

Tendencias detectadas en el almacenamiento de agua en la cuenca del río Paraná a partir de datos satelitales

Water storage trends detected in the Paraná river basin from satellite data

Ayelén Pereira^{1,2}, Cecilia Cornero¹, Ana C Oliveira Cancoro de Matos^{3,4}, M Cristina Pacino^{1,3}, Denizar Blitzkow^{3,4}

Resumen La cuenca del río Paraná es el principal aporte a la cuenca del Plata en América del Sur, y el quinto sistema hidrográfico más grande del mundo. Además, constituye una de las áreas más dinámicas de Argentina en términos económicos, siendo también una región de gran significado hidrológico y sensible a eventos climáticos extremos. En los últimos 20 años, esta cuenca ha experimentado episodios de inundaciones extraordinarias con pérdidas humanas y daños materiales, así como situaciones severas de déficit en el almacenamiento de agua continental. Las misiones satelitales gravimétricas pueden monitorear la distribución de la masa de agua en el sistema terrestre, lo cual está estrechamente relacionado con las consecuencias del cambio climático. En este trabajo, se utilizó información derivada de las misiones GRACE y GRACE-FO para analizar la variación de la masa de agua en la cuenca del Medio-Bajo Paraná, la que además es comparada con datos satelitales de precipitación, y vinculada con eventos ENSO ocurridos en el período 2003-2022. A continuación, a partir de las tendencias detectadas, se llevó a cabo un estudio temporal del déficit en el almacenamiento de agua entre 2020 y 2022. Los resultados indican que la mayoría de las variaciones en el almacenamiento de agua se relacionan con eventos climáticos extremos (como las inundaciones del 2015-2017, y la sequía de 2009 y 2020-2022), y con episodios de El Niño y La Niña, respectivamente.

Palabras clave Agua continental, GRACE, cuenca Medio-Bajo Paraná, ENSO, sequía.

Abstract The Paraná River basin is the main contributor to the La Plata basin in South America, and the fifth largest hydrographic system in the world. Additionally, it is one of the most economically dynamic areas in Argentina, being also a region of great hydrological significance and sensitive to extreme climatic events. Over the past 20 years, this basin has experienced extraordinary flooding episodes with human losses and material damage, as well as severe situations of continental water storage deficits. Gravimetric satellite missions can monitor the distribution of water mass in the terrestrial system, which is closely related to the consequences of climate change. In this study, data obtained from the GRACE and GRACE-FO missions were used to analyze the variations of water mass within the Middle-Low Paraná basin. This data was then compared with satellite precipitation information and linked to the ENSO events that occurred from 2003 to 2022. Subsequently, a temporal study of the water storage deficit between 2020 and 2022 was conducted based on the identified trends. The results indicate that most of the observed variations in the water storage are related to extreme climatic events (such as the floods of 2015-2017 and the droughts of 2009 and 2020-2022), and to El Niño and La Niña episodes, respectively.

Keywords Terrestrial water, GRACE, Middle-Low Paraná basin, ENSO, drought.

¹Área de Geodinámica y Geofísica, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Santa Fe, Argentina. Email: apereira@fceia.unr.edu.ar

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

³Centro de Estudo de Geodesia - CENEVIDEO, São Paulo, Brazil.

⁴Laboratório de Topografia e Geodesia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil.

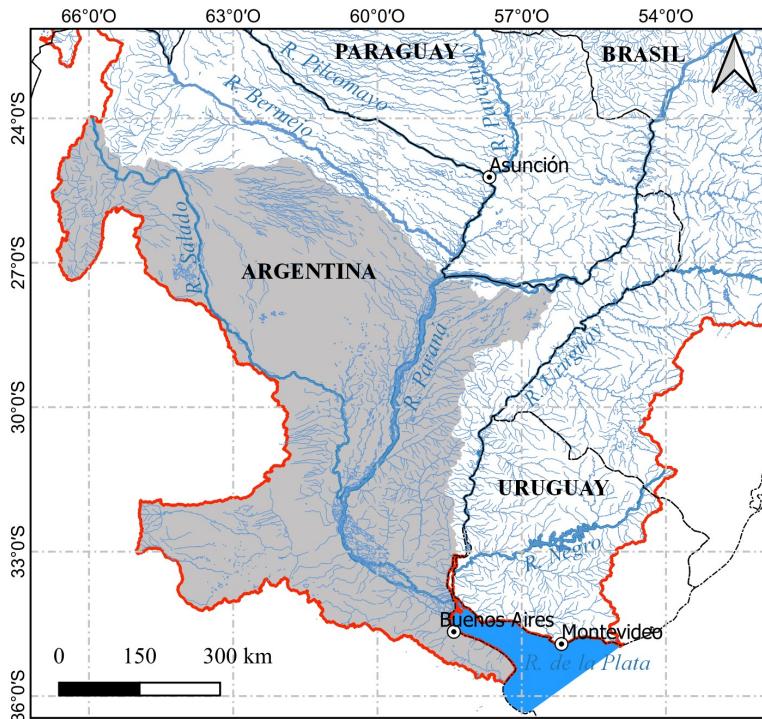


Figura 1. Cuenca del Medio-Bajo Paraná ([Cornero et al., 2021](#)).

INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Paraná, con una extensión de 1.510.000 km², se destaca como una de las de mayor magnitud en la región, siendo generalmente subdividida en dos subcuenca principales: el Alto Paraná y el Medio-Bajo Paraná (MBP, Figura 1). La mayor parte del caudal del río Paraná proviene de sus regiones superiores y medias, con una contribución relativamente menor de la parte baja. La notable presencia de grandes caudales en el tramo medio del río Paraná ocasiona inundaciones de larga duración sobre vastas extensiones de la subcuenca del Bajo Paraná, la cual también recibe aportes hídricos del río Paraguay ([Berberry & Barros, 2002](#)).

El monitoreo de la variación hídrica en la planicie de inundación del Paraná Medio y otros humedales localizados en la región es de importancia crítica ya que proveen funciones hidrológicas y ecológicas irremplazables, como mitigación de sequías e inundaciones, recarga de acuíferos y provisión de agua dulce de alta calidad ([Kandus et al., 2006](#)).

Por otro lado, el desarrollo de eventos de El Niño y La Niña, fenómenos relacionados con la temperatura superficial del Océano Pacífico Tropical, tiene efectos marcados en el clima de gran parte de esta cuenca, especialmente en la escala de tiempo interanual, afectando la variabilidad de la lluvia ([Comité Intergubernamental Coordinador de los Países de la Cuenca del Plata \(CIC\), 2017](#)).

En el contexto actual del cambio climático, surge la necesidad de comprender la dinámica y las fluctuaciones temporales del agua continental, así como de identificar las causas de las variaciones hidrológicas, donde el conocimiento resulta así fundamental para lograr un manejo más efectivo y sostenible de este recurso invaluable.

Las misiones gravimétricas satelitales GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment, 2002-2017), y su sucesora GRACE-FO (GRACE Follow On, desde 2018), permiten observar el ciclo hidrológico y los cambios en el almacenamiento de agua continental (Total Water Storage, TWS) con una precisión de 1,5 cm ([Wahr, 2004](#)). Estos cambios están representados en una columna vertical conformada por la suma de agua superficial, humedad del suelo y agua subterránea, siendo el TWS un indicador

valioso de las variaciones en las condiciones hidrológicas que ocurren a escala global y en escalas más pequeñas, como cuencas y subcuencas ([Frappart et al., 2013](#)).

Este trabajo presenta un análisis multitemporal del TWS en la cuenca MBP para el período 2003-2022, a partir de datos gravimétricos satelitales provenientes de las misiones GRACE/FO (GRACE y GRACE-FO), con el fin de detectar tendencias en el almacenamiento de agua a nivel regional. Los resultados son complementados con información de modelos satelitales de precipitación, para luego ser vinculados con episodios de La Niña y El Niño ocurridos en la región a partir de un análisis estadístico.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Las variaciones en el almacenamiento de agua continental (TWS) utilizadas en este estudio se obtuvieron a partir de las soluciones de alta resolución de tipo mascons de las misiones GRACE/FO. Este enfoque se basa en la estimación de anomalías de masa de agua en cuadículas o concentraciones de masas específicas. Para este propósito, se emplearon los datos de la versión CSR RL06 ([Save et al., 2016](#)), los cuales proporcionan variaciones mensuales del TWS con una resolución espacial de 0.5°.

Por otro lado, se emplearon datos de precipitación mensual de la misión satelital IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM), en particular el producto GPM_3IMERGM_07 cuya resolución espacial es de 0,1° (Huffman, 2023).

Por último, se consideró el Índice Niño Oceánico (Oceanic Niño Index, ONI), un parámetro para determinar eventos ENSO, calculado a partir de la anomalía de la temperatura superficial del mar promediada durante tres meses para la región Niño 3.4 (5°N-5°S, 170°O-120°O), obtenido a través del sitio web de la NOAA (US National Oceanic and Atmospheric Administration).

En la Figura 2 se muestra la variación mensual del TWS desde enero de 2003 hasta diciembre de 2022, junto con la precipitación satelital para la región correspondiente al MBP. Además, se indican los episodios Niño/Niña ocurridos en el período, con la clasificación en base a su intensidad ([Larkin & Harrison, 2005](#)).

Los resultados de TWS presentan variaciones significativas en algunos períodos en particular. En lo que respecta a los picos máximos del almacenamiento total de agua, se destacan los años 2003, 2007, 2010, 2016, 2017 y 2019. En 2015, las lluvias por encima de la normal relacionadas con un evento intenso de El Niño, clasificado entre los cuatro más fuertes de los últimos 50 años (según el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina, SMN), causaron excesos hídricos en la región del litoral argentino. Durante el período 2016 se observaron precipitaciones intensas que propiciaron desbordes de ríos, inundaciones, y una notable cantidad de personas evacuadas. Asimismo, los aumentos importantes del TWS detectados en 2019 se vinculan a abundantes precipitaciones en coincidencia con un Niño moderado, con récords históricos en el mes de enero ([Servicio Meteorológico Nacional \(SMN\), 2019](#)). En cuanto a los otros períodos destacados (2003, 2007, 2010), estos presentaron un menor impacto y extensión a lo largo de la cuenca.

Por otro lado, según los datos pluviométricos, en el año 2008 se identificó un déficit de precipitación que se reflejó meses más tarde en 2009 en el TWS con valores negativos. Los valores más críticos de esta etapa tuvieron lugar en otoño/2009 ([Servicio Meteorológico Nacional \(SMN\), 2009](#)), y se asocian a la presencia de un evento fuerte de La Niña. La sequía más extensa de todo el período analizado tuvo su pico máximo en el año 2022, el más seco considerando aproximadamente 60 años de registros de precipitaciones ([Servicio Meteorológico Nacional \(SMN\), 2023](#)). Este episodio motivó un estudio más exhaustivo en esta última etapa.

A continuación, se llevó a cabo un análisis de regresión para las series temporales de TWS, precipitación y ENSO, con el fin de detectar cambios gradualmente variables (tendencias). En la Figura 2 se

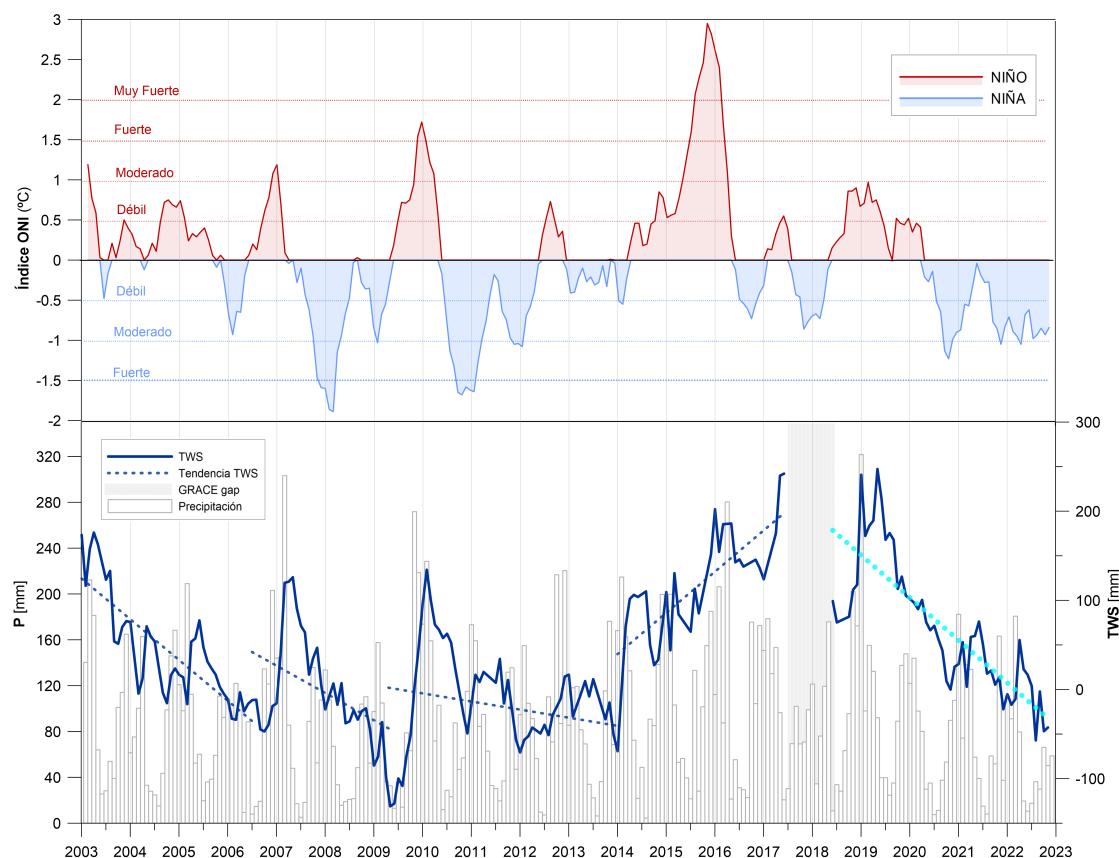


Figura 2. Arriba: Índice ONI (episodios NIÑO/NIÑA), desde enero 2003 a diciembre 2022. Debajo: Serie temporal de TWS (GRACE/FO) y tendencias, y precipitación (IMERG) en el MBP para el mismo período.

muestra el ajuste lineal para la serie mensual de TWS, considerando para ello los períodos entre las variaciones más significativas, resultando cinco ciclos bien marcados (Tabla 1). Se destaca, por un lado, el período 2014-2017.4 como el único con tendencia positiva, tanto para el TWS (+46.26 mm) como para la precipitación (+2.27 mm), mientras que el resto de las tendencias resultaron negativas. Esto puede relacionarse con el mayor impacto a largo plazo que presentarían las consecuencias de La Niña en el MBP. Por otro lado, el período 2018.4-2022 presentó la pendiente negativa más pronunciada para ambas variables (-47.75 mm para el TWS, y -11.58 mm para la lluvia). Este último caso representa la mayor disminución del TWS en tan solo 4.4 años, en comparación con la tendencia también negativa hallada para el primer período de 3.5 años. Dicha situación, refleja la influencia del episodio de La Niña en el MBP y su impacto en el almacenamiento de agua en la región.

De acuerdo a los resultados hallados, se demuestra que la región del MBP estuvo afectada por condiciones de sequía, que resultó ser severa a moderada a partir del otoño/2022, y de categoría excepcional hacia la primavera y hasta el verano de ese año ([Servicio Meteorológico Nacional \(SMN\)](#),

Tabla 1. Tendencias lineales en el MBP del TWS, la precipitación, y ENSO (las pendientes más significativas se indican en negrita), junto con los episodios más relevantes de cada ciclo.

Período	TWS (mm)	Precipitación (mm)	ENSO	Episodio más relevante
2003 - 2006.5	-45.69	-7.15	-0.19	NIÑO (débil a moderado)
2006.5 - 2009.3	-30.58	-9.53	-0.48	NIÑA (> fuerte)
2009.3 - 2014	-9.1	-2.05	-0.12	NIÑA (> fuerte)
2014 - 2017.4	46.26	2.27	-0.05	NIÑO (> muy fuerte)
2018.4 - 2022.8	-47.75	-11.58	-0.42	NIÑA (moderado a fuerte)

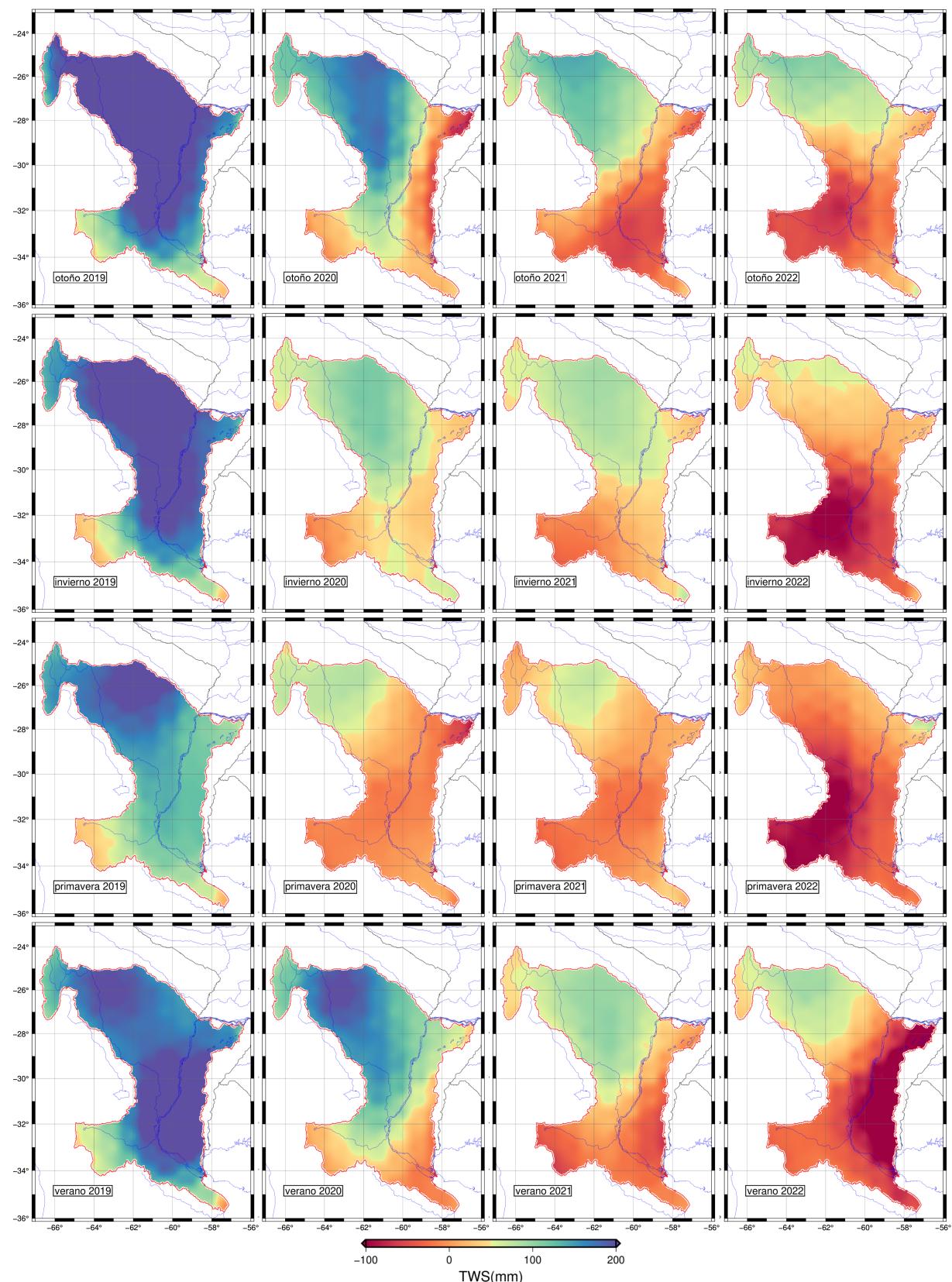


Figura 3. Variación estacional del TWS en el MBP desde 2019 a 2022.

2023). En la Figura 3, se muestran los mapas correspondientes a la media estacional del TWS, desde 2019 a 2022, donde se puede percibir la disminución progresiva del almacenamiento de agua en el MBP, en particular con mayor intensidad en la región media-sur de la cuenca.

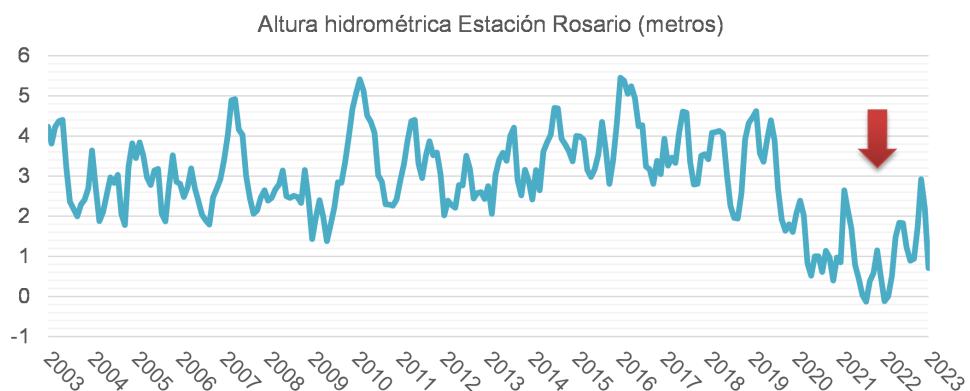


Figura 4. Altura hidrométrica en la estación Rosario, provincia de Santa Fe, período 2003-2022 (Fuente: Prefectura Naval Argentina).

Este fenómeno de déficit de agua coincidió con un evento moderado y prolongado de La Niña (ver Figura 2). De hecho, en la localidad de Rosario, se declaró en ese año la bajante histórica más importante de los últimos 77 años de la cuenca hídrica del río Paraná ([Servicio Meteorológico Nacional \(SMN\), 2023](#)), confirmado por los valores de altura hidrométrica que alcanzaron valores negativos en el mes de enero de 2022 (Figura 4).

Asimismo, en la Tabla 1 se indican las pendientes para los índices ONI (ENSO), y los episodios más relevantes ocurridos en cada período. Las pendientes para esta variable resultaron decrecientes, lo cual en un principio puede relacionarse con la mayor influencia de los eventos Niña por sobre los de El Niño. Por otro lado, a diferencia del TWS y la precipitación, la tendencia más pronunciada y negativa tuvo lugar en el ciclo 2006,5-2009,3, lo que podría estar vinculado con la presencia del episodio más fuerte de la Niña del período 2003-2023 (ver Figura 2).

CONCLUSIONES

La incorporación de tecnologías como la gravimetría satelital y los modelos globales de precipitación, posibilitan la obtención de información sumamente relevante para el estudio del almacenamiento de agua continental en regiones hídricas extensas, como la cuenca del Medio-Bajo Paraná.

Durante el período analizado, las misiones gravimétricas satelitales GRACE y GRACE-FO identificaron los incrementos y las disminuciones significativas de la masa de agua continental. Estos ciclos hidrológicos están influenciados por variaciones estacionales que, a su vez, están estrechamente asociadas con el Niño y La Niña. Los resultados de TWS reflejaron los excesos hídricos ocurridos en 2016 y 2019 en el MBP, así como también los déficits de 2009, 2021 (en particular hacia el sur de la cuenca), y 2022 (en la mayor parte de la región), vinculados respectivamente con los episodios anteriores. En cuanto a las tendencias analizadas entre 2003 y 2022, la más pronunciada y negativa tuvo lugar en el período 2018-2022, influenciada principalmente por un evento extenso y moderado de La Niña.

Finalmente, se puede concluir a partir del TWS derivado de GRACE/FO, que los cambios más significativos en el almacenamiento de agua en la región analizada están vinculados con episodios ENSO moderados a fuertes.

Agradecimientos El presente trabajo fue parcialmente financiado por los proyectos nº 800-201903-0086UR de la Universidad Nacional de Rosario (UNR), y PICT-2021-GRF-TI-00538 del Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCYT).

REFERENCIAS

- Berbery, E. H. & Barros, V. R.** (2002). The hydrologic cycle of the La Plata basin in South America. *Journal of Hydrometeorology*, 3(6), 630–645. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2002\)003<0630:THCOL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2002)003<0630:THCOL>2.0.CO;2)
- Comité Intergubernamental Coordinador de los Países de la Cuenca del Plata (CIC)** (2017). Análisis diagnóstico transfronterizo de la Cuenca del Plata ADT, 1st ed. Reporte técnico, Organización de los Estados Americanos – OEA.
- Cornero, C., Pereira, A., Matos, A. C. O. C., Pacino, M. C., & Blitzkow, D.** (2021). Monitoreo de la variación del almacenamiento de agua en la cuenca del Medio y Bajo Paraná a partir de datos GRACE, GRACE FO, TRMM y GLDAS. *Revista de Teledetección*, 58, 53. <https://doi.org/10.4995/raet.2021.15211>
- Frappart, F., Seoane, L., & Ramillien, G.** (2013). Validation of GRACE-derived terrestrial water storage from a regional approach over South America. *Remote Sensing of Environment*, 137, 69–83. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.06.008>
- Kandus, P., Quintana, R. D., & Bó, R. F.** (2006). Patrones de paisaje y biodiversidad del bajo delta del río paraná. *Pablo Casamajor Ediciones, Buenos Aires*.
- Larkin, N. K. & Harrison, D. E.** (2005). Global seasonal temperature and precipitation anomalies during El Niño autumn and winter. *Geophysical Research Letters*, 32(16), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2005GL022860>
- Save, H., Bettadpur, S., & Tapley, B. D.** (2016). High-resolution CSR GRACE RL05 Mascons. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 3782–3803. <https://doi.org/10.1002/2016JB013007>
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN)** (2009). Boletín Climatológico Otoño 2009. Reporte técnico, Servicio Meteorológico Nacional, Argentina. Programa de Vigilancia del Clima en la Argentina y Región Subantártica Adyacente.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN)** (2019). Boletín Climatológico Enero 2019: Vol. XXXI. Reporte Técnico Issue 1, Servicio Meteorológico Nacional, Argentina.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN)** (2023). Estado del clima en Argentina 2022. Reporte técnico, Servicio Meteorológico Nacional, Argentina. Reporte final.
- Wahr, J.** (2004). Time-variable gravity from GRACE: First results. *Geophysical Research Letters*, 31(11), 20–23. <https://doi.org/10.1029/2004GL019779>