

OBSERVATORIO DE RIEGO Y RECURSOS HÍDRICOS LITORAL NORTE: CERRANDO LA BRECHA ENTRE HIDROLOGÍA Y AGRICULTURA

Rafael Navas^{1*}, Mercedes Gelós¹, Andrés Saracho¹, Gonzalo Medina¹, Álvaro Roel², y
Elena Alvareda¹

RESUMEN: La agricultura irrigada sostenible requiere un manejo equilibrado de los recursos hídricos para armonizar la producción agrícola con la protección ambiental, basándose en ciencia y datos. El objetivo de este trabajo es presentar el Observatorio de Riego y Recursos Hídricos Litoral Norte, el primero en Uruguay en generar información hidrológica a escala productiva, y sus principales hallazgos en hidrología agrícola. El Observatorio estudia las interacciones entre el riego, la calidad del agua y los recursos hídricos en dos cuencas contrastantes desde 2018. La cuenca del Tala, de uso agrícola-ganadero, utiliza riego por inundación y aspersión para cultivos extensivos como arroz, soja y maíz, abasteciéndose de fuentes superficiales. La cuenca del San Antonio, de uso citrícola-hortícola, emplea riego por goteo de fuentes subterráneas. El observatorio es operado por el Departamento del Agua - CENUR Litoral Norte, en dónde se emplean instrumentos autónomos de bajo costo y mediciones esporádicas para caracterizar los sistemas irrigados y sus impactos en el ambiente. Los resultados muestran que los excedentes del riego superficial influyen directamente en el caudal base, mientras que en sistemas abastecidos por aguas subterráneas se identifican conexiones entre el riego y las aguas superficiales y subterráneas. Estos avances no solo mitigan los impactos ambientales asociados al riego, sino que también contribuyen a cerrar la brecha entre la hidrología y la agricultura, integrando conocimientos que promueven una gestión más eficiente y sostenible de los recursos hídricos. En síntesis, el Observatorio proporciona evidencia fundamentada en ciencia y datos que respalda la modelación hidrológica, promueve la hidrometría y favorece a una gestión sostenible del riego, contribuyendo al desarrollo agrícola responsable en Uruguay.

PALABRAS CLAVE: Observatorio de riego y ambiente, caudal base, hidrología agrícola.

¹Departamento del Agua, CENUR – Litoral Norte, Universidad de la República, Uruguay

²Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Treinta y Tres, Uruguay

* rafaelnava23@gmail.com

IRRIGATION AND WATER RESOURCES OBSERVATORY OF THE NORTHERN URUGUAY: BRIDGING THE GAP BETWEEN HYDROLOGY AND AGRICULTURE

ABSTRACT: Sustainable irrigated agriculture requires a balanced management of water resources to harmonize agricultural production with environmental protection, relying on science and data. This work presents the Irrigation and Water Resources Observatory of the North of Uruguay, the first in the country to generate hydrological information at the productive scale, along with its key findings in agricultural hydrology. Since 2018, the Observatory has been studying the interactions between irrigation, water quality, and water resources in two contrasting watersheds. The Tala watershed, characterized by agricultural and livestock production, utilizes surface water for flood and sprinkler irrigation in extensive crops such as rice, soybean, and maize. In contrast, the San Antonio watershed, dominated by citrus and horticultural production, relies on groundwater sources for drip irrigation. Operated by the Department of Water - CENUR Litoral Norte, the Observatory employs low-cost autonomous instruments and sporadic measurements to characterize irrigated systems and their environmental impacts. Results indicate that surface irrigation excesses directly influence baseflow, while in groundwater-fed systems, connections between irrigation, surface water, and groundwater have been identified. These advancements not only mitigate the environmental impacts of irrigation but also bridge the gap between hydrology and agriculture, integrating knowledge that promotes more efficient and sustainable water resource management. In summary, the Observatory provides evidence-based insights that support hydrological modeling and foster sustainable irrigation management, contributing to responsible agricultural development in Uruguay.

KEYWORDS: Irrigation and environmental observatory, baseflow, agricultural hydrology.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la agricultura irrigada en Uruguay ha impulsado la necesidad de desarrollar estrategias de manejo sostenible del agua que permitan equilibrar la producción agrícola con la conservación de los ecosistemas (Mer et al., 2020). La gestión eficiente de los recursos hídricos es clave para garantizar la sostenibilidad a largo plazo, especialmente en un contexto de variabilidad climática y creciente demanda de agua (Vervoort et al., 2023). En este sentido, la toma de decisiones basada en ciencia y datos a escala productiva es fundamental para optimizar el uso del agua en la agricultura y minimizar sus impactos ambientales (Hastings et al., 2023).

El riego es un factor determinante en la productividad agrícola, pero su expansión conlleva desafíos relacionados con la cantidad y calidad del agua, la recarga de acuíferos, el caudal ambiental y la sostenibilidad de los sistemas hidrológicos (Ketchum et al., 2023). Comprender la dinámica del agua en sistemas irrigados requiere un enfoque integral que contemple las interacciones entre el riego, el clima, la hidrología superficial y subterránea, la calidad del agua y los manejos agrícolas. En Uruguay, la información hidrológica a escala productiva es limitada, lo que dificulta el diseño de estrategias de manejo adaptadas a las condiciones locales (Mazzeo et al., 2024).

En respuesta a esta necesidad, surge el Observatorio de Riego y Recursos Hídricos Litoral Norte (ORRH), una iniciativa pionera en Uruguay que busca generar conocimiento sobre los impactos del riego en distintos sistemas productivos. El ORRH tiene foco en dos cuencas contrastantes, e integra ciencia y datos observacionales. La cuenca del San Antonio, destinada al riego para cultivos cítricos y hortícolas, se abastece principalmente de fuentes subterráneas (Erasun et al., 2020; Navas et al., 2025). Por su parte, la cuenca del Tala, utilizada para la agricultura y ganadería, se surte de aguas superficiales para el riego de arroz, soja y maíz (Saracho et al., 2024). En este contexto, el ORRH desempeña un papel clave al proporcionar las primeras evidencias científicas en Uruguay sobre las interacciones entre el riego y los recursos hídricos, fomentando una gestión más eficiente y equitativa. Su contribución es esencial en la actual coyuntura del Uruguay donde la reglamentación para caudales ambientales (decreto N° 368/018) tiene carácter provisorio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ORRH (Figura 1) se encuentra ubicado al noroeste de Uruguay en el departamento de Salto. En él se encuentran la cuenca del San Antonio y la cuenca del Tala. El San Antonio (225 km²) se caracteriza principalmente por horticultura a campo abierto, citricultura y pasturas (Navas et al., 2025). El sistema de monitoreo incluye 12 pozos de observación de agua subterránea, 3 estaciones hidrométricas y 14 pluviómetros en la región de influencia. Por otro lado, la cuenca del Tala (120 km²) se caracteriza por agricultura extensiva (arroz, soja, maíz) y ganadería (Saracho et al., 2024). Tiene registros de nivel y caudal en 5 sitios, 5 estaciones de precipitación y sensores para el registro de niveles de aguas en canales de riego, embalses y aguas subterráneas.

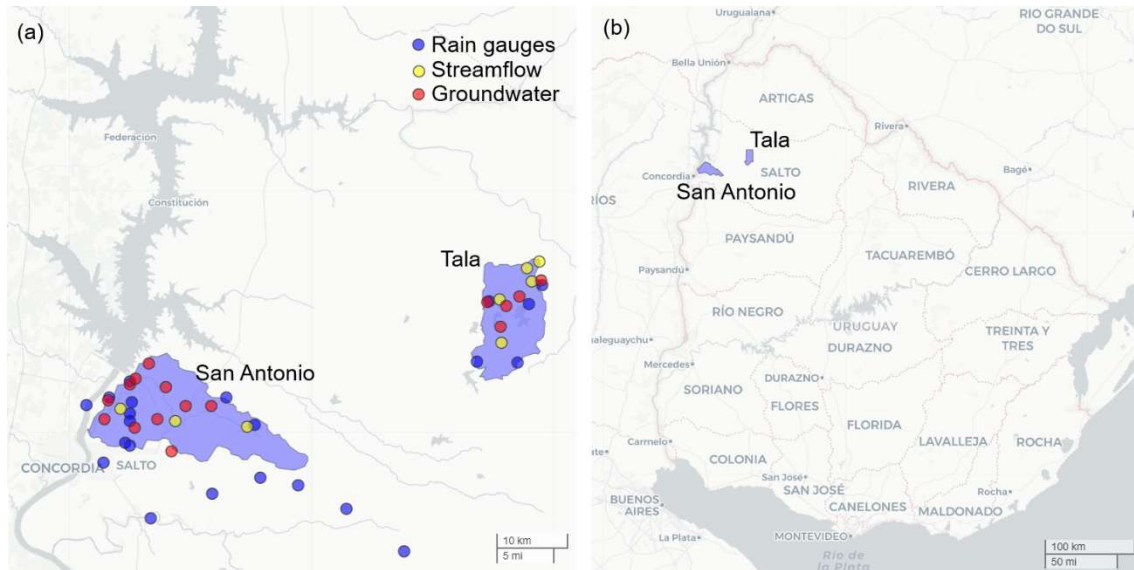


Figura 1. Instrumentación del Observatorio de Recursos Hídricos y Riego (a) y posición relativa de las cuencas experimentales (b).

Los métodos de análisis incluyen modelos hidrológicos de aguas superficiales/subterráneas. Algunos de los modelos para la cuenca del San Antonio son: el WFLOW-HBV (Navas et al., 2022), el cual es un modelo distribuido disponible en el repositorio SanAntonioApp (Navas, 2021), el modelo semi-distribuido SWAT+ standalone (Gelos et al., 2024), el SWAT+gwflow (Navas et al., 2025), el MODFLOW (Erasun et al., 2020) y el HEC-HMS que ha sido utilizado para introducir a los estudiantes en la modelación hidrológica en los cursos de la Licenciatura en Recursos Hídricos y Riego. Por otra parte, la cuenca del Tala tiene implementado el modelo SWAT2012 (Saracho et al., 2024), el SWAT+ y el modelo Témez.

Por otro lado, el ORRH también ha aportado información para la calibración de canales aforadores (Navas et al., 2023) y la determinación de curva de carga de nutrientes (Navas et al., 2024). Esto se ha realizado mediante inferencia bayesiana para incorporar la incertidumbre. Otro aspecto interesante del ORRH es que sirve como laboratorio para la prueba de nuevas tecnologías de medición. Este es el caso de la evaluación de la atenuación de señales de telefonía celular como predictor de la precipitación (Sapriza-Azuri et al., 2019). La cuantificación del flujo de retorno de riego a partir de conductividad eléctrica (investigación de maestría, Ing. Agr. Gonzalo Medina). La estimación de Sólidos Totales en Suspensión mediante la interpretación de la relación señal-ruido de mediciones acústicas (trabajo de grado, Br. Emiliano Queiros), la optimización del diseño de una regla de carga de velocidad (Pike et al., 2016) para la medición de caudales en canales de riego con baja carga hidráulica (Investigación de Ing. Civ. Juan Esteban Waldbilling). La implementación de pruebas audiomagnetotélúricas para la estimación de reservas de agua subterráneas (Ramos et al., 2024). Así como métodos isotópicos para la identificación del origen de las aguas (Song et al., 2023), con potenciales aplicaciones para la cuantificación de los excesos del riego en los sistemas irrigados de Uruguay.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Luego de sus primeros años de operación, se presenta un breve resumen de los principales hallazgos del ORRH. En la cuenca del San Antonio, se simula una expansión del riego de la citricultura de 6193 a 8561 ha irrigadas mediante fuentes subterráneas. La Figura 2 muestra la relación entre el incremento del riego, los descensos en los niveles de agua del acuífero y los cambios en los caudales superficiales del arroyo, los resultados sugieren un impacto menor tanto en el caudal base como en los niveles de agua subterránea (Navas et al., 2025). A su vez, se elaboró una herramienta para la estimación de las curvas de duración de caudales (Navas et al., 2022). La herramienta permite visualizar de forma interactiva las curvas de duración de caudales en cualquier parte de la cuenca. Este tipo de visualizaciones podría ser extrapolada a todo el Uruguay para una estimación estandarizada de la frecuencia de caudales que integre la hidrología de las cuencas con aplicaciones directas en la estimación de caudales ambientales. Adicionalmente, los estudios específicos de hidrogeología aportan información de las reservas de agua subterránea (Erasun et al.,

2020; Ramos et al., 2024), mejorando el conocimiento de los flujos que, en condiciones de estiaje, constituyen componentes sensibles al caudal ambiental.

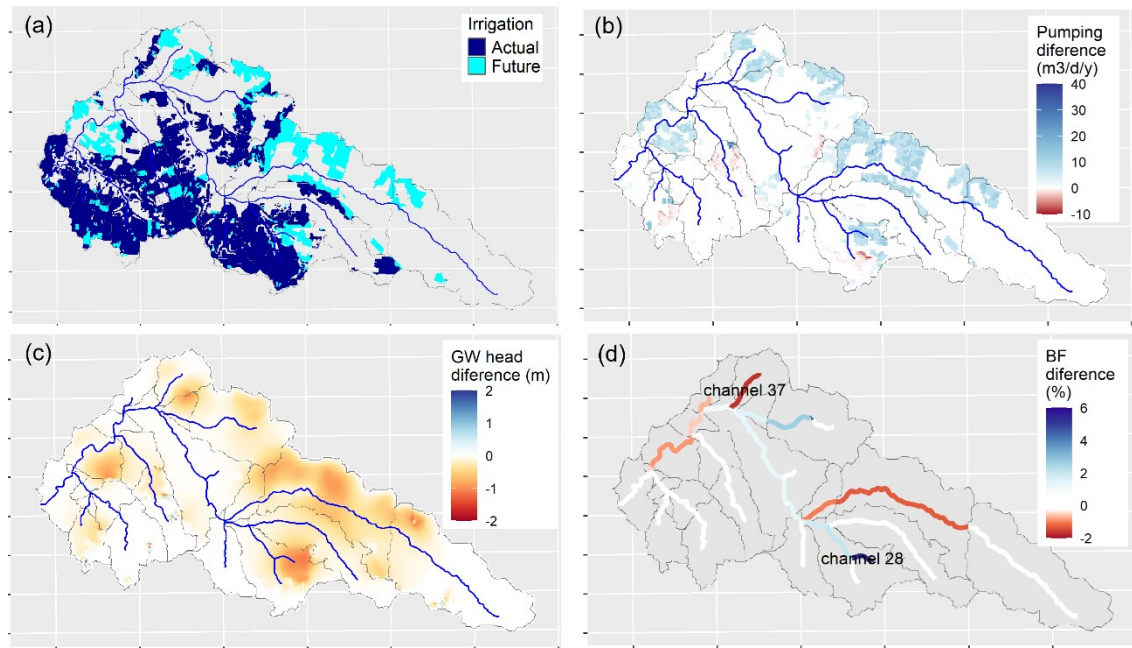


Figura 2. Efecto de la expansión del riego en la cuenca del San Antonio.

La cuenca del Tala, por su parte, ha demostrado, tanto con datos como con modelación hidrológica (Saracho et al., 2024), que los excesos del riego pueden incorporarse al cauce natural. La Figura 3 muestra los caudales para los meses de diciembre y enero en las zafras de los años 19/20, 22/23 y 24/25. El período 19/20 fue húmedo, con una precipitación de 303 mm. Se observó una fluctuación sistemática que inicialmente atribuimos a posibles fugas de agua en los canales debido al bombeo intermitente que en esos años se hacía. Al año siguiente, se comenzó a bombear agua de forma continua. El período diciembre 22/23 registró una precipitación promedio de 123 mm. Durante esta zafra, la zona de riego se ubicó fuera del área de drenaje de la estación de caudal, por lo que las fluctuaciones en los caudales dejaron de observarse, lo que sugiere que estaban relacionadas con los excesos de agua del riego. En contraste, el período 24/25 fue seco, con sólo 50 mm de precipitación. En este caso, la zona de cultivo volvió a ubicarse cerca del arroyo y reaparecieron las fluctuaciones en los caudales. Estos resultados descartan la hipótesis de que los aportes al cauce provengan exclusivamente de las pérdidas por bombeo intermitente en los canales de riego. Así, surge una nueva hipótesis: las pérdidas superficiales, debidas al excedente de agua que sobrepasa la altura de las taipas, y las pérdidas subterráneas, por infiltración en las

chacras, podrían estar contribuyendo al aumento del caudal en el cauce natural. Además, la inundación del arroz, con cambios diarios en la lámina de agua debido al riego con melgas, podría favorecer la identificación del efecto del riego en el arroyo, donde las pérdidas del riego representan aportes suplementarios del caudal. Un aspecto interesante es que, con menos de la mitad de la precipitación, el período 24/25 duplica el caudal registrado en 22/23, lo que demuestra que la actividad de riego en cultivos de arroz genera aportes significativos aguas abajo de los sistemas irrigados.

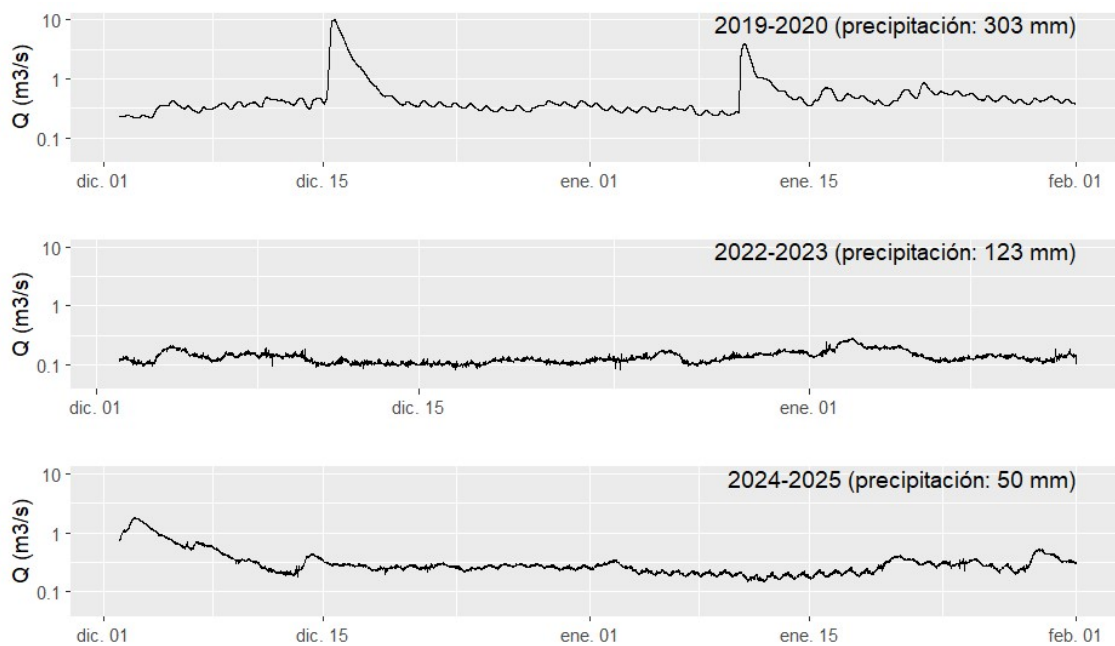


Figura 3. Caudales registrados en el cauce natural en la cuenca del tala. Zafra 2019-2020 y 2024-2025 riego aguas arriba de la estación de caudal. Zafra 2022-2023 riego aguas abajo de la estación de caudal.

CONCLUSIONES

Los primeros años de operación del ORRH han permitido avanzar en el conocimiento hidrológico e hidrogeológico de las cuencas del San Antonio y del Tala, proporcionando información clave para la gestión de los recursos hídricos en contextos de uso agrícola intensivo.

En la cuenca del San Antonio, la modelación de la expansión del riego citrícola indica que un aumento en la superficie irrigada mediante fuentes subterráneas genera un impacto menor tanto en los niveles del acuífero como en los caudales superficiales.

Asimismo, el desarrollo de una herramienta interactiva para la estimación de curvas de duración de caudales representa un avance, con potencial para su aplicación en todo Uruguay.

En la cuenca del Tala, se ha evidenciado que los excesos del riego pueden incorporarse al cauce natural, influenciando los caudales superficiales. La ubicación de los arrozales respecto al arroyo juega un papel determinante en los aportes del riego al cauce natural. El análisis de diferentes periodos de riego plantea la posibilidad de que estos los aportes se deban a pérdidas de agua superficial cuando el nivel del agua excede la altura de las taipas.

Estos hallazgos reflejan la estrecha relación entre hidrología y agronomía, evidenciando la necesidad de un enfoque integrado para abordar los desafíos en la gestión del agua en sistemas productivos. La combinación de herramientas hidrológicas, y conocimientos agronómicos permite reducir la brecha entre ambas disciplinas y dar respuesta a preguntas actuales. El análisis integrado de estos factores no solo facilita la identificación de impactos del riego sobre los recursos hídricos, sino que también contribuye a la implementación de estrategias de manejo más eficientes y sostenibles.

El conocimiento generado a partir de estos estudios constituye una base sólida para fortalecer la colaboración entre hidrólogos y agrónomos, promoviendo soluciones innovadoras que equilibren la producción agrícola y la conservación ambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Erasun, V., Campet, H., Vives, L., Blanco, G., Banega, R., Sapriza, G., Gaye, M., Ramos, J., Alvareda, E., Gamazo, P., Saracho, A., 2020. Modelación del Sistema Acuífero Salto Arapey (Uruguay). *Rev. Lat.-Am. Hidrogeol.* 11, 68–75.

Gelos, M., Alvareda, E., Da Rocha, S., Monetta, A., Manzi, M., Wlasiuk, B., Navas, R., 2024. Enhancing water quality assessment tools for a sustainable future: addressing individual impacts on surface and groundwater in an intense crop production catchment using a novel SWAT+, GWFLOW, and GAMM model design. Texas A&M University, Ifrane, Morocco.

Hastings, F., Pérez-Bidegain, M., Navas, R., Gorgoglione, A., 2023. Impacts of irrigation development on water quality in the San Salvador watershed (Part 1):

Assessment of current nutrient delivery and transport using SWAT. *Agrociencia Urug.* 27, e1198–e1198. <https://doi.org/10.31285/AGRO.27.1198>

Ketchum, D., Hoyleman, Z.H., Huntington, J., Brinkerhoff, D., Jencso, K.G., 2023. Irrigation intensification impacts sustainability of streamflow in the Western United States. *Commun. Earth Environ.* 4, 1–8. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01152-2>

Mazzeo, N., Ciganda, A.L., Fernández Nion, C., Peñas, F.J., González-Ferreras, A.M., Crisci, C., Zurbriggen, C., Pérez, D., Barquin, J., Díaz, I., 2024. Inter and transdisciplinarity strategies for evaluating and improving water quality monitoring systems: Uruguay as a study case. *Environ. Sci. Policy* 154, 103699. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103699>

Mer, F., Baethgen, W., Vervoort, R.W., 2020. Building trust in SWAT model scenarios through a multi-institutional approach in Uruguay. *Socio-Environ. Syst. Model.* 2, 17892–17892. <https://doi.org/10.18174/sesmo.2020a17892>

Navas, R., 2021. rafaelnavas/SanAntonioApp: SanAntonioApp. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5223882>

Navas, R., Alvareda, E., Da Rocha, S., Gamazo, P., Gelos, M., Saracho, A., 2024. Inferencia bayesiana de curvas de carga de nutrientes para en el arroyo San Antonio - Uruguay. Presented at the XXXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Medellín.

Navas, R., Erasun, V., Banega, R., Sapriza, G., Saracho, A., Gamazo, P., 2022. SanAntonioApp: interactive visualization and repository of spatially distributed flow duration curves of the San Antonio Creek - Uruguay. *Agrociencia Urug.* 26, e979–e979. <https://doi.org/10.31285/AGRO.26.979>

Navas, R., Gelós, M., Bailey, R., 2025. Quantifying Baseflow Changes Due to Irrigation Expansion Using SWAT+gwflow. <https://doi.org/10.20944/preprints202502.0559.v1>

Navas, R., Monetta, A., Roel, Á., Blanco, N., Gil, A., Gamazo, P., 2023. Calibración de canales aforadores en sistemas irrigados mediante el procesamiento de imágenes de video y la inferencia bayesiana. *Agrociencia Urug.* 27, e1182–e1182. <https://doi.org/10.31285/AGRO.27.1182>

Pike, R.G., Redding, T.E., Schwarz, C.J., 2016. Development and testing of a modified transparent velocity-head rod for stream discharge measurements. *Can. Water Resour. J. Rev. Can. Ressour. Hydr.* 41, 372–384. <https://doi.org/10.1080/07011784.2015.1127776>

Ramos, J., Blanco, G., Carráz-Hernández, O., Corbo-Camargo, F., Rodríguez-Miranda, W., Saracho, A., Borrero, A., Bessone, L., Alvareda, E., Gamazo, P., 2024. Geophysical study of the Salto–Arapey Aquifer System in Salto, Uruguay. *J. South Am. Earth Sci.* 146, 105071. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.105071>

Sapriza-Azuri, G., Gamazo, P., Erasun, V., Banega, R., Poses, A., Navas, R., Alcoba, M., Gosset, M., 2019. Rainfall estimation by microwave links in Uruguay: First results, 5229.

Saracho, A., Navas, R., Gamazo, P., Alvareda, E., 2024. Assessing impacts of irrigation on flows frequency downstream of an irrigated agricultural system by the SWAT model, in: Proceedings of IAHS. Presented at the IAHS2022 – Hydrological sciences in the Anthropocene - IAHS Scientific Assembly 2022, Montpellier, France, 29 May – 3 June 2022, Copernicus GmbH, pp. 423–427. <https://doi.org/10.5194/piahs-385-423-2024>

Song, Y., Yan, D., Liu, T., Lu, Y., Jiao, R., Wen, Y., Qin, T., Weng, B., Shi, W., 2023. The suitability of isotopic methods in identifying water sources of a shallow-rooted herbaceous plant in a desert steppe. *Sci. Total Environ.* 902, 166072. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166072>

Vervoort, R.W., Nervi, E., Baethgen, W., 2023. Integrated catchment models for policy development and decision making. *Agrociencia Urug.* 27, e1194–e1194. <https://doi.org/10.31285/AGRO.27.1194>