

ESTIMACIÓN DE TURBIDEZ DE UNA LAGUNA MEDIANTE MUESTREOS DE CAMPO Y TELEDETECCIÓN SATELITAL EN EL NEA

Gauto, Víctor^{1,2}; Utgés, Enid¹; Hervot, Elsa¹; Tenev, Daniela¹; Farías, Alejandro¹

¹Grupo de Investigación Sobre Temas Ambientales y Químicos, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Resistencia, Argentina

²victor.gauto@ca.frre.utn.edu.ar

Introducción

Uno de los Objetivos de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (Naciones Unidas, 2016) es garantizar el acceso universal y equitativo al agua potable, y reducir su contaminación. Los ecosistemas de agua dulce, como las lagunas, arroyos, ríos y humedales son los más amenazados en nuestro planeta (Hestir et al., 2015), debido a los cambios de uso del suelo y la variabilidad climática. Por ello, es imprescindible realizar el control y seguimiento de la calidad del agua; para tal fin, el monitoreo mediante plataformas satelitales es una herramienta de utilidad. La disponibilidad en el uso de satélites de observación de la tierra (Bonansea et al., 2019) y el desarrollo de algoritmos para estimar indicadores de calidad de agua (Ferral et al., 2017; Nechad et al., 2016), hacen de la teledetección satelital (Chawla et al., 2020) una herramienta práctica para brindar datos sobre el estado de salud de los cuerpos y cursos de agua (Huovinen et al., 2019). El uso de sensores con múltiples bandas espectrales permite observar la respuesta generada por una superficie iluminada, desde un lugar remoto, que de otra manera sería imposible de lograr. La aplicación de estas técnicas, para determinar la calidad de agua, en el NEA argentino es escasa. La modificación de las propiedades ópticas del agua, asociadas a la presencia de materia en suspensión, puede ser registrada y correlacionada con variables como la turbidez (Ritchie et al., 2003). Sentinel-2 (S2) es una constelación de dos plataformas espaciales, desarrolladas por la Agencia Espacial Europea. La captura de las imágenes la realiza el sensor MultiSpectral Instrument (MSI). S2-MSI proporciona imágenes ópticas precisas (Phiri et al., 2020), con elevada resolución espacial y un catálogo de acceso libre y gratuito.

El Río Negro atraviesa la ciudad de Resistencia, capital del Chaco. Desemboca en el Río Paraná (Poi de Neiff et al., 2003), dejando meandros y lagunas en su recorrido sinuoso.

El objetivo del presente estudio fue relacionar mediciones fisicoquímicas, a partir de muestreos de campo, con datos satelitales a través de un algoritmo, para estimar la turbidez del agua de una laguna en la ciudad de Resistencia.

Materiales y métodos

El sitio elegido para efectuar los muestreos fue una laguna artificial de agua dulce (27° 25' 25,6" S 58° 57' 53,4" O), con características mínimas de actividad antrópica, emplazada en el interior del barrio privado La Ribera en Resistencia, Chaco. La laguna tiene un área de 20,4 km² y una profundidad de 3 a 5 m. Sin embargo, esos valores pueden modificarse en función de las precipitaciones (Aliaga, 2020). El agua de la laguna es mayormente turbia con un color verde amarronado por la presencia de algas y sólidos en suspensión. Mantiene su nivel de agua principalmente por precipitaciones y a través de los conductos pluviales del barrio que la rodea. Los muestreos se realizaron semanalmente, durante los días en ausencia de nubes, coincidentes con la adquisición de S2. Se seleccionaron tres puntos georreferenciados en el espejo de agua (LR1, LR2, LR3) para la toma de las muestras. Para caracterizar el agua de la laguna se efectuaron mediciones in situ y en laboratorio. Los parámetros determinados in situ fueron: pH, conductividad y profundidad de disco de Secchi (PDS). Para los análisis fisicoquímicos de laboratorio se tomaron muestras de agua en recipientes de vidrio de 1 L, opacos a la luz. Los parámetros medidos (por duplicado) fueron: clorofila-a (10200 H), turbidez

(2130 B), sólidos totales (2540 B) y sólidos suspendidos (2540 D), donde se indica la referencia de la técnica empleada según Métodos Normalizados (Apha et al., 1992).

El producto satelital utilizado fue S2-MSI L2A. Sus características son: 10 m de resolución espacial, 5 días de tiempo de revisita, en reflectancia de superficie (Rs), con corrección atmosférica realizada por el procesador Sen2Cor (Main-Knorn et al., 2017). La alta resolución espacial, espectral y temporal permitió su aplicación para el cuerpo de agua estudiado. El acceso a los datos fue posible de manera gratuita mediante la plataforma Copernicus Open Access Hub.

Se generó una base de datos que contenía las Rs de las bandas espectrales de S2-MSI, junto con los datos de turbidez, correspondientes a cada sitio muestral. Se consiguieron 23 muestras, entre septiembre y diciembre de 2022. Los datos fueron divididos aleatoriamente en dos grupos: uno de entrenamiento (75% del total), con el que se obtuvo el algoritmo de estimación; y el segundo grupo (25% restante) se mantuvo reservado únicamente para la etapa de validación del modelo, y calcular las siguientes métricas de desempeño: coeficiente de determinación de Pearson (R²), raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) y error absoluto medio (MAE). Para la elección definitiva del modelo se consideró su simplicidad y métricas de desempeño.

Resultados y discusión

La tabla 1 resume las características del cuerpo de agua a partir de los análisis fisicoquímicos de laboratorio y las mediciones in situ. Se muestran los valores promedio y los desvíos estándar, para los tres sitios muestrales dentro de la laguna. Los valores observados dan cuenta de la elevada presencia de la clorofila-a y turbidez, con gran variabilidad en la clorofila-a. Esto se ve reflejado en los bajos valores de PDS, ya que, a mayor presencia de componentes coloreados en el agua, es menor su valor.

Tabla 1.- Propiedades promedio y desvío estándar (entre paréntesis) de la laguna, por sitio muestral.

Parámetro	LR1	LR2	LR3
Clorofila-a (mg/L)	134,4(216,8)	111,3(126,6)	108,6(124,8)
Cond. (µS/cm)	894,3(129,3)	890,6(129,2)	895,0(130,2)
pH	8,5(0,5)	8,5(0,5)	8,6(0,6)
PDS (cm)	40,4(15,9)	40,8(15,3)	39,4(14,1)
Sól. Susp. (ppm)	14,6(12,6)	11,8(11,7)	8,7(9,5)
Sól. totales (ppm)	555,7(46,2)	551,2(48,3)	552,6(45,8)
Turbidez (NTU)	42,4(10,8)	43,3(10,6)	42,1(8,7)

La ecuación 1 muestra la relación entre la turbidez (turb, NTU) a partir de la interacción entre las bandas espectrales B03 y B05, del producto S2-MSI L2A, a 559 nm y 704 nm, respectivamente. B03 se encuentra en la región visible correspondiente al color verde. B05 se ubica en la zona del infrarrojo cercano del espectro electromagnético y es sensible a la presencia de sólidos (da Silva et al., 2021). Ambas bandas suelen tener correlaciones elevadas con la turbidez (Ma et al., 2021).

$$turb = -86,6 + 319,7 \cdot B03 + 746,6 \cdot B05 - 2035,9 \cdot B03 \cdot B05 \quad [1]$$

La figura 1 muestra los valores de turbidez estimados por la ecuación 1 y los medidos en laboratorio; la línea continua indica la pendiente entre datos. La línea punteada marca la diagonal a 45°.

Los círculos de la figura 1 representan los puntos utilizados para el entrenamiento del modelo y, las cruces, los de validación. En la esquina superior izquierda se listan las métricas de desempeño del modelo, obtenidas a partir del subconjunto de datos de validación, y la cantidad total de muestras.

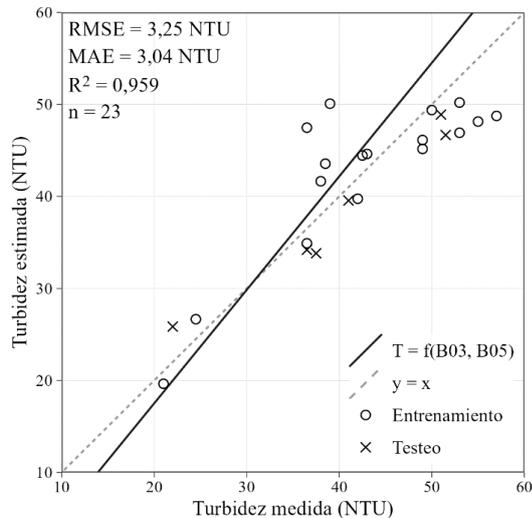


Figura 1.- Relación entre valores de turbidez medida y estimada, agrupados por datos de entrenamiento (círculo) y testeo (cruz).

La figura 2 muestra la distribución espacial de turbidez del cuerpo de agua, para el 01/01/2023. Los sitios muestrales se indican mediante triángulos sobre la laguna, que se encuentra rodeada por el Río Negro. La máscara de agua de la laguna se obtuvo aplicando el índice normalizado de diferencia de agua modificado, MNDWI (Xu, 2006). Cada píxel tiene 10 m de lado, de acuerdo a las características del producto empleado.

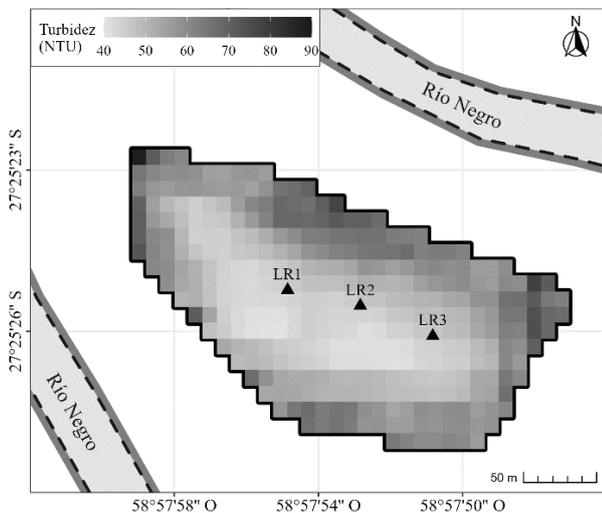


Figura 2.- Mapa de la distribución espacial de turbidez en la laguna, indicando los sitios muestrales LR1, LR2 y LR3.

Puede verse que los valores de turbidez más bajos se hayan en el centro de la laguna. Los píxeles ubicados en los límites del cuerpo de agua presentan valores elevados de turbidez.

Conclusión

Los muestreos de campo permitieron la caracterización fisicoquímica de una laguna de Resistencia, Chaco. Con la combinación con datos satelitales, provenientes de S2-MSI L2A, se creó una base de datos que fue dividida para entrenar el modelo y validarlo. El algoritmo elegido consiste en la combinación de las bandas espectrales B03 y B05. A partir de los datos reservados para la validación, el modelo mostró un buen desempeño, con R^2 0,959, RMSE 3,25 NTU y MAE 3,04 NTU. Se consiguió visualizar la

distribución superficial de la turbidez a partir de la confección de un mapa y se identificaron zonas de alta y baja turbidez.

La aplicación de herramientas de teledetección satelital permitió el desarrollo de un modelo semiempírico de estimación de turbidez del agua en una laguna, pudiendo monitorear el parámetro de manera remota y evaluar su distribución espacial.

Referencias bibliográficas

Aliaga, V. S. (2020). "Variabilidad climática de la Región Pampeana y su efecto sobre las lagunas de la región." *Huellas*, 24(1), 243–249. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.19137/huellas-2020-2413>

Apha, Awwa, & WPCF. (1992). *MÉTODOS NORMALIZADOS Para el análisis de aguas potables y residuales*.

Bonansa, M., Ledesma, M., Bazán, R., Ferral, A., German, A., O'Mill, P., Rodriguez, C., & Pinotti, L. (2019). "Evaluating the feasibility of using Sentinel-2 imagery for water clarity assessment in a reservoir." *Journal of South American Earth Sciences*, 95(May), 102265. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102265>

Chawla, I., Karthikeyan, L., & Mishra, A. K. (2020). "A review of remote sensing applications for water security: Quantity, quality, and extremes." *Journal of Hydrology*, 585(March), 124826. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124826>

da Silva, E. F. F., Novo, E. M. L. de M., Lobo, F. de L., Barbosa, C. C. F., Noernberg, M. A., Rotta, L. H. da S., Cairo, C. T., Maciel, D. A., & Flores Júnior, R. (2021). "Optical water types found in Brazilian waters." *Limnology*, 22(1), 57–68. <https://doi.org/10.1007/s10201-020-00633-z>

Ferral, A., Solis, V., Frery, A., Orueta, A., Bernasconi, I., Bresciano, J., & Scavuzzo, C. M. (2017). "Spatio-temporal changes in water quality in an eutrophic lake with artificial aeration." *Journal of Water and Land Development*, 35(1), 27–40. <https://doi.org/10.1515/jwld-2017-0065>

Hestir, E. L., Brando, V. E., Bresciani, M., Giardino, C., Matta, E., Villa, P., & Dekker, A. G. (2015). "Measuring freshwater aquatic ecosystems: The need for a hyperspectral global mapping satellite mission." *Remote Sensing of Environment*, 167, 181–195. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.05.023>

Huovinen, P., Ramírez, J., Caputo, L., & Gómez, I. (2019). "Mapping of spatial and temporal variation of water characteristics through satellite remote sensing in Lake Panguipulli, Chile." *Science of the Total Environment*, 679, 196–208. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.367>

Ma, Y., Song, K., Wen, Z., Liu, G., Shang, Y., Lyu, L., Du, J., Yang, Q., Li, S., Tao, H., & Hou, J. (2021). "Remote sensing of turbidity for lakes in Northeast China using sentinel-2 images with machine learning algorithms." *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 9132–9146. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3109292>

Main-Knorn, M., Pflug, B., Louis, J., Debaecker, V., Müller-Wilm, U., & Gascon, F. (2017). "Sen2Cor for Sentinel-2." In L. Bruzzone, F. Bovolo, & J. A. Benediktsson (Eds.), *Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII* (p. 3). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2278218>

Naciones Unidas. (2016). "Marco de indicadores mundiales para los objetivos de desarrollo sostenible y metas de la agenda 2030 para el desarrollo sostenible." *Labor de La Comisión de Estadística En Relación Con La Agenda 2030 Para El Desarrollo Sostenible*, 23.

Nechad, B., Dogliotti, A., Ruddick, K., & Doxaran, D. (2016). "Particulate backscattering retrieval from remotely-sensed turbidity in various coastal and riverine turbid waters." *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP, SP-740*(May).

Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V. R., Murayama, Y., & Ranagalage, M. (2020). "Sentinel-2 data for land cover/use mapping: A review." In *Remote Sensing* (Vol. 12, Issue 14). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/rs12142291>

Poi de Neiff, A. S. G., Patiño, C. A., Neiff, J. J., & Ramos, A. O. (2003). "CALIDAD DEL AGUA EN EL TRAMO BAJO DEL RIO NEGRO (CHACO, ARGENTINA)." *FACENA*, 19, 67–83.

Ritchie, J. C., Zimba, P. V., & Everitt, J. H. (2003). "Remote Sensing Techniques to Assess Water Quality." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(6), 695–704. <https://doi.org/10.14358/PERS.69.6.695>

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>