

ESTIMACIÓN SATELITAL DE VARIABLES DE CALIDAD DE AGUA EN EMBALSES DEL RÍO NEGRO. DESARROLLO DE MODELOS SEMI-EMPÍRICOS Y PUBLICACIÓN DE DATOS AUTOMATIZADOS.

Bruno Guigou*

Área Información y Calidad Ambiental, Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental – Ministerio de Ambiente

Andrea Barbieri

Área Información y Calidad Ambiental, Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental – Ministerio de Ambiente

Virginia Fernández

Área Información y Calidad Ambiental, Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental – Ministerio de Ambiente



TEMA 4: Gestión de recursos hídricos.

Juncal 1385 – Montevideo – Uruguay - 29173380 int. 4121 – bruno.guigou@ambiente.gub.uy

RESUMEN

Obtener niveles y concentraciones de parámetros de calidad de agua en el río Negro a partir de imágenes satelitales es un proceso recientemente desarrollado por el Ministerio de Ambiente para complementar los monitoreos tradicionales de calidad de agua en Uruguay. El proceso requiere del ajuste de algoritmos específicamente desarrollados para cada sistema acuático y la validación de una corrección atmosférica a emplear sobre las imágenes satelitales. Los algoritmos desarrollados son capaces de estimar concentraciones de clorofila-a con un error relativo de 9,4% y máximos de 6200 µg/l; niveles de turbidez con un error relativo de 7,4% y máximos de 115 NTU, y niveles de cdom con un error relativo de 29,1% y máximos de 4,8 m⁻¹. Por otra parte, la automatización lograda para el procesamiento de imágenes implica la visualización de las imágenes con los parámetros estimados y la presentación de datos sintéticos en formato gráfico. Estos desarrollos se publican en tiempo real en la web del Observatorio Ambiental Nacional y permiten poner a disposición de toda la población la información satelital más actualizada sobre el monitoreo de la calidad del agua del río Negro, en formatos accesibles y manteniendo la rigurosidad en el procesamiento de los datos.

Palabras Clave (en negritas): Calidad de agua, imágenes satelitales.

INTRODUCCIÓN

Obtener niveles y concentraciones de parámetros de calidad de agua a partir de imágenes satelitales es un proceso recientemente desarrollado por el Ministerio de Ambiente para complementar los monitoreos tradicionales de calidad de agua del país. El aporte novedoso de estos trabajos implica la obtención de datos de niveles y concentraciones para toda la extensión de los cuerpos de agua, lo que permite obtener un estado de situación más completo y contribuir así en la mejora de su gestión.

La estimación de parámetros de calidad de agua a partir de imágenes satelitales es un proceso que requiere del ajuste de algoritmos específicamente desarrollados para cada sistema acuático, siendo posible identificar y cuantificar una cantidad de parámetros acotados. Los más relevantes por el impacto en la calidad del agua y su complementariedad, y al momento implementados por el Ministerio, son: clorofila-a, turbidez y materia orgánica disuelta coloreada (cdom, por sus siglas en inglés).

OBJETIVOS

- Desarrollar algoritmos semi-empíricos para estimar concentraciones de clorofila-a, turbidez y cdom en el río Negro en base a imágenes satelitales Sentinel 2.

- Generar un proceso de trabajo automatizado para procesar imágenes Sentinel 2 y disponibilizar en tiempo real los datos de calidad de agua generados.

METODOLOGÍA

El área de trabajo se localiza entre la represa de Palmar (al oeste) y el inicio del embalse de Bonete (al este), en San Gregorio de Polanco. En la zona que se visualiza en la figura 1, se realizaron 16 campañas de monitoreo, organizadas en 2 y 3 días consecutivos, durante los que se tomaron muestras de agua en estaciones fijas (puntos en la figura 1) y estaciones variables, considerando los tres embalses del río Negro. En cada estación de monitoreo se midieron in situ datos radiométricos, parámetros de calidad de agua y datos de turbidez. También se recolectaron muestras de clorofila-a y cdom para su análisis en laboratorio.

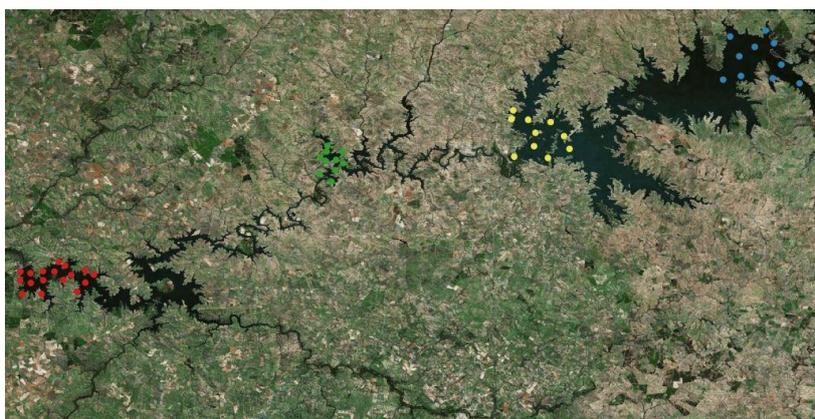


Figura 1: Localización de los puntos fijos de monitoreo en el río Negro. En azul, zona de San Gregorio de Polanco; en amarillo, Rincón del Bonete; en verde, Baygorria; en rojo, Palmar.

Los protocolos seguidos para la toma de datos radiométricos siguen las recomendaciones de Mobley (1999; 2015), mientras que las muestras de clorofila-a y calidad de agua se enmarcan en la “Guía Operativa GEMS Agua, del Sistema Global de Monitoreo Ambiental”, y el “Manual de procedimientos analíticos para muestras ambientales”, de la División Laboratorio Ambiental, del Ministerio de Ambiente. Las muestras de turbidez se analizaron in situ con un turbidímetro de campo Hach, que realiza lecturas de turbidez en NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez), a partir de muestras capturadas con luz blanca en un ángulo de detección de 90 grados. Por otra parte, la metodología de análisis en laboratorio para cdom puede consultarse en el documento “Compendio de metodologías analíticas de referencia y preservación de parámetros ambientales”, de la División Laboratorio Ambiental, del Ministerio de Ambiente.

Al final del período se conformó un set de 184 datos válidos para clorofila-a, 98 datos de turbidez y 35 datos de cdom. En términos temporales se cubrieron monitoreos en las 4 estaciones del año, salvo para los datos de cdom en los que no se tuvieron datos para los meses de invierno. En la tabla 1 puede visualizarse la cantidad de datos totales y sus rangos. La amplia cobertura temporal, considerando distintas épocas del año, permite obtener resultados confiables para los productos satelitales ya que se cubren condiciones atmosféricas y ambientales variadas, que pueden tener incidencias relativas en las reflectancias captadas por los satélites.

Tabla 1: Estadísticos de concentraciones para los tres parámetros medidos en el río Negro.

	Datos	Promedio	Desvío estándar	Mínimo	Máximo
Clorofila-a ($\mu\text{g/l}$)	184	245,2	748,7	0,7	6200
Turbidez (NTU)	98	28,5	17,7	12,2	115
Cdom (m^{-1})	35	2,6	1,1	0,7	4,8

Además, y como se visualiza en la tabla 1, se obtuvieron muestras de agua con niveles de clorofila-a, turbidez y cdom en un amplio rango de valores, lo que permite desarrollar algoritmos para distintas condiciones de calidad de agua.

El trabajo con modelos semi-empíricos para el desarrollo de algoritmos de interés ambiental en agua implica encontrar relaciones matemáticas entre las reflectancias medidas por el satélite y los valores de concentración de la variable de interés. Por esta razón es que durante los campañas de monitoreo se toman en conjunto datos de concentración de clorofila-a y de reflectancia de las muestras. El procesamiento de los datos radiométricos almacenados en el datalogger vinculado al espectro radiómetro Ramses Trios, consiste en calcular las reflectancias de las muestras de agua para cada longitud de onda entre 320 y 950 nm (rango de medición del instrumento). Al conjunto de esas reflectancias se le denomina firma espectral (ver figura 2), y su análisis puede asociarse con el comportamiento diferencial de los componentes ópticamente activos del agua (Barbosa *et. al.*, 2019).

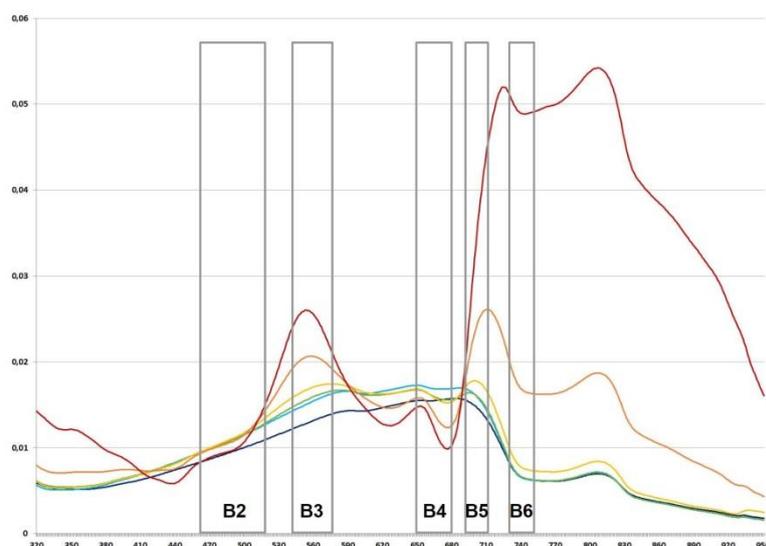


Figura 2: Clases de firmas espectrales según concentración de clorofila-a (x: longitud de onda (nm); y: reflectancia (Sr^{-1})).

En la figura 2 se representan las firmas espectrales características para el tramo analizado del río Negro, según niveles de reflectancia del agua. En celeste se visualiza la firma espectral promedio para valores de clorofila-a menores de $2,5 \mu g/l$; en azul para valores entre $2,5$ y $8 \mu g/l$; en verde para valores entre 8 y $25 \mu g/l$; en amarillo para valores entre 25 y $75 \mu g/l$; en naranja para valores entre 75 y $300 \mu g/l$; en rojo para valores mayores a $300 \mu g/l$. En la figura también se representan en rectángulos grises verticales las zonas del espectro electromagnético en las que se toman las mediciones del satélite Sentinel 2 que son utilizadas en este trabajo (B2, B3, B4, B5 y B6). Sentinel 2 es una misión conformada por dos satélites idénticos, de los cuales el primero fue lanzado a mediados del año 2015 y su complementario a mediados del año 2017.

El procedimiento realizado una vez obtenidas las firmas espectrales del agua es el de simular la reflectancia del satélite de referencia (en este caso Sentinel 2) para cada uno de los puntos monitoreados. Para ello se realizan una serie de cálculos a partir de los datos tomados en campo por el espectrorradiómetro Trios y las funciones de respuesta espectral del satélite, obteniéndose datos de reflectancia in situ simuladas para cada banda del satélite Sentinel 2. Con estos datos simulados se generan índices espectrales que se contrastan con los valores de los parámetros tomados en el embalse, y es a partir de estas relaciones que se ajustan los algoritmos para estimar concentraciones a partir de las imágenes satelitales.

También se evaluaron tres productos de corrección atmosférica para Sentinel 2 y se desarrollaron filtros para aplicar los algoritmos en agua y enmascarar las nubes presentes en cada imagen. Por último se

automatizó todo este proceso en base al trabajo en la plataforma Google Earth Engine y el desarrollo en paralelo de códigos en Python.

RESULTADOS

Para la selección de las bandas satelitales óptimas y la construcción de los índices a emplear para el desarrollo de los algoritmos semi-empíricos se tomaron como base distintas referencias bibliográficas internacionales (ver apartado de referencias bibliográficas) y se realizaron múltiples pruebas con los datos de campo del río Negro. De este análisis teórico y empírico, con los índices referenciados a continuación se obtuvieron los mejores desempeños, tanto en el proceso de calibración y validación, como en los análisis cuantitativos y cualitativos al aplicar el modelo con las imágenes Sentinel 2 y la corrección atmosférica seleccionada.

El índice I 543 de clorofila-a se construye a partir de la normalización de las bandas B3, B4 y B5 del satélite Sentinel 2 (con centro en la banda B4). Estas bandas toman datos en las regiones del espectro electromagnético del verde, rojo y borde rojo 1 y su elección se basa en la alta reflectividad asociada con la clorofila-a en las regiones del verde y borde rojo 1, y por otro lado, en la fuerte absorción de este pigmento en la banda roja (B4).

Por su parte, el índice B5B6 de turbidez se construye a partir del promedio entre las bandas 5 y 6 del satélite Sentinel 2, capturando datos en las regiones del espectro electromagnético del borde rojo 1 y 2 (centros de banda en 703,9 y 740,2 nanómetros, respectivamente). La utilización de estas bandas se sustenta en el argumento de Barbosa *et.al.* (2019), acerca de que a medida que aumentan las concentraciones de partículas en suspensión en el agua, generalmente la reflectancia máxima del agua migra de longitudes de onda verdes a rojas, y en concentraciones muy altas, para la región del infrarrojo próximo (850 nm). Debido a que se pretende simular niveles de turbidez bajos, medios y altos la elección de bandas en el borde infrarrojo inferior resultan óptimas para ese objetivo.

Finalmente, el índice B2B4 de cdom se construye a partir del promedio entre las bandas 2 y 4 del satélite Sentinel 2, que capturan datos en las regiones del espectro electromagnético del azul y rojo, respectivamente. En base a los antecedentes teóricos (ver referencias bibliográficas) y la respuesta espectral de los datos tomados en campo, la utilización de estas bandas se basa principalmente en la alta absorción del cdom en dichas regiones del espectro electromagnético.

Una vez determinados los índices para cada parámetro se procede a calcular las funciones de recuperación que mejor ajustan la relación entre los índices y los valores in situ de cada parámetro. Para esto, del total de datos válidos 2/3 partes se utilizan para la calibración de los algoritmos y el tercio restante para la validación de esas funciones. Los algoritmos resultantes y los respectivos coeficientes de determinación de los ajustes de calibración se visualizan en la figura 3. Estas figuras representan los resultados considerando todos los datos de calibración del río Negro para clorofila-a (expresada en algoritmo de base 10), turbidez y cdom.

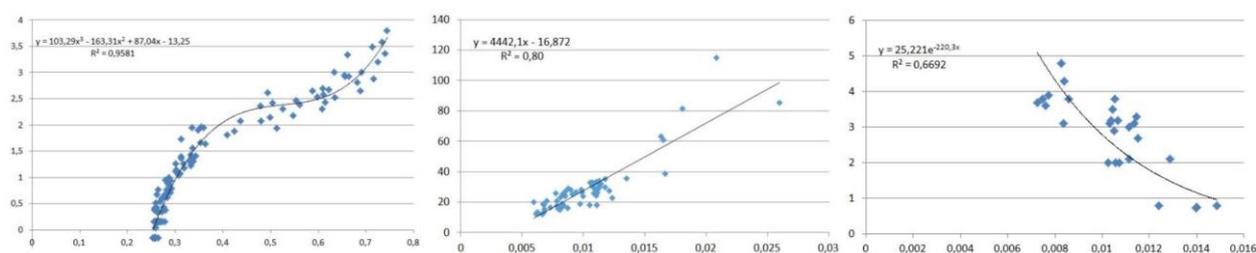


Figura 3: Calibración de los algoritmos para estimar clorofila-a, a la izquierda, turbidez, al centro, y cdom, a la derecha (x: índices; y: concentraciones de los parámetros).

Por otro lado, para la evaluación de los resultados de calibración y validación, además de los coeficientes de determinación (calculados solamente para las funciones de calibración), también se realizaron cálculos de los errores cuadráticos medios para los algoritmos de los tres parámetros (ver tabla 2).

Tabla 2: Evaluación del error relativo de los algoritmos de estimación para los tres parámetros y el set de datos de calibración y validación.

	Error relativo - calibración (%)	Datos calibración	Error relativo - validación (%)	Datos validación
Clorofila-a ($\mu\text{g/l}$)	5,3%	123	9,4%	61
Turbidez (NTU)	6,9%	65	7,4%	33
Cdom (m^{-1})	16,3%	27	29,1 %	8

El error presentado en estos cuadros hace referencia al error cuadrático medio de los algoritmos en relación a la amplitud máxima de estimación. Los errores de calibración para los tres parámetros siguen la lógica del coeficiente de determinación, con los mejores resultados para clorofila-a, luego turbidez y por último cdom. Al analizar en cambio los errores relativos de validación, calculados a partir de muestras independientes a los datos empleados para calibración, el mejor desempeño ocurre para el algoritmo de turbidez, seguido del de clorofila-a y el algoritmo de cdom por último. Los errores de validación para los primeros dos parámetros son similares a los de calibración y muy próximos entre ellos (7,4% y 9,4%), mientras que el error para el algoritmo de cdom resulta más elevado (29,1%). En este sentido, la menor cantidad de datos empleados para la construcción del algoritmo, así como la menor respuesta espectral del satélite en la banda 2, pueden ser de las principales causas por las que se visualicen estas diferencias en los errores para la estimación de cdom.

Además del trabajo con los modelos de estimación, el otro elemento importante para evaluar los productos satelitales es la evaluación de la precisión de distintas correcciones atmosféricas. Esto es así ya que la anterior evaluación de los modelos evaluados se aplica en condiciones sin interferencias atmosféricas, y por tanto, cómo se desempeñen las diferentes correcciones atmosféricas en atenuar estos efectos repercute en la precisión final del producto.

De las distintas correcciones atmosféricas disponibles en la plataforma Google Earth Engine, se concluyó que la corrección MAIN (corrección Rayleigh adaptada para aguas interiores) es la más ajustada a los datos radiométricos medidos in situ en el río Negro. En síntesis, la corrección MAIN (Modified atmospheric correction for INland waters) fue desarrollada por Page *et. al.* (2019) para la plataforma Google Earth Engine. Esta corrección incluye incluye la función de fase de dispersión de Rayleigh, la corrección de Fresnel, así como un ajuste por ozono. Además, suponiendo una señal insignificante en las longitudes de onda del infrarrojo cercano (SWIR), este algoritmo también aplica una corrección por efecto de aerosoles (enfocada en aguas ópticamente complejas) a partir del trabajo con las dos bandas SWIR (11 y 12) disponibles en Sentinel 2.

En la figura 4 se visualiza para un día particular (14 de julio de 2020) la estimación satelital de los tres parámetros, en base a los algoritmos desarrollados y aplicando la corrección atmosférica MAIN. En dicha figura puede visualizarse que el producto de estimación satelital es capaz de distinguir amplios gradientes de concentración para los tres parámetros. Como la imagen es de invierno, en el caso de la estimación de clorofila-a la mayor parte de los embalses tienen concentraciones menores a $10 \mu\text{g/l}$, pero al hacer zoom sobre los brazos cercanos a la represa de Palmar es posible distinguir estimaciones de concentración de clorofila-a elevadas, superiores a $80 \mu\text{g/l}$.

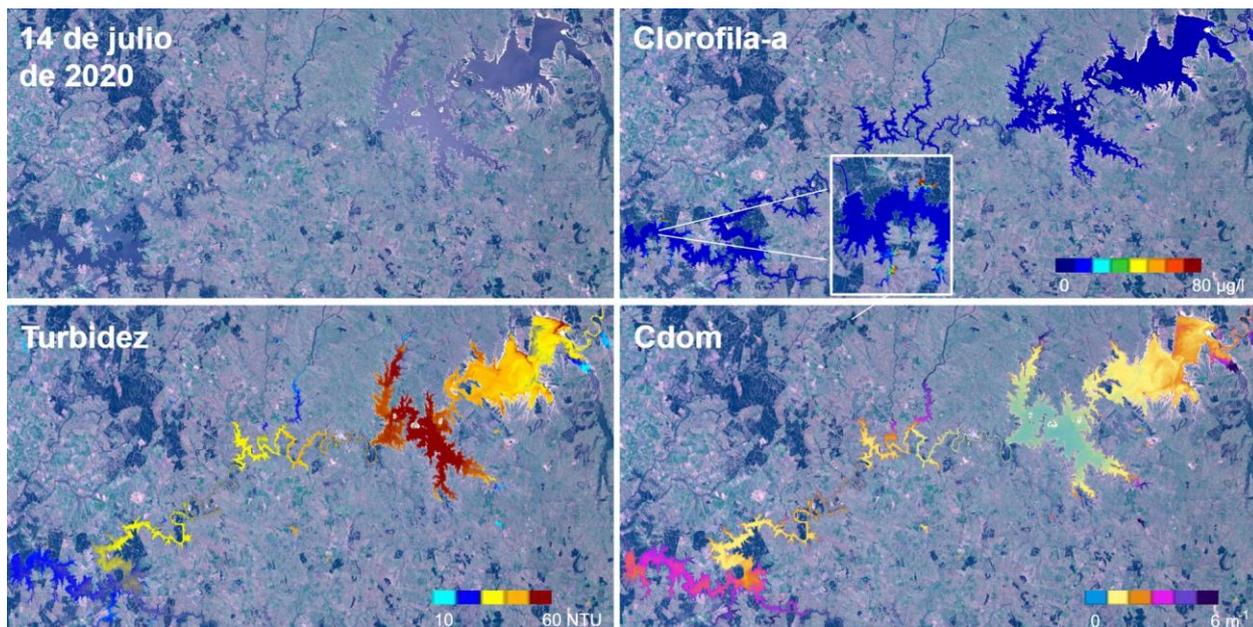


Figura 4: Ejemplo de estimación satelital de clorofila-a, turbidez y cdom en el río Negro.

Por último, y como forma de procesar y disponibilizar datos históricos de estos parámetros, se seleccionaron las imágenes Sentinel 2 con hasta un 25 % de nubes y se realizaron cálculos estadísticos sobre las concentraciones de los parámetros para todo el período con imágenes disponibles en la plataforma Google Earth Engine (fines de 2016 - mediados de 2024). Estos cálculos se realizaron aplicando estacionalmente máscaras de agua, correcciones atmosféricas, y dividiendo el conjunto de los embalses en 7 zonas (en la figura 5 las áreas blancas numeradas del 1 al 7 representan las zonas para las que se realizaron los cálculos).

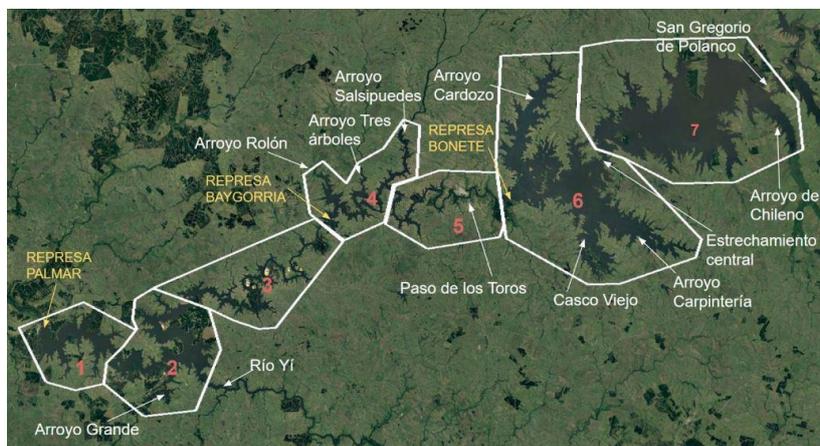


Figura 5: Áreas de las 7 zonas del río Negro para las que se procesan los datos satelitales.

Los datos históricos para los tres parámetros y las siete zonas se encuentran disponibles en la web del Observatorio Ambiental Nacional, y debido al proceso de automatización desarrollado, su actualización es inmediata (una vez se disponibilizan las imágenes satelitales en la plataforma Google Earth Engine). A continuación se presenta un ejemplo de visualización del histórico para los tres parámetros en las zonas que comprenden los tres embalses del río Negro.

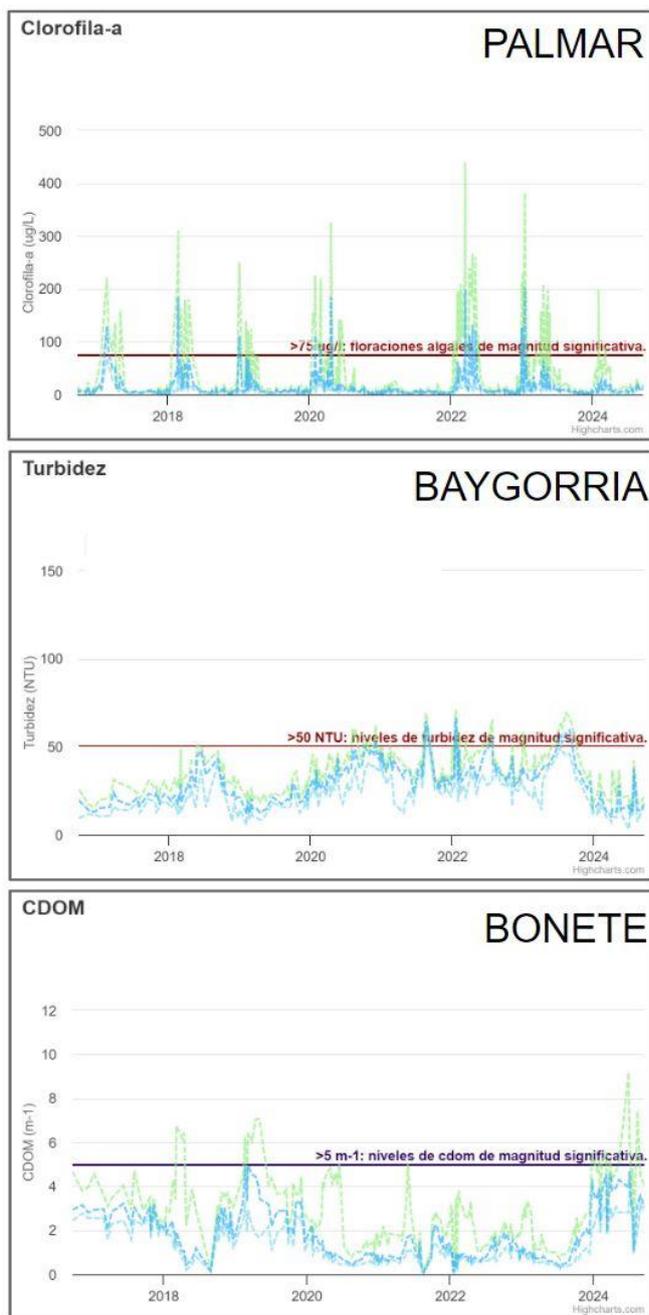


Figura 6: Valores diarios para los percentiles 10 (celeste), 50 (azul) y 90 (verde) de la concentración de clorofila-a, turbidez y cdom.

Los datos presentados en los gráficos (ver figura 6) corresponden a las series históricas de clorofila-a, turbidez y cdom, estimadas a partir de imágenes Sentinel 2. En este caso se visualizan los datos de clorofila-a para la zona de Palmar (zona 1), de turbidez para la zona de Baygorria (zona 4) y de cdom para Bonete (zona 6). Para cada zona los percentiles 10, 50 y 90 representan el valor por debajo del cual la concentración de cada parámetro cubre el 10%, el 50% y el 90% del área analizada, respectivamente.

CONCLUSIONES

El análisis de los datos y resultados presentados sustentan cuantitativamente la validez de los tres modelos desarrollados localmente para estimar concentraciones de clorofila-a, turbidez y cdom con imágenes satelitales Sentinel 2 en el río Negro. Los algoritmos desarrollados son capaces de estimar

concentraciones de clorofila-a con un error relativo de 9,4% y máximos de estimación de 6200 µg/l; niveles de turbidez con un error relativo de 7,4% y máximos de 115 NTU, y niveles de cdom con un error relativo de 29,1% y máximos de 4,8 m⁻¹. A su vez, la amplitud de concentraciones lograda en la estimación satelital de los tres parámetros permite obtener medidas satelitales confiables para días y períodos con bajos y altos niveles de estos parámetros.

Por su parte, el desarrollo de un procesamiento automático de imágenes y la visualización de datos sintéticos en formato gráfico permite poner a disposición de toda la población la información satelital más actualizada sobre el monitoreo de la calidad del agua en el río Negro, en formatos accesibles y manteniendo la rigurosidad en el procesamiento de los datos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barbosa, C., Novo, E., & Martins, V. (2019). Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: Princípios e aplicações.
- Binding, C. E., Jerome, J. H., Bukata, R. P., & Booty, W. G. (2010). Suspended particulate matter in Lake Erie derived from MODIS aquatic colour imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 31(19), 5239-5255.
- Dekker, A. G., Vos, R. J., & Peters, S. W. M. (2002). Analytical algorithms for lake water TSM estimation for retrospective analyses of TM and SPOT sensor data. *International journal of remote sensing*, 23(1), 15-35.
- Delegido, J., Urrego, P., Vicente, E., Sòria-Perpinyà, X., Soria, J. M., Pereira-Sandoval, M., ... & Moreno, J. (2019). Turbidez y profundidad de disco de Secchi con Sentinel-2 en embalses con diferente estado trófico en la Comunidad Valenciana. *Revista de Teledetección*, (54), 15-24.
- Dogliotti, A. I., Ruddick, K. G., Nechad, B., Doxaran, D., & Knaeps, E. (2015). A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. *Remote Sensing of Environment*, 156, 157-168.
- ESA (2015). *Sentinel-2 User Handbook*. European Space Agency Standard Document.
- Ferreira, R. M. P. (2014). Caracterização da ótica e do carbono orgânico dissolvido no reservatório de Três Marias/MG (Doctoral dissertation, Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos).
- GEMS/Agua. (1994). Guía operativa. 3ª Edición. PNUD-OMS-UNESCO-OMM.
- Gilerson, A. A., Gitelson, A. A., Zhou, J., Gurlin, D., Moses, W., Ioannou, I., & Ahmed, S. A. (2010). Algorithms for remote estimation of chlorophyll-a in coastal and inland waters using red and near infrared bands. *Optics Express*, 18(23), 24109-24125. <https://doi.org/10.1364/OE.18.024109>
- Gons, H. J. (1999). Optical Teledetection of Chlorophyll a in Turbid Inland Waters. *Environmental Science & Technology*, 33(7), 1127-1132. <https://doi.org/10.1021/es9809657>
- Martins, S. C. A. (2017). The aCDOM spatial and temporal distribution analysis in Funil reservoir.
- Mannino, A., Novak, M. G., Hooker, S. B., Hyde, K., & Aurin, D. (2014). Algorithm development and validation of CDOM properties for estuarine and continental shelf waters along the northeastern US coast. *Remote Sensing of Environment*, 152, 576-602.
- Ministerio de Ambiente - División Laboratorio Ambiental. (2021). Compendio de metodologías analíticas de referencia y preservación de parámetros ambientales. Versión VII.
- Mishra, S., & Mishra, D. R. (2012). Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*, 117, 394-406.
- Mobley, C. D. (1999). Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. *Applied optics*, 38(36), 7442-7455.
- Mobley, C. D. (2015). Polarized reflectance and transmittance properties of windblown sea surfaces. *Applied optics*, 54(15), 4828-4849.
- MVOTMA - DINAMA - Laboratorio Ambiental. (2009). Manual de Procedimientos Analíticos para Muestras Ambientales. 2da Edición.
- Nechad, B., Ruddick, K. G., & Park, Y. (2010). Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. *Remote Sensing of Environment*, 114(4), 854-866.
- Page, B. P., Olmanson, L. G., & Mishra, D. R. (2019). A harmonized image processing workflow using Sentinel-2/MSI and Landsat-8/OLI for mapping water clarity in optically variable lake systems. *Remote Sensing of Environment*, 231, 111284.
- Silva, M. D. (2018). Modelos de sensoriamento remoto no estudo da variabilidade espacial e sazonal da matéria orgânica dissolvida em lagos da planície de inundação do Solimões/Amazonas a partir de suas propriedades óticas.
- Zhang, F., Li, J., Shen, Q., Zhang, B., Wu, C., Wu, Y., ... & Lu, Z. (2014). Algorithms and schemes for chlorophyll a estimation by remote sensing and optical classification for turbid Lake Taihu, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(1), 350-364.
- Zhu, W., Yu, Q., Tian, Y. Q., Becker, B. L., Zheng, T., & Carrick, H. J. (2014). An assessment of remote sensing algorithms for colored dissolved organic matter in complex freshwater environments. *Remote Sensing of Environment*, 140, 766-778.