

MONITOREO SATELITAL DE EMBALSES PARA RIEGO EN URUGUAY

Federico Campos ¹; Ignacio Fuentes ²; Federico Ernst ¹; Rafael Navas ³

RESÚMEN: El riego en la agricultura consume más del 70% del agua a nivel mundial. En Uruguay el cultivo regado más importante es el arroz con 140,000- 200,000 hectáreas anuales sembradas. La mitad del agua utilizada proviene de las represas. El monitoreo tradicional es costoso, limitando la planificación y distribución eficiente del recurso. Las imágenes satelitales ofrecen una alternativa económica para monitorear recursos hídricos, destacando las plataformas Sentinel-2 y Sentinel-1 del programa europeo Copernicus. Sentinel-2, con sensores multibanda y resolución de 10-30 metros, permite calcular índices como el Normalized Difference Water Index para medir superficies de agua. Sentinel-1, con sensores radar y resolución de 10 metros, opera en cualquier clima y condición. Este estudio, fue realizado entre 2018 y 2024 en el embalse "India Muerta", utilizando imágenes de Sentinel 1 y 2 procesadas en Google EarthEngine mediante Python. Las superficies de agua se generaron a intervalos de 20 cm basándose en modelos digitales de elevación y datos de campo. Con imágenes de Sentinel 2 se utilizaron filtros de nubes, y se buscó minimizar errores estudiando el rango de NDWI entre -0.4 y 0.4. Con imágenes de Sentinel 1 y el algoritmo de Otsu se determinó para cada imagen el umbral óptimo para detectar agua. Los resultados mostraron que Sentinel 2 obtuvo mejor resultado que Sentinel 1 con mayor precisión ($R^2 = 0.88$ frente a 0.77), menor error absoluto medio (MAE = 7.92 frente a 13.43) y menor error cuadrático medio (RMSE = 12.76 frente a 17.15). Esto resalta la eficacia de los umbrales adaptativos de NDWI frente a métodos basados en imágenes radar. El monitoreo satelital aporta datos clave para gobiernos y agricultores, optimizando la gestión del agua y enfrentando la escasez hídrica. Este enfoque de bajo costo complementa los métodos tradicionales, mejorando la planificación y sostenibilidad del riego en regiones dependientes de la agricultura.

PALABRAS CLAVE: sensoramiento remoto, embalses, agua, riego, arroz

¹Universidad Tecnológica del Uruguay, UTEC - Instituto Tecnológico Regional Centro Sur

²Universidad de Chile

³Departamento del Agua, CENUR - Litoral Norte

SATELLITE MONITORING OF RESERVOIRS FOR IRRIGATION IN URUGUAY

ABSTRACT: Irrigation in agriculture consumes more than 70% of the water worldwide. In Uruguay, the most important irrigated crop is rice, with 140,000- 200,000 hectares planted annually. Half of the water used comes from reservoirs. Traditional monitoring is costly, limiting efficient resource planning and distribution. Satellite imagery offers an economical alternative for monitoring water resources, highlighting the Sentinel-2 and Sentinel-1 platforms of the European Copernicus program. Sentinel-2, with multi-band sensors and a resolution of 10-30 meters, allows the calculation of indices such as the Normalized Difference Water Index to measure water surfaces. Sentinel-1, with radar sensors and a resolution of 10 meters, operates in any weather and condition. This study, conducted between 2018 and 2024 at the "India Muerta" reservoir, used Sentinel 1 and 2 images processed in Google Earth Engine via Python. Water surfaces were generated at 20 cm intervals based on digital elevation models and field data. Sentinel 2 images used cloud filters, and efforts were made to minimize errors by studying the NDWI range between -0.4 and 0.4. Using Sentinel 1 images and the Otsu algorithm, the optimal threshold for detecting water was determined for each image. Results showed that Sentinel 2 achieved better results than Sentinel 1 with higher accuracy ($R^2 = 0.88$ vs. 0.77), lower mean absolute error ($MAE = 7.92$ vs. 13.43), and lower root mean square error ($RMSE = 12.76$ vs. 17.15). This highlights the effectiveness of adaptive NDWI thresholds compared to radar-based methods. Satellite monitoring provides key data for governments and farmers, optimizing water management and addressing water scarcity. This low-cost approach complements traditional methods, improving planning and sustainability of irrigation in agriculture-dependent regions.

KEYWORDS: remote sensing, dam, reservoir, water, irrigation, rice

INTRODUCCIÓN

El arroz es el principal cultivo regado del Uruguay, representando más del 80% de la superficie de cultivos regados del país, utilizando más del 90% del agua destinada a riego a nivel nacional(DIEA - MGAP, 2018). Dicho cultivo ocupa un área que oscila entre 140 y 200 mil hectáreas anuales (FAO-STATS, 2024),ubicadas principalmente en la región Este (75.6%), Centro (8.4%) y Norte (15.9%). Del área total, alrededor del 45% es regado a partir de embalses, mientras el restante 55% se riega a partir de bombeos de fuentes de agua naturales como ríos o arroyos(DIEA - MGAP, 2021).

Dado que los embalses son una fuente clave de agua para el riego de arroz, es esencial que los agricultores conozcan la cantidad de agua almacenada. Esta información les permite planificar adecuadamente las áreas de siembra; y administrar el agua durante el ciclo del cultivo para maximizar los rendimientos,mitigando la variabilidad y efectos del cambio climático, gestionando de manera eficiente los recursos naturales.

Bentancor et al. (2018)señalan que es posible hacer un mejor uso del recurso hídrico optimizando la distribución de agua de riego, minimizando las pérdidas por escorrentía e infiltración, así como el desperdicio en los sistemas de conducción. En la actualidad, el cobro por el uso del agua en sistemas de riego colectivos se basa en una tarifa fija por hectárea sembrada, sin considerar el volumenconsumido. La implementación de mediciones de caudales y volúmenes de agua utilizados contribuiría a avanzar en el sentido de una gestión más eficiente del agua.Si bien actualmente existen herramientas para medir caudales y volúmenes de agua en embalses, su implementación a nivel productivo ha sido limitada debido a sus altos costos.

En la actualidad, existen diversas herramientas de acceso libre que permiten el análisis de grandes bases de datos geoespaciales sin la necesidad de contar con software especializado o hardware de alto rendimiento. Estas plataformas en la nube han revolucionado el estudio del medio ambiente al ofrecer acceso a imágenes satelitales y datos geoespaciales de manera sencilla y eficiente.Una de las más destacadas es Google Earth Engine (GEE). Esta plataforma permite el procesamiento y análisis de imágenes satelitales en la nube. Gracias a su capacidad de manejar grandes volúmenes de datos y su compatibilidad con lenguajes de programación como Python y JavaScript, GEE se ha convertido en una herramienta fundamental para estudios ambientales, monitoreo del cambio climático y gestión de recursos naturales.

Algunas décadasatrás, el acceso a estas capacidades estaba restringido a centros de investigación y universidades con recursos tecnológicos avanzados. El procesamiento de

imágenes satelitales y datos geoespaciales requería equipos costosos y software especializado, lo que limitaba su uso a un grupo reducido de expertos. Hoy en día, la disponibilidad de herramientas de acceso libre ha transformado este panorama, democratizando el estudio del medio ambiente.

Este trabajo de investigación tiene como objetivo desarrollar y evaluar metodologías para la estimación del volumen de agua almacenado en embalses destinados al riego, utilizando imágenes satelitales de Sentinel-1 y Sentinel-2 procesadas en la plataforma Google EarthEngine.

La presente investigación se enmarca en un proyecto interinstitucional orientado al desarrollo de instrumentos y soluciones tecnológicas de bajo costo para la gestión eficiente de los recursos hídricos. Este proyecto busca fomentar la adopción de tecnologías innovadoras que permitan tanto el control de caudales en tiempo real en sistemas de conducción, como el monitoreo continuo de los volúmenes de agua almacenados en embalses.

MATERIAL Y MÉTODOS

El presente estudio fue desarrollado entre diciembre de 2018 y mayo de 2024 en el embalse India Muerta, ubicado en el departamento de Rocha, en la zona este de Uruguay. Este embalse, situado en las coordenadas 33°56'11.05"S y 54°15'41.31"O, fue construido en 1983, actualmente es administrado por COMISACO S.A. y desempeña un papel fundamental en el almacenamiento y distribución de agua para riego en la región.

India Muerta cuenta con una superficie de inundación de 3.550 hectáreas en su cota máxima de 47 metros sobre el nivel del mar y un volumen útil de almacenamiento de 135 millones de metros cúbicos.

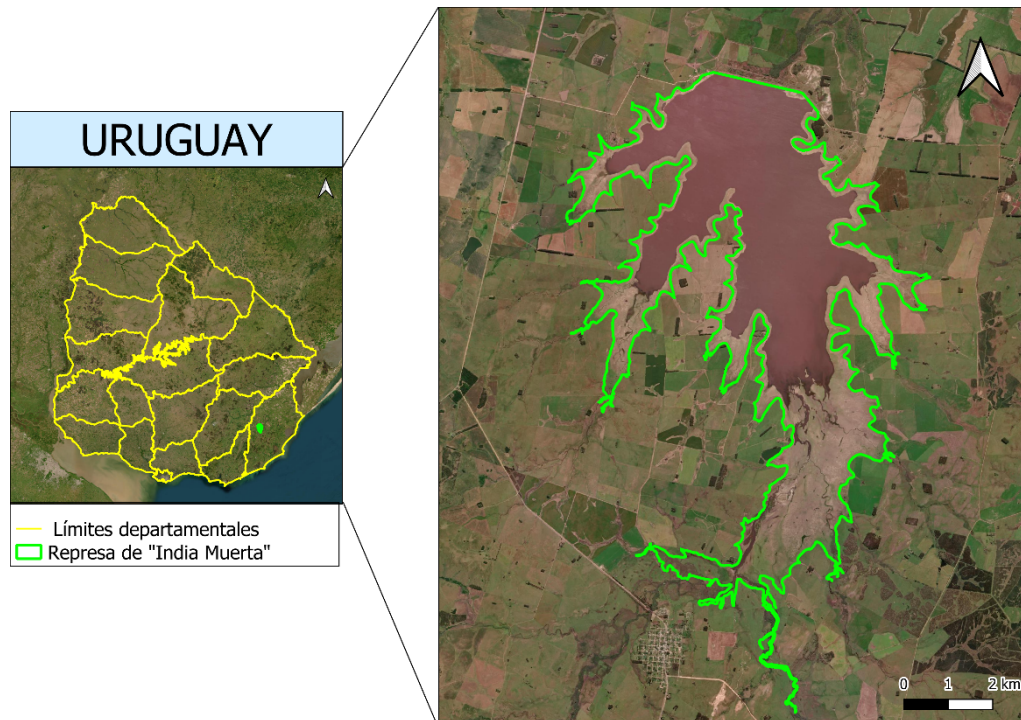


Figura 1. Localización del área de estudio: embalse de “India Muerta”, Departamento de Rocha, Uruguay.

Los dos modelos de procesamiento desarrollados en este trabajo tienen como objetivo determinar la superficie de agua del lago durante el período de estudio. Esto permite calcular el volumen de agua almacenado en el embalse mediante las ecuaciones que vinculan la cota de inundación con el área del lago y el volumen almacenado.

Previo al desarrollo de los modelos, se generaron superficies de inundación a intervalos de 20 cm de elevación a partir del modelo digital de terreno (MDT) de la superficie de almacenamiento del embalse y de los datos proporcionados por sensores de cota instalados in situ. Este procedimiento permitió establecer una relación detallada entre la altura de agua y la extensión de la superficie inundada en diferentes condiciones de almacenamiento. Posteriormente, se creó una capa multibanda, en la cual cada intervalo de elevación está representado por una banda específica, asociando cada nivel de agua con su respectiva superficie inundada.

En el primer modelo desarrollado (Modelo A), se trabajó con una colección de imágenes de Sentinel-2, una constelación de satélites del programa Copernicus de la Unión Europea. Estos satélites están equipados con sensores multibanda pasivos, los cuales captan la radiación reflejada por la superficie terrestre en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético. Sentinel-2 ofrece una resolución espacial de entre 10 y 30 metros, dependiendo de la banda espectral utilizada, y cuenta con un período de revisita de

aproximadamente 5 días, lo que permite obtener imágenes frecuentes del área de estudio. Sin embargo, al tratarse de sensores ópticos, su desempeño puede verse afectado por condiciones climáticas y atmosféricas adversas, como la presencia de nubes, lluvia, tormentas o altos niveles de humedad, lo que puede dificultar la obtención de datos continuos y precisos en ciertas épocas del año.

El primer paso del modelo consiste en generar una colección de imágenes de Sentinel-2 para el período de estudio, aplicando un filtro de nubes que elimina aquellas imágenes en las que más del 20% de los píxeles están ocupados por nubes y sombras.

En segundo lugar, se calcula el índice vegetal NDWI (Índice de Diferencia Normalizada de Agua) para cada imagen de la colección. Este índice utiliza las bandas 3 (0.54-0.58 μm) y 8 (0.76-0.90 μm). La fórmula para calcular el NDWI es: $(\text{verde}-\text{NIR})/(\text{verde}+\text{NIR})$ (McFeeters, 1996). Este índice es altamente sensible para la detección de superficies de agua y suelo cubierto por vegetación, siendo poco afectado por el efecto de dispersión causado por aerosoles atmosféricos (Gao, 1996).

A continuación, se delimita el área de estudio mediante un recorte de cada imagen de la colección de NDWI, lo que permite reducir los requerimientos de procesamiento y minimizar la posible interferencia de otros cuerpos de agua cercanos. Luego, se realiza un segundo filtrado de la colección de imágenes, eliminando aquellas en las que más del 30% de los píxeles estén ocupados por nubes o sombras dentro del área de estudio.

Finalmente se itera la imagen de NDWI de cada fecha de la colección y se estudia el error entre volúmenes predichos y observados en el rango de NDWI entre -0.4 y 0.4 con el fin de determinar el umbral óptimo.

En el segundo modelo desarrollado (B) se generó una colección de imágenes de reflectancia SAR (Radar de Apertura Sintética) obtenido a partir de imágenes de los satélites Sentinel-1. Este tipo de sensor activo es sensible a la rugosidad y humedad de las superficies, por lo que es muy útil para la teledetección de cuerpos de agua, vegetación, e incluso suelo con diferentes grados de humedad. La resolución espacial de estas imágenes es de 10m con un período de revisita de 6 días.

A diferencia de las imágenes obtenidas con sensores pasivos, las imágenes de SAR no se ven afectadas por condiciones meteorológicas o atmosféricas adversas. Dicha capacidad hace que su uso sea muy beneficioso en regiones donde hay frecuente presencia de nubes o sombras. La obtención de este tipo de imágenes puede realizarse en cualquier momento del día sin importar las condiciones de luz (Shen et al., 2022; Li et al., 2023; Xie et al., 2023)..

Cada imagen de la colección Sentinel-1 es procesada con el algoritmo Otsu(Otsu et al., 1979) para determinar el valor de umbral de reflectancia óptimo para reconocer las superficies de agua. Este algoritmo trabaja de forma automática, no paramétrica, y no supervisada. El mismo tiene un uso muy extendido y comprobado en Google EarthEngine (Vanthof y Kelly., 2019).

Finalmente, para ambos modelos se calculan los volúmenes de agua almacenados a partir de las curvas de cota-volumen del embalse y se contrastan con registros de volumen calculados a partir de registros de cota del lago observados in situ.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En términos generales ambos modelos desarrollados logran un r^2 superior a 0.75 (Figura 2) pudiendo considerarse que tienen un ajuste de aceptable a bueno (Moriasi et al., 2007). El modelo que utiliza imágenes de Sentinel-2 tiene aun mejor ajuste con los datos observados, por lo que el 88% de la variabilidad en los datos observados es explicada por este modelo. En cambio, el desempeño del modelo que utiliza imágenes de Sentinel-1 tiene menor ajuste con los datos observados in situ, explicando 77% de la variabilidad entre datos estimados vs datos observados.

El error cuadrático medio (RMSE) del modelo A es menor en comparación con el modelo B (12.76 vs 17.15). En el mismo sentido, el error absoluto medio (MAE) es menor en el modelo A en comparación con el modelo B (7.92 vs 13.43).

Finalmente, el sesgo (BIAS) indica que ambos modelos subestiman levemente el volumen almacenado, siendo menor la subestimación en el modelo A cuando es comparado con el modelo B (-5.43) vs (-10.16).

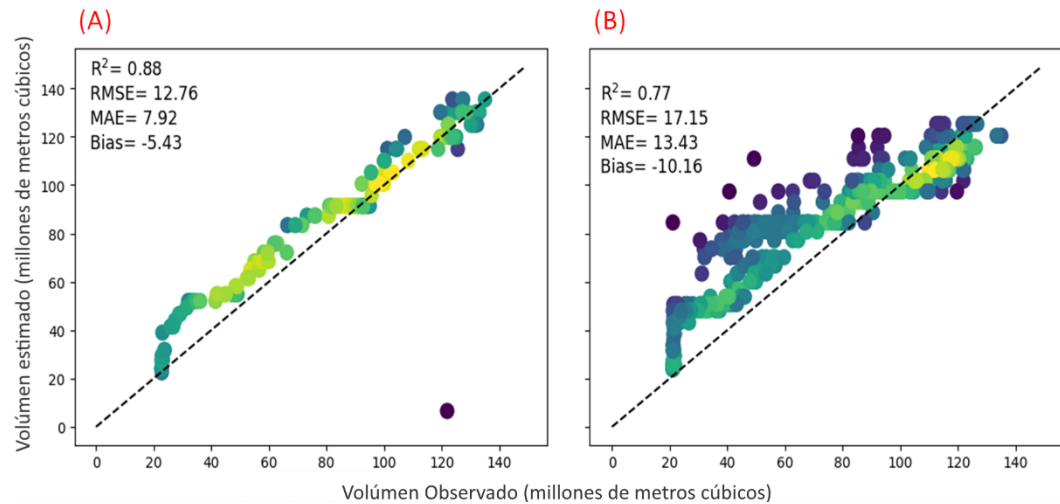


Figura 2.Desempeño comparativo de los modelos desarrollados para lapredicción de Volumen de agua en embalses. (A) Modelo desarrollado a partir de imágenes Sentinel-2. (B) Modelo desarrollado a partir de imágenes de reflectancia de Sentinel-1.

CONCLUSIONES

El monitoreo satelital de embalses proporciona datos cruciales tanto para los responsables de las políticas vinculadas al manejo de los recursos hídricos como para los agricultores. Para los gobiernos, facilita la identificación y planificación de embalses, asegurando un uso equitativo del agua. Para los agricultores, ofrece una herramienta confiable para optimizar el riego y mejorar la gestión del agua. Además, ayuda a gestionar la escasez de agua para riego y aborda los desafíos relacionados con la escasez de agua en la agricultura de regadío en el presente como en el futuro. Este enfoque representa una alternativa de bajo costo respecto a los métodos tradicionales de monitoreo de volúmenes de embalses, cerrando la brecha en la gestión continua de los recursos hídricos en muchas regiones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENTANCOR, L., DURÁN LEVRERO, P., RUIZ, A., & CASTAÑO, V. Tecnologías De Medición Y Transmisión De Datos En Sistemas De Riego Por Gravedad, 2018.
- BRISCO, B., ULABY, F. T., AND DOBSON, M. C. (1983), Spaceborne SAR data for land-cover classification and change detection. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Syrup. (IGARSS'83) Digest, Vol. 2, See. PS-2, pp. 1.1-1.8.

D. N. MORIASI, J. G. ARNOLD, M. W. VAN LIEW, R. L. BINGNER, R. D. HARMEL, T. L. VEITH, 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. Transactions of the ASABE 50, 885–900.

<https://doi.org/10.13031/2013.23153>

DIEA - MGAP. EncuestaArrocera. 2021.

DIEA - MGAP. Informe sobre riego en Uruguay. 2018.

FAO, FAOSTAT Database Collections. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Food outlook biannual report on global food markets, Rome, 2018. Nov. 2018. Accessed on: 2019. URL, <http://www.fao.org/faostat>.

GAO, B.C., 1996, (NDWI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment, 58, pp. 257–266.

LI, H., XU, Z., ZHOU, Y., HE, X., HE, M., 2023. Flood Monitoring Using Sentinel-1 SAR for Agricultural Disaster Assessment in Poyang Lake Region. Remote Sensing 15, 5247. <https://doi.org/10.3390/rs15215247>

MCFEETERS, S.K., 1996, The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, 17, pp. 1425–1432.

OTSU, N., SMITH, P. L., REID, D. B., Environment, C., Palo, L., Alto, P., & Smith, P. L. (1979). Otsu 1979 Otsu Method. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, C(1), 62–66.

SHEN, G., FU, W., GUO, H., LIAO, J., 2022. Water Body Mapping Using Long Time Series Sentinel-1 SAR Data in Poyang Lake. Water 14, 1902. <https://doi.org/10.3390/w14121902>

VANTHOF, V., & KELLY, R. (2019). Water storage estimation in ungauged small reservoirs with the TanDEM-X DEM and multi-source satellite observations. *Remote Sensing of Environment*, 235(September), 111437. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111437>

XIE, Y., ZENG, H., YANG, K., YUAN, Q., YANG, C., 2023. Water-Body Detection in Sentinel-1 SAR Images with DK-CO Network. Electronics 12, 3163. <https://doi.org/10.3390/electronics12143163>