metodología aplicada ha permitido poner a prueba diferentes índices globales para la detección de coberturas de agua. Pese a que el paisaje del área presenta condiciones que pueden potenciar el error en la discriminación del agua en superficie, los resultados han sido satisfactorios. Al mismo tiempo, permitió mejorar la información obtenida sobre la extensión de agua en superficie para la región a través de estimaciones realizadas a nivel mundial. Por lo tanto, se considera que la elección de GEE como plataforma de procesamiento fue acertada.

Los resultados arrojados son de gran utilidad para la gestión general de los recursos hídricos superficiales, para el desarrollo de políticas de ordenamiento territorial, proyección de actividades productivas, planificación de protección de humedales, establecimiento de zonas bajo amenaza de inundaciones, así como también para investigaciones futuras de diferentes disciplinas que contemplen el factor agua en ambientes de humedales asociados a mega abanicos fluviales.

## **Agradecimientos**

Este trabajo fue parcialmente financiado por los Proyectos PICT 2018 – 636, PI 19Q002 y PI20Q001.

## Referencias

- Aliaga, V. S., & Piccolo, M. C. (2021). Variability of extreme precipitation events in the Northeastern Argentine region. *Theoretical and Applied Climatology*, 145(3), 955-965. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03659-0>
- Anaya, J. A., Sione, W., & Rodríguez-Montellano, A. (2018). Burned area detection based on time-series analysis in a cloud computing environment. *Revista de Teledetección*, 51, 61-73. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.8618>
- Arellano, S., Vega, J. A., Rodríguez Y., Silva, F., Fernández, C., Vega-Nieva, D., Álvarez-González, J. G., & Ruiz-González, A. D. (2017). Validation of the remote sensing indices dNBR and RdNBR to assess fire severity in the Oia-O Rosal (Pontevedra) wildfire in 2013. *Revista de Teledetección*, 49, 49-61. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7137>
- Barros, V., Gonzalez, M., Liebmann, B., & Camilloni, I. (2000). Influence of the South Atlantic convergence zone and South Atlantic Sea surface temperature on interannual summer rainfall variability in Southeastern South America. *Theoretical and Applied Climatology*, 67(3), 123-133. <https://doi.org/10.1007/s007040070002>
- Bi, L., Fu, B. L., Lou, P. Q., & Tang, T. Y. (2020). Delineation water of Pearl River Basin using Landsat images from Google Earth Engine. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 5-10. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W10-5-2020>
- Brendel, A. S., Ferrelli, F., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. (2019). Assessment of the effectiveness of supervised and unsupervised methods: maximizing land-cover classification accuracy with spectral indices data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 13(1), 014503. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.13.014503>
- Brendel, A. S., Ferrelli, F., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2021). Efectos de la variabilidad pluviométrica sobre la morfometría de los recursos hídricos de una cuenca hidrográfica de la región Pampeana (Argentina). *Revista venezolana de Geografía*, 62(1), 92-106. <https://doi.org/10.53766/RGV/2021.62.01.03>
- Breusch, T. S., & Pagan, A. R. (1979). A simple test for heteroscedasticity and random coefficient variation. *Econometrica*, 47, 1287-1294. <https://doi.org/10.2307/1911963>
- Che, X., Feng, M., Sexton, J., Channan, S., Sun, Q., Ying, Q., Liu, J., & Wang, Y. (2019). Landsat-based estimation of seasonal water cover and change in arid and semi-arid Central Asia (2000–2015). *Remote Sensing*, 11(11), 1323. <https://doi.org/10.3390/rs11111323>
- Chignell, S. M., Anderson, R. S., Evangelista, P. H., Laituri, M. J., & Merritt, D. M. (2015). Multi-temporal independent component analysis and Landsat 8 for delineating maximum extent of the 2013 Colorado Front Range flood. *Remote Sensing*, 7(8), 9822-9843. <https://doi.org/10.3390/rs70809822>
- Clement, M. A., Kilsby, C. G., & Moore, P. (2018). Multi-temporal synthetic aperture radar flood mapping using change detection. *Journal of Flood Risk Management*, 11(2), 152-168. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12303>
- Contreras, F. I. (2015). El impacto ambiental del crecimiento espacial de la ciudad de Corrientes sobre lagunas periurbanas. *Boletín Geográfico*, 37, 29-42. [http://revele.uncoma.edu.ar/index.php/geografia/article/view/1078/pdf\\_2](http://revele.uncoma.edu.ar/index.php/geografia/article/view/1078/pdf_2)
- Contreras, F. I., & Contreras, S. A. (2017). La incidencia de la pendiente en la distribución de las morfologías de las lagunas sobre lomadas arenosas (Corrientes, Argentina). *Anuario do Instituto de Geociencias – UFRJ*, 40(1), 15-25. [http://dx.doi.org/10.11137/2017\\_1\\_15\\_25](http://dx.doi.org/10.11137/2017_1_15_25)
- Contreras, F. I., & Paira, A. R. (2017). 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*, 21, 31-38. [https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/102247/CONICET\\_Digital\\_Nro.fd4e088d-baa8-446b-96ee-a14496e2467d\\_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/102247/CONICET_Digital_Nro.fd4e088d-baa8-446b-96ee-a14496e2467d_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- Contreras, F. I., Ferrelli, F., & 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*, 55(114), 3- 22. <https://doi.org/10.18055/Finis19436>

- Contreras, F. I., & 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*, 43(1), 13-31. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8031029>
- DeVries, B., Huang, C., Armston, J., Huang, W., Jones, J. W., & Lang, M. W. (2020). Rapid and robust monitoring of flood events using Sentinel-1 and Landsat data on the Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111664. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111664>
- Dornes, P. F., Comas, R. N., Cardín, D., Pochetti, R., Ianni, J. P., & Kruse, E. (2016). Identificación y caracterización hidrológica de lagunas en el noreste de la provincia de La Pampa. In *Libro de Trabajos del IX Congreso Argentino de Hidrogeología. Catamarca* (pp. 20-26). <https://core.ac.uk/reader/243541620>
- Doyle, M. E., & Barros, V. R. (2002). Midsummer low-level circulation and precipitation in subtropical South America and related sea surface temperature anomalies in the South Atlantic. *Journal of Climate*, 15(23), 3394-3410. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<3394:MLLCAP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<3394:MLLCAP>2.0.CO;2)
- Feng, M., Sexton, J. O., Channan, S., & Townshend, J. R. (2016). A global, high-resolution (30-m) inland water body dataset for 2000: first results of a topographic-spectral classification algorithm. *International Journal of Digital Earth*, 9(2), 113-133. <https://doi.org/10.1080/17538947.2015.1026420>
- Ferrelli, F., Brendel, A., Piccolo, M., & Perillo, G. (2020). Tendencia actual y futura de la precipitación en el sur de la Región Pampeana (Argentina). *Investigaciones Geográficas (Mx)*, (102). <https://doi.org/10.14350/ig.59919>
- Ferrelli, F., Brendel, A. S., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2021). Evaluación de la tendencia de la precipitación en la región Pampeana (Argentina) durante el período 1960-2018. *Raega-O Espaço Geográfico em Análise*, 51, 41-57. <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v51i0.69962>
- Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 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*, 58(3), 257-266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Gil-Guirado, S., & Pérez-Morales, A. (2019). Variabilidad climática y patrones termopluviométricos en Murcia (1863-2017). Técnicas de análisis climático en un contexto de cambio global. *Investigaciones Geográficas (Esp)*, (71), 27-54. <https://doi.org/10.14198/INGEO2019.71.02>
- Gómez, C. V. (2019). Situaciones pluviométricas extremas anómalas que derivan en sequías e inundaciones (provincia de Misiones, 1985-2006). *Contribuciones Científicas GAEA*, (31), 161-164. [http://www.gaea.org.ar/contribuciones/CONTRIBUCIONES\\_2019/GOMEZClaudia.pdf](http://www.gaea.org.ar/contribuciones/CONTRIBUCIONES_2019/GOMEZClaudia.pdf)
- Google Earth Engine. (2021a). *Landsat Algorithms*. <https://developers.google.com/earth-engine/guides/landsat>
- Google Earth Engine. (2021b). *Compositing and Mosaicking*. [https://developers.google.com/earth-engine/guides/ic\\_composite\\_mosaic](https://developers.google.com/earth-engine/guides/ic_composite_mosaic)
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Grimm, A. M., Barros, V. R., & Doyle, M. E. (2000). Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events. *Journal of climate*, 13(1) 35-58. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<0035:CVISSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<0035:CVISSA>2.0.CO;2)
- Herbst, R., & Santa Cruz, J. N. (1999). Mapa litoestratigráfico de la provincia de Corrientes. *D'Orbignyana* (2), 1-69.
- Hurtado, S.I., Agosta Scarel, E. A., & Godoy, A. A., (2020) Estudio exploratorio de forzantes de la variabilidad en baja frecuencia de la precipitación en el Chaco. *Meteorológica*, 45(1),71-92. [https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/139247/CONICET\\_Digital\\_Nro.42f56e20-7e6a-49ae-9c7e-7d871308f7e6\\_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/139247/CONICET_Digital_Nro.42f56e20-7e6a-49ae-9c7e-7d871308f7e6_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

- Iriondo, M. H. (2010). *Geología del Cuaternario en Argentina*. Museo Provincial de Ciencias Naturales Florentino Ameghino. [https://www.researchgate.net/publication/293172825\\_Geologia\\_del\\_Cuaternario\\_en\\_la\\_Argentina](https://www.researchgate.net/publication/293172825_Geologia_del_Cuaternario_en_la_Argentina)
- Iriondo, M. H. (2011). *Aguas subterráneas y superficiales de la provincia de Santa Fe*. Museo Provincial de Ciencias Naturales Florentino Ameghino. [https://www.researchgate.net/publication/293175273\\_Aguas\\_Superficiales\\_y\\_Subterranas\\_de\\_la\\_Provincia\\_de\\_Santa\\_Fe\\_Segunda\\_Edicion](https://www.researchgate.net/publication/293175273_Aguas_Superficiales_y_Subterranas_de_la_Provincia_de_Santa_Fe_Segunda_Edicion)
- Li, J., Yang, X., Maffei, C., Tooth, S., & Yao, G. (2018). Applying independent component analysis on Sentinel-2 imagery to characterize geomorphological responses to an extreme flood event near the non-vegetated Río Colorado Terminus, Salar de Uyuni, Bolivia. *Remote Sensing*, 10(5), 725. <https://doi.org/10.3390/rs10050725>
- Li, J., Tooth, S., Zhang, K., & Zhao, Y. (2021). Visualisation of flooding along an unvegetated, ephemeral river using Google Earth Engine: Implications for assessment of channel-floodplain dynamics in a time of rapid environmental change. *Journal of Environmental Management*, 278, 111559. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111559>
- Liss, B., Howland, M. D., & 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*, 15, 299-304. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.08.013>
- Martínez, S. E., Baruzzo, M. N., Smichowski, H., Forastier, M. E., & Contreras, F. I. (2021). El efecto de las precipitaciones en las características limnológicas en lagunas periurbanas (Bella Vista, Corrientes, año 2019). *Revista Senderos*, 2(1), 122-135. [https://be374821-7896-47fe-9d13-5d4aa0ba6a72.filesusr.com/ugd/4c4071\\_d064a471e92a48fb9b367f6c6f6068a0.pdf](https://be374821-7896-47fe-9d13-5d4aa0ba6a72.filesusr.com/ugd/4c4071_d064a471e92a48fb9b367f6c6f6068a0.pdf)
- Montiel, M. R., Zaninovich, S. C., Bedrij, N. A., Insaurralde, J. A., Verdoljak, J. J., Fontana, J. L., & Gatti, M. G. (2021). Eucalypt plantations for forest restoration in a fire-prone mosaic of grasslands and forests in northern Argentina. *Restoration Ecology*, e13452. <https://doi.org/10.1111/rec.13452>
- National Oceanographic and Atmospheric Administration (2021). *Climate Prediction Center*. [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)
- Neiff, J. J. (2004). *El Iberá... ¿en peligro?*. Fundación Vida Silvestre.
- Neiff, J. J. (2021). Aguas continentales de Sudamérica: Biodiversidad, problemas y perspectivas. *Acta Biológica Venezuelica*, 41, 1.
- Paira, A., & Drago E. (2007). Origin, evolution, and types of floodplain water bodies. In M. Iriondo, J. Paggi, J., & M. Parma (Eds.), *The middle Paraná river: Limnology of a Subtropical wet-land* (pp. 53-81). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-70624-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-540-70624-3_3)
- Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418-422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
- Perilla, G. A., & Mas, J. F. (2020). Google Earth Engine (GEE): una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube. *Investigaciones Geográficas (Mx)* (101). <https://doi.org/10.14350/rig.59929>
- Popolizio, E. (1981). Aporte al conocimiento de los Bajos Submeridionales en la provincia de Santa Fe. *GAEA, Serie Especial*, 9, 103-119.
- R Core Team (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Richardson, A. J., & Wiegand, C. L. (1977). Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 43(12), 1541-1552.
- Saucedo, G. I., Contreras, F. I., & Kurtz, D. (2021). Comparación de superficies cubiertas por agua en el río Paraná en diferentes períodos hidrológicos. *Investigaciones y Ensayos Geográficos*, 18(1), 74-88. [https://e1adda5f-8a1c-44fc-a061-e477bba5f983.filesusr.com/ugd/b63ff7\\_1d6954d23c3249e3a45eb3c5d39ccbde.pdf](https://e1adda5f-8a1c-44fc-a061-e477bba5f983.filesusr.com/ugd/b63ff7_1d6954d23c3249e3a45eb3c5d39ccbde.pdf)
- Silvestri, G., & Vera, C., (2003). Antarctic Oscillation signal on precipitation anomalies over southeastern South America. *Geophysical Research Letters*, 30(21), 21-15. <https://doi.org/10.1029/2003GL018277>

- Sisay, A. (2016). Remote sensing based water surface extraction and change detection in the central rift valley region of Ethiopia. *American Journal of Geographic Information System*, 5(2), 33-39. <http://article.sapub.org/10.5923.j.ajgis.20160502.01.html>
- Smichowski, H., Montiel, M. del R., Romero, V., Kowalewski, M., & Contreras, F. I. (2021). Evaluación de incendios en áreas periurbanas de la ciudad de Corrientes (Argentina) durante el año 2020. *Papeles de Geografía*, 67, 151-167. <https://doi.org/10.6018/geografia.486441>
- Uddin, K., Matin, M. A., & Meyer, F. J. (2019). Operational flood mapping using multi-temporal sentinel-1 SAR images: a case study from Bangladesh. *Remote Sensing*, 11(13), 1581. <https://revistas.um.es/geografia/article/view/486441/320031>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J. J., López-Moreno, J. I., Azorín-Molina, C., Revuelto, J., Morán-Tejeda, E., & 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*, 8. [http://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/02/0066-PU-SA-VIII-2012-SM\\_VICENTE.pdf](http://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/02/0066-PU-SA-VIII-2012-SM_VICENTE.pdf)
- Wang, C., Jia, M., Chen, N., & Wang, W. (2018). Long-term surface water dynamics analysis based on Landsat imagery and the Google Earth Engine platform: A case study in the middle Yangtze River Basin. *Remote Sensing*, 10(10), 1635. <https://doi.org/10.3390/rs10101635>
- Wen, Z., Zhang, C., Shao, G., Wu, S., & Atkinson, P. M. (2021). Ensembles of multiple spectral water indices for improving surface water classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 96, 102278. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102278>
- Xia, H., Zhao, J., Qin, Y., Yang, J., Cui, Y., Song, H., Ma, L., Ning, J., & 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>
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International journal of remote sensing*, 27(14), 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Yokobori, M. M., Deschamps, J., & Fernández, D. R. (2018). Una mirada a las variaciones de precipitaciones en los Esteros del Iberá y regiones cercanas durante los últimos años. *Perspectivas: Revista Científica de la Universidad de Belgrano*, 1(1), 187-200. <https://revistas.ub.edu.ar/index.php/Perspectivas/article/view/19/19>
- Zhou, H., Liu, S., Hu, S., & Mo, X. (2021). Retrieving dynamics of the surface water extent in the upper reach of Yellow River. *Science of The Total Environment*, 800, 149348. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149348>
- Zunino, J., Ferrelli, F., & Piccolo, M. C. (2018). Cambios morfométricos en una laguna pampeana (Argentina): posibles efectos sobre la comunidad ictica. *Geosciences= Geociências*, 37(4), 835-847. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v37i4.11980>