

EMPLEO DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT-8 PARA LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA EN EL EMBALSE ABREUS, CIENFUEGOS, CUBA

USE OF LANDSAT-8 SATELLITE IMAGES FOR THE ESTIMATION OF WATER QUALITY PARAMETERS IN THE ABREUS RESERVOIR, CIENFUEGOS, CUBA

MSc. Javier Alejandro Corcho Amador. (1)

MSc. Aimee Valle Pombrol. (2)

Dr.C. Edel García Reyes. (3)

1. Academia Naval “Granma”. Cuba. javico0511@gmail.com
2. Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos. Cuba. aimeevallepombrol@gmail.com.
3. Instituto de CCG/ZGDV. Universidade de Minho. Portugal. edelgr@gmail.com

RESUMEN:

El seguimiento y conservación de la calidad de las aguas superficiales en cuerpos de agua tales como lagos o embalses es una de las principales preocupaciones a nivel mundial. El presente estudio tiene como objetivo evaluar las posibilidades de empleo de imágenes satelitales del Landsat-8 para la estimación de parámetros de calidad del agua tales como pH y temperatura y transparencia del agua en el embalse Abreus, a través de algoritmos matemáticos. En la investigación se emplearon muestras de campo recopiladas entre el 2016 y el 2021, por el Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC) e imágenes del satélite Landsat 8. Con estos datos, el programa STATGRAPHICS y el empleo de técnicas de regresión se seleccionaron y validaron tres modelos matemáticos, uno para cada parámetro. En el caso de la transparencia del agua, se calibró un modelo polinomial que emplea el cociente B5/B4 ($R^2=86,50\%$), en cuanto al pH, se logró un modelo de regresión lineal múltiple que agrupa algunos cocientes creados con las bandas 1-7 ($R^2=80,68\%$) y para la temperatura, se calibró un polinomio que emplea las temperaturas superficiales obtenidas a través de una ecuación de canal simple ($R^2=55,25\%$). Estos modelos se le aplicaron a una de las imágenes satelitales, lo cual permitió obtener mapas temáticos que reflejan la distribución espacial de estos parámetros en el cuerpo de agua, para esa fecha.

Palabras clave: algoritmos matemáticos; cuerpos de agua; imágenes satelitales; indicadores de calidad del agua; técnicas de regresión.

ABSTRACT:

The monitoring and conservation of the quality of surface water in bodies of water such as lakes or reservoirs is one of the main concerns worldwide. The present study aims to evaluate the possibilities

of using Landsat-8 satellite images for the estimation of water quality parameters such as pH and temperature and transparency of the water in the Abreus reservoir, through mathematical algorithms. In the research, field samples collected between 2016 and 2021 by the Center for Environmental Studies of Cienfuegos (CESC) and images from the Landsat 8 satellite were used. With these data, the STATGRAPHICS program and the use of regression techniques are selected and three mathematical models were validated, one for each parameter. In the case of water transparency, a polynomial model was calibrated that uses the ratio B5/B4 ($R^2=86.50\%$), in terms of pH, a model of multiple linear regression that groups some quotients created with the bands 17 ($R^2=80.68\%$) and for temperature, a polynomial was calibrated that uses the surface temperatures obtained through a simple channel equation ($R^2=55.25\%$). These models were applied to one of the satellite images, which allowed obtaining thematic maps that reflect the spatial distribution of these parameters in the body of water, for that date.

Keywords: mathematical algorithms; regression techniques; satellite images; water bodies; water quality indicators.

Recibido:25/03/2024

Aprobado:22/04/2024

1. INTRODUCCIÓN.

Los lagos y embalses actúan como reguladores del ciclo del carbono y del clima. Proporcionan agua para múltiples usos humanos y sustentan altos niveles de biodiversidad (Toming *et al*, 2016). Sin embargo, como muchos otros ecosistemas, están amenazados por los efectos sinérgicos de múltiples presiones ambientales concurrentes, en particular, el enriquecimiento de nutrientes y otras contaminaciones, orgánica e inorgánica, el cambio climático, la acidificación y el establecimiento y la propagación de especies invasoras (Palmer *et al*, 2015). Cuba, específicamente, carece de abundantes recursos hídricos, y la intensificación y recurrencia de los períodos de sequía, el uso ineficiente de este recurso y el deterioro sufrido por la contaminación lo coloca en una situación crítica en algunas regiones (CITMA, 2016), por lo cual uno de los problemas ambientales identificados en la isla está relacionado con la carencia y dificultades en el manejo, la disponibilidad y calidad del agua (CITMA, 2024). Sumado a esto, en Cuba no se han realizado (al menos publicados) muchos estudios sobre calidad de las aguas (Rodríguez *et al*, 2022) que permitan conocer su comportamiento en los distintos embalses del país.

La presa Abreus, objeto de estudio de esta investigación, recibe de sus afluentes el aporte de residuales industriales, albañales y agropecuarios (Betancourt, 2011), debido al aumento progresivo de la urbanización y el desarrollo de la industria, la agricultura y la ganadería cercanos al reservorio, lo cual ha ocasionado que en varios períodos de tiempo este muestre signos de eutrofia (Betancourt *et al*, 2010 y Peraza, 2017) y se haya detectado además una tendencia al aumento de parámetros tales como el pH y la temperatura (Peraza, 2017). Ante las problemáticas que supone lo descrito anteriormente, es necesario encontrar las técnicas que garanticen un monitoreo efectivo a largo plazo y casi en tiempo real de indicadores de calidad del agua en la superficie del embalse, lo cual responde y se sustenta en el Objetivo 6 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para la agenda 2030 (Presidencia y Gobierno de Cuba, 2021) y en las Tareas 4, 5 y 9 de la Tarea Vida (Ballagas, 2021). Habitualmente la calidad del agua se determina a partir del análisis de muestras de agua que periódicamente recolectan equipos de personal en estaciones de monitoreo (Martínez, 2017), sin

embargo, el muestreo y las mediciones tradicionales de agua in situ requieren mucho tiempo, son laboriosos y costosos (Wang y Yang, 2019) y están limitados en términos de cobertura espacial y representatividad, así como en términos de frecuencia para muchos sitios y es simplemente inexistente en muchos otros (Palmer *et al*, 2015). Con los avances en la ciencia espacial y el aumento de la potencia informática en las últimas décadas, las técnicas de teledetección se han convertido en herramientas útiles para lograr este objetivo, haciendo posible monitorear e identificar regiones y cuerpos de agua a gran escala de una manera más efectiva y eficiente (Gholizadeh *et al*, 2016).

El advenimiento de la percepción remota para la medición de la calidad de las aguas interiores data cerca de 50 años atrás, con el comienzo de la era satelital (Topp *et al*, 2020). Las imágenes Landsat (sensores TM, ETM y OLI), han sido utilizadas para analizar las propiedades limnológicas de las aguas (Briceño *et al*, 2018), específicamente, sobre el empleo en el mundo del satélite Landsat-8, en la estimación de parámetros tales como la transparencia y temperatura del agua y el pH, entre otros indicadores, se pueden citar las investigaciones realizadas por Japitana y Burce (2016), Ayala y Herrera (2019), Pizani *et al* (2020), Hernández (2021), Zhang *et al* (2021) y Tao *et al* (2022). Aunque en estos trabajos se han obtenido modelos matemáticos con resultados estadísticos significativos, su aplicación está limitada a un lugar de estudio específico (Dörnhöfer y Oppelt, 2016), así como a una época y clima determinados, lo cual limita su empleo en los embalses del país. Concretamente, en la presa Abreus, existe un antecedente de trabajo que investiga el empleo de imágenes del satélite Landsat-8, para la estimación de la concentración de clorofila-a (Corcho y Valle, 2023), no siendo así en el caso de otros indicadores de vital importancia para los estudios de calidad del agua tales como la transparencia y temperatura del agua y el pH. Consecuentemente, urge comenzar a realizar este tipo de labores, para contar con algunas ecuaciones de regresión que nos permitan estimar estos parámetros en nuestros embalses de forma remota. De acuerdo con lo expuesto, el objetivo del presente trabajo es evaluar las posibilidades de empleo de imágenes satelitales del Landsat-8, para la estimación de parámetros de calidad del agua tales como: pH, temperatura y transparencia del agua en el embalse Abreus, provincia Cienfuegos, Cuba, a través de algoritmos matemáticos.

2. METODOLOGÍA.

2.1 Descripción del área de estudio.

El embalse Abreus (Fig. 1), se construyó en 1986 (Betancourt, 2011), para ser utilizado en el riego agrícola, pero con el paso del tiempo se destinó también al abastecimiento de agua a industrias cercanas y a un sector poblacional de la ciudad de Cienfuegos (Valle *et al*, 2021). Está localizado en la región centro sur de Cuba, provincia Cienfuegos, específicamente entre los 22°16'50'' y los 22°18'40'' de latitud norte y los 80°31'30'' y 80°34'20'' de longitud oeste. El área del embalse es de 5,40 km² y posee un volumen de almacenamiento de 35 hm³.

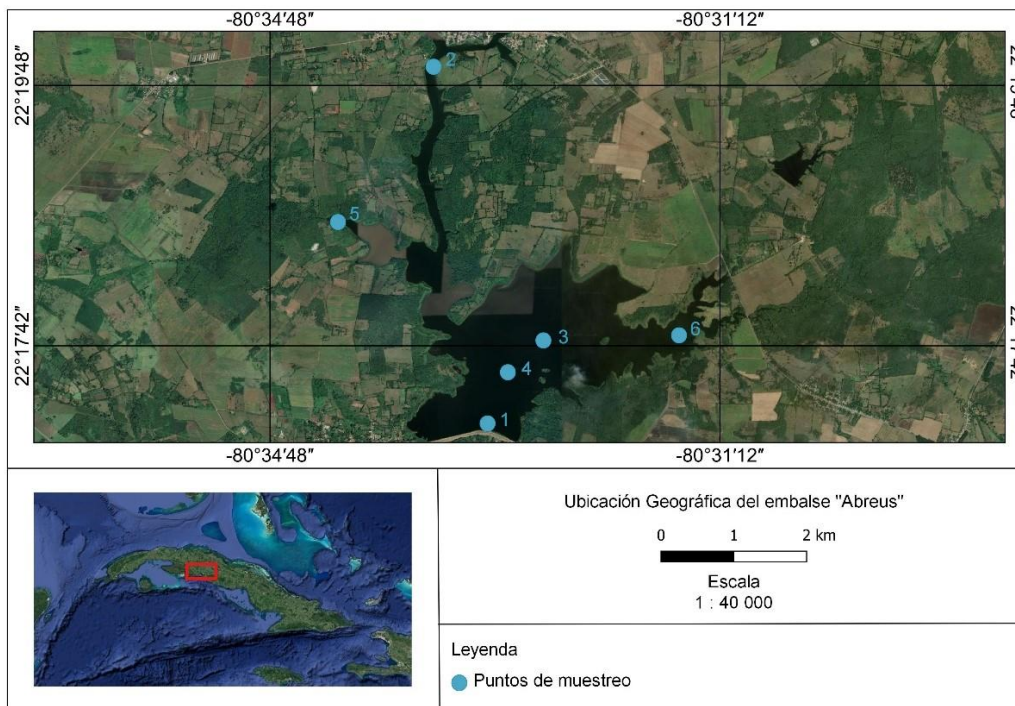


Figura 1. Ubicación geográfica del Embalse “Abreus”.

2.2 Muestreo en campo.

Las muestras de campo utilizadas en esta investigación se tomaron entre el 6 de abril de 2016 y el 7 de diciembre de 2021, en el horario de la mañana, por el Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC), fueron en total 20 muestreos, distribuidos durante el período de seca y de lluvia. Se muestra la ubicación geográfica de los puntos de muestreo (Fig. 1) y sus coordenadas (Tabla 1). Las coordenadas geográficas de las estaciones se determinaron mediante la ayuda de un receptor GPS (Garmin etrex-10). Se realizaron muestreos de tres parámetros: temperatura, transparencia del agua y pH, las muestras para el análisis del pH y la temperatura se tomaron a nivel subsuperficial (0,5 m), por el método potenciométrico y el principio de termopares respectivamente, además, se obtuvo la transparencia del agua, medida empleando el disco de Secchi. La cantidad de muestras tomadas para cada parámetro varía debido a que en ocasiones no fue posible medir en todos los puntos por dificultades con el aseguramiento logístico e incluso hubo puntos en los que no se pudieron medir todos los parámetros a causa de inconvenientes en la zona de muestreo.

2.3 Adquisición de las imágenes satelitales.

Las imágenes obtenidas del satélite Landsat-8 OLI-TIRS, poseen Precisión de Nivel 1 y Terreno Corregido (L1TP). Fueron empleadas 20 imágenes, descargadas de forma gratuita, a través de la página web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<http://earthexplorer.usgs.gov>), la resolución espectral y espacial de estas imágenes se muestra en Ariza (2013). Debido a la presencia de nubosidad en la zona de trabajo durante la toma de las imágenes por los sensores, existe una

diferencia, en el caso menos favorable, de hasta 9 días entre la fecha de muestreo y la fecha de la toma de las imágenes.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo.

2.4 Procesamiento digital de las imágenes satelitales.

Nº	Nombre del punto	Latitud	Longitud	Sistema de referencia
1	Obra de Toma	22°16'58,58" LN	80°33'3,2" LO	WGS-84
2	Entrada del Río Damují	22°19'59,86" LN	80°33'28,71" LO	
3	Centro del embalse 1	22°17'44,81" LN	80°32'27,31" LO	
4	Centro del embalse 2	22°17'34,12" LN	80°32'58,92" LO	
5	Entrada del Río Almendrillo	22°18'43,06" LN	80°34'17,65" LO	
6	Entrada del Río Limones	22°17'44,92" LN	80°31'32,41" LO	

El primer paso es realizar la corrección atmosférica a la imagen multispectral, utilizando el módulo FLAASH del software ENVI 5.3, que emplea el modelo de transferencia radiactiva MODTRAN 4 (Aguilar *et al*, 2014), su objetivo principal es proporcionar una derivación precisa, basada en la física, de las propiedades atmosféricas, para incorporarlas en una matriz de corrección y finalmente, invertir las mediciones de radiancia en el detector con valores de reflectancia en la superficie (Cooley *et al*, 2002).

Eliminar los efectos de la atmósfera en la región térmica es también esencial y necesario para utilizar imágenes de este tipo en estudios de temperatura absoluta (Barsi *et al*, 2003), para lograr lo anterior y obtener la temperatura de la superficie del agua se emplea la ecuación 1, desarrollada por Jiménez-Muñoz y Sobrino (2003).

$$T_s = \gamma \left[\varepsilon^{-1} (\psi_1 * L_\lambda + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta \quad (1)$$

Donde T_s es la temperatura de la superficie del agua, L_λ es la radiancia espectral en la región del infrarrojo térmico captada por el sensor, ε es la emisividad del agua, para este caso 0,9885 (Lamaro *et al*, 2013), ψ_1 y ψ_2 son parámetros que obedecen a la función de Planck y ψ_i son funciones atmosféricas dependientes del contenido de vapor de agua de la atmósfera, obtenido este último de <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>, para la estación 78384 localizada en Islas

Caimán; ψ_1 , ψ_2 y ψ_3 se computan por las fórmulas y coeficientes propuestos por Jiménez-Muñoz *et al* (2014), este cálculo se realiza con la banda 10, debido a que se encuentra en una región de menor absorción atmosférica (Jiménez-Muñoz *et al*, 2014).

2.5 Calibración de los modelos de regresión

El objetivo es evaluar la relación que existe entre los parámetros de calidad del agua empleados en esta investigación y los valores de los píxeles de las bandas multiespectrales y térmicas corregidas anteriormente, para esto se emplean 2/3 del total de muestras del registro histórico escogidas de forma aleatoria. Este análisis se realiza con el software STATGRAPHICS y el empleo de técnicas de regresión. Para evaluar los resultados de la regresión se emplean tres indicadores, el coeficiente de determinación (R^2), la raíz del error medio cuadrático (RMSE) y el NRMSE.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - p_i)^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{p_i} * 100 \quad (4)$$

Donde Y_i es el valor real de la muestra, y_i es el valor predicho por el modelo, p_i es el valor promedio de la muestra y n la cantidad de muestras.

2.6 Validación de los modelos seleccionados.

La validación de los algoritmos con mejores resultados del proceso anterior se logra mediante la determinación de la exactitud en la estimación de los parámetros de calidad del agua por estos modelos. En esta operación se calcula el RMSE y NRMSE, entre los datos estimados por los modelos del 1/3 restante de los datos de campo, empleando el programa Excel. Los modelos validados se emplean en la confección de los mapas temáticos sobre la distribución espacial de cada parámetro en el embalse, empleando el software QGIS versión 3.16.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Calibración y validación de los modelos de regresión.

La transparencia del agua o profundidad del disco Secchi, tiene una correlación significativa con la radiancia recibida por el satélite (Gholizadeh *et al*, 2016), la literatura existente mostró que este indicador se puede cuantificar utilizando bandas espectrales del visible, por ejemplo la banda del azul (Perdomo, 2015) y las bandas del azul costero y el verde (Pizani *et al*, 2020) y varias relaciones de banda, por ejemplo el cociente entre las bandas verde y azul (Tenjo *et al*, 2014), el cociente entre el azul y el verde (Delegido *et al*, 2019) y (Pereira-Sandoval *et al*, 2019). Además, según Topp *et al*

(2020), las recuperaciones de la claridad del agua mediante sensores remotos utilizan casi universalmente longitudes de onda y relaciones de banda que incluyen el espectro rojo de alguna manera, tal es el caso de los trabajos ejecutados por Ayala (2019), Rodrigues *et al* (2020), Zhang *et al* (2021) y Tao *et al* (2022). En este apartado, primeramente se realizó un estudio exploratorio inicial, que evalúa la correlación entre los valores de reflectancia de las bandas 1-5 y las muestras de campo, utilizando varios modelos matemáticos, el mismo evidenció que la correlación entre las bandas del visible y la transparencia del agua, para todos los algoritmos estudiados crece conforme aumenta la longitud de onda, obteniéndose los mayores valores en la banda roja, acorde a lo expuesto por Zhang *et al* (2021), a través de modelos polinomiales (Fig. 2a). Debido a que los mayores valores de correlación se observaron en las bandas 5 y 4, se elaboró un modelo polinomial que emplea este cociente, su gráfico ajustado se muestra en la Fig. 3a, se obtuvo un $R^2=86,50$ %, $RMSE=0,44$ m y $NRMSE=32,33$ %. Para la calibración de los modelos se emplearon un total de 17 parejas de muestras, que varían entre los 0,3 y 3,19 m, con un valor medio de 1,36 m. Durante la validación del modelo seleccionado se emplearon ocho parejas de muestras que varían entre los 0,3 y 4,91 m, con una media de 1,54 m, se obtuvo un $RMSE=1,42$ m y $NRMSE=92,3$ %, (Tabla 2).

El pH (Potencial de hidrógeno), es el logaritmo negativo de la concentración de iones H^+ (Berdugo y Reales, 2016). De acuerdo con Betancourt *et al* (2009), el pH es la variable principal de la química de los sistemas acuáticos. A juicio de Dekker y Hestir (2015), el contenido de pH no puede determinarse directamente de imágenes satelitales, es decir, que no posee características ópticas activas, sin embargo, autores como Japitana y Burce (2019) y Pizani *et al* (2020) han obtenido buenos resultados en esta tarea. Según el estudio realizado por Abdelmalik (2018), el pH mostró buena correlación con la banda del infrarrojo de onda corta (banda 9 del sensor ASTER). Durante el estudio exploratorio llevado a cabo se evaluó el grado de correlación entre las bandas 1-7 y las muestras de campo haciendo uso de los mismos modelos matemáticos que en el parámetro anterior. En este apartado se obtuvieron valores de correlación bajos, el mayor de estos con la banda 6, perteneciente al infrarrojo de onda corta (Fig. 2b), mediante algoritmos polinomiales. Debido a esto se decidió correlacionar el logaritmo del pH, con una serie de índices creados con las bandas 1-7, empleando la regresión múltiple, por el método paso a paso, hacia atrás, se obtuvo un $R^2=80,68$ %, $RMSE=1,05$ u/pH y un $NRMSE=13,15$ %, el gráfico del modelo ajustado se muestra en la Fig. 3b, en este proceso se emplearon 25 pares de muestras que varían entre 7,25 y 9,25 u/pH, con una media de 7,96 u/pH. Para la validación se emplearon 13 pares de muestras, que varían entre 6,3 y 8,57 u/pH, con una media de 7,5 u/pH, se alcanzó un $RMSE=1,78$ u/pH y un $NRMSE=23,68$ %, (Tabla 2).

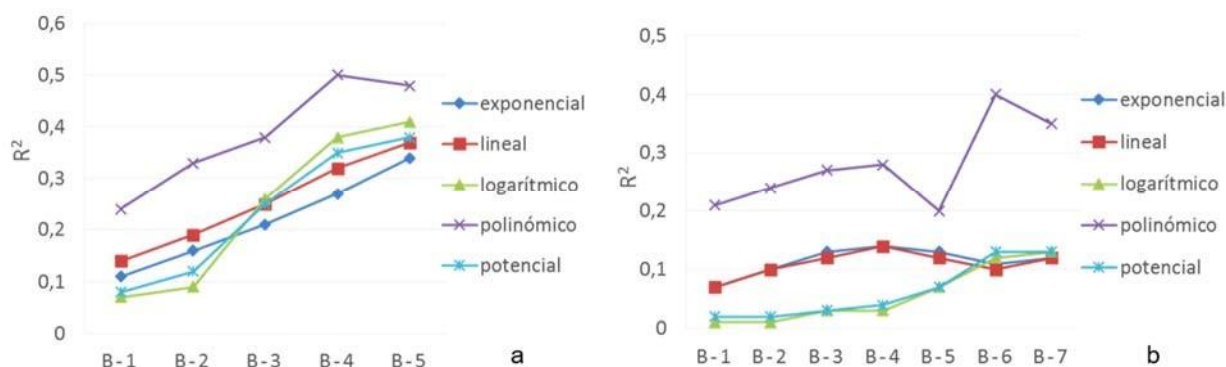


Figura 2. Correlación entre las bandas del visible e infrarrojo del Landsat-8 con la transparencia del agua (a) y el pH (b) medidos en campo.

La temperatura de la superficie del agua es una variable esencial para entender el clima en la Tierra (Vanhellemont, 2020). Las mediciones remotas de temperatura del agua pueden ser obtenidas con un sensor que detecte la radiación térmica (intervalos de 3–5 y 8–14 μm), emitida desde la parte superior de la superficie del agua (Gholizadeh *et al*, 2016). La ecuación empleada en este trabajo para obtener los valores de la temperatura del agua fue utilizada con éxito anteriormente, para estas superficies por autores tales como Lamaro *et al* (2013) y Basit *et al* (2023). La descarga de los datos sobre el vapor de agua de la atmósfera se vio entorpecida, hubo fechas en las que la estación no disponía de estos parámetros, lo cual afectó la cantidad de datos disponibles para el análisis estadístico; durante este, se calibró un algoritmo polinomial que relaciona los datos satelitales con los valores de campo, se obtuvo un $R^2=55,25\%$, un $\text{RMSE}=1,59\text{ }^\circ\text{C}$ y un $\text{NRMSE}=5,63\%$, su gráfico ajustado se muestra en la Fig. 3c, se utilizaron durante este proceso 20 pares de muestras que varían entre 24 y 31,2 $^\circ\text{C}$, con una media de 28,19 $^\circ\text{C}$. Para la validación se utilizaron nueve muestras, que varían entre los 25 y 30,6 $^\circ\text{C}$, con una media de 29,38 $^\circ\text{C}$, se alcanzó un $\text{RMSE}=1,65\text{ }^\circ\text{C}$ y un $\text{NRMSE}=5,62\%$, en la Tabla 2 se muestra el modelo matemático obtenido.

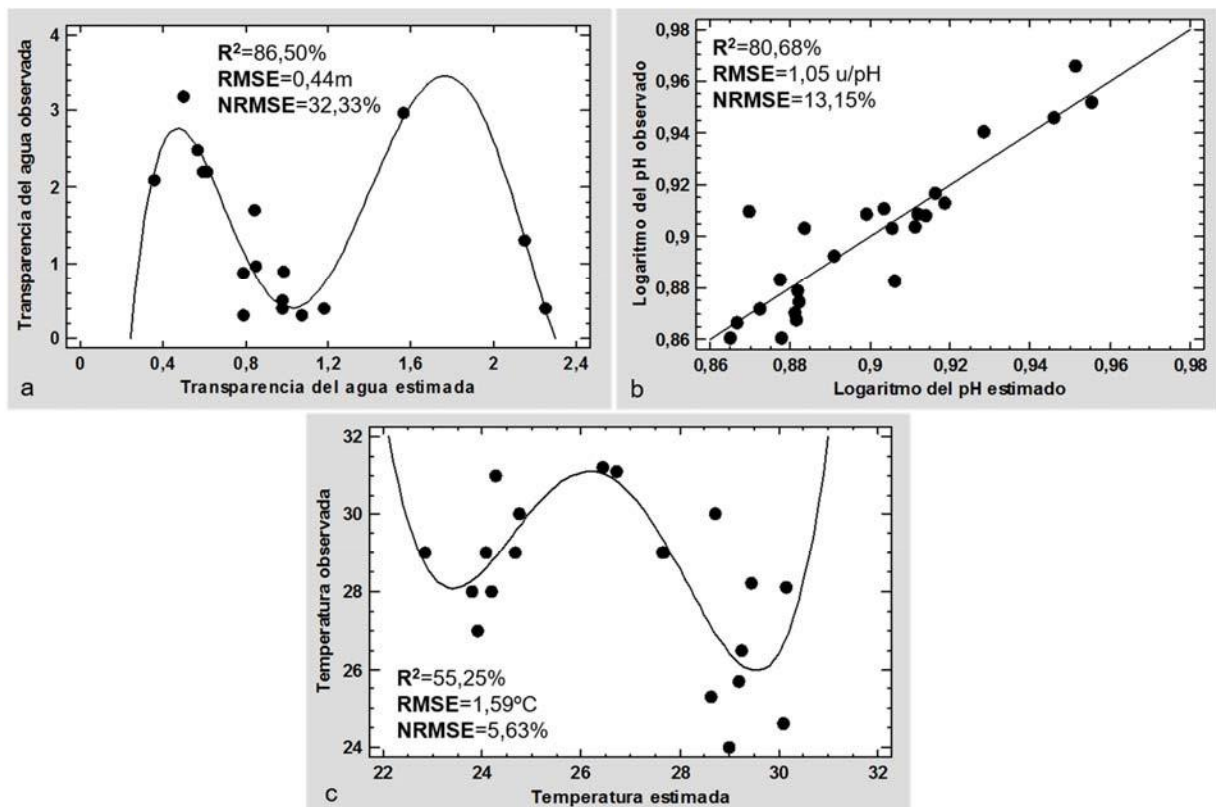


Figura 3. Gráficos sobre la calibración de los modelos para la transparencia del agua (a), el pH (b) y la temperatura (c).

Modelo matemático

$$\text{Transparencia del agua} = -14,5418 + 100,158 \cdot B5/B4 - 204,376 \cdot B5/B4^2 + 178,506 \cdot B5/B4^3 - 69,0597 \cdot B5/B4^4 + 9,72639 \cdot B5/B4^5$$

$$\text{LogpH} = -2,86235 + 0,236944 \cdot B1/B2 + 2,07255 \cdot B2/B3 + 1,96846 \cdot B3/B4 + 1,22823 \cdot B4/B5 + 0,788969 \cdot B5/B6 + 0,722786 \cdot B6/B7 - 1,94652 \cdot B2/B4 - 0,6964 \cdot B3/B5 - 1,982 \cdot B4/B6 - 0,416965 \cdot B5/B7 + 1,13705 \cdot B4/B7 + 0,439436 \cdot B2/B6 + 1,01305 \cdot B1/B6 - 0,899179 \cdot B1/B7$$

$$\text{Temp} = 21377,7 - 3281,48 \cdot T_s + 188,317 \cdot T_s^2 - 4,78172 \cdot T_s^3 + 0,0453257 \cdot T_s^4$$

Tabla 2. Modelos matemáticos obtenidos.

El resultado alcanzado para la transparencia del agua permitió conocer la factibilidad de realizar un estudio exploratorio inicial, que identifique las bandas que posean una mayor correlación con cada

parámetro y sobre qué tipo de funciones tiene su basamento, para, sobre esta teoría, elaborar los algoritmos finales de cada indicador y registró, además, a los modelos polinomiales, poco empleados en trabajos anteriores, como los más idóneos para la estimación de estos parámetros de calidad del agua, mostrando la mayor correlación entre las muestras de campo y los valores provenientes de las imágenes.

De acuerdo con Zhang *et al* (2021), la precisión de los modelos matemáticos está relacionada de forma inversa con el intervalo de tiempo entre el muestreo en campo y la toma de las imágenes, por lo que para obtener resultados más significativos en la estimación de indicadores de calidad del agua mediante imágenes de percepción remota, es esencial lograr la menor diferencia de tiempo posible entre ambos datos y de esta forma, conseguir una mejor calibración y validación de los algoritmos obtenidos, que no es el caso de esta investigación, en la cual solo dos muestreos en campo coincidieron con la fecha de paso del satélite y en solo siete de ellos la diferencia era menor de tres días, lo cual atenta contra el resultado final del trabajo; del mismo modo, si solamente se hubiesen empleado los datos para los cuales el intervalo de tiempo era menor de tres días, como recomiendan algunos investigadores, se incluirían pocas muestras en los procesos de calibración y validación de los modelos matemáticos, lo cual reduciría igualmente la precisión y estabilidad de dichos modelos. En este sentido, se recomienda la planificación de los proyectos de investigación con anterioridad a la ejecución de los trabajos, de tal forma que se hagan coincidir en fecha y hora la toma de muestras en campo con el paso del satélite.

3.2 Confección de los mapas temáticos.

Los modelos validados se le aplicaron a la imagen del 27 de noviembre de 2020, lo que permitió conocer la distribución espacial de los parámetros estudiados en esta investigación, para esta fecha. A continuación, se muestran los mapas confeccionados para la transparencia del agua, el pH y la temperatura (Fig. 4).

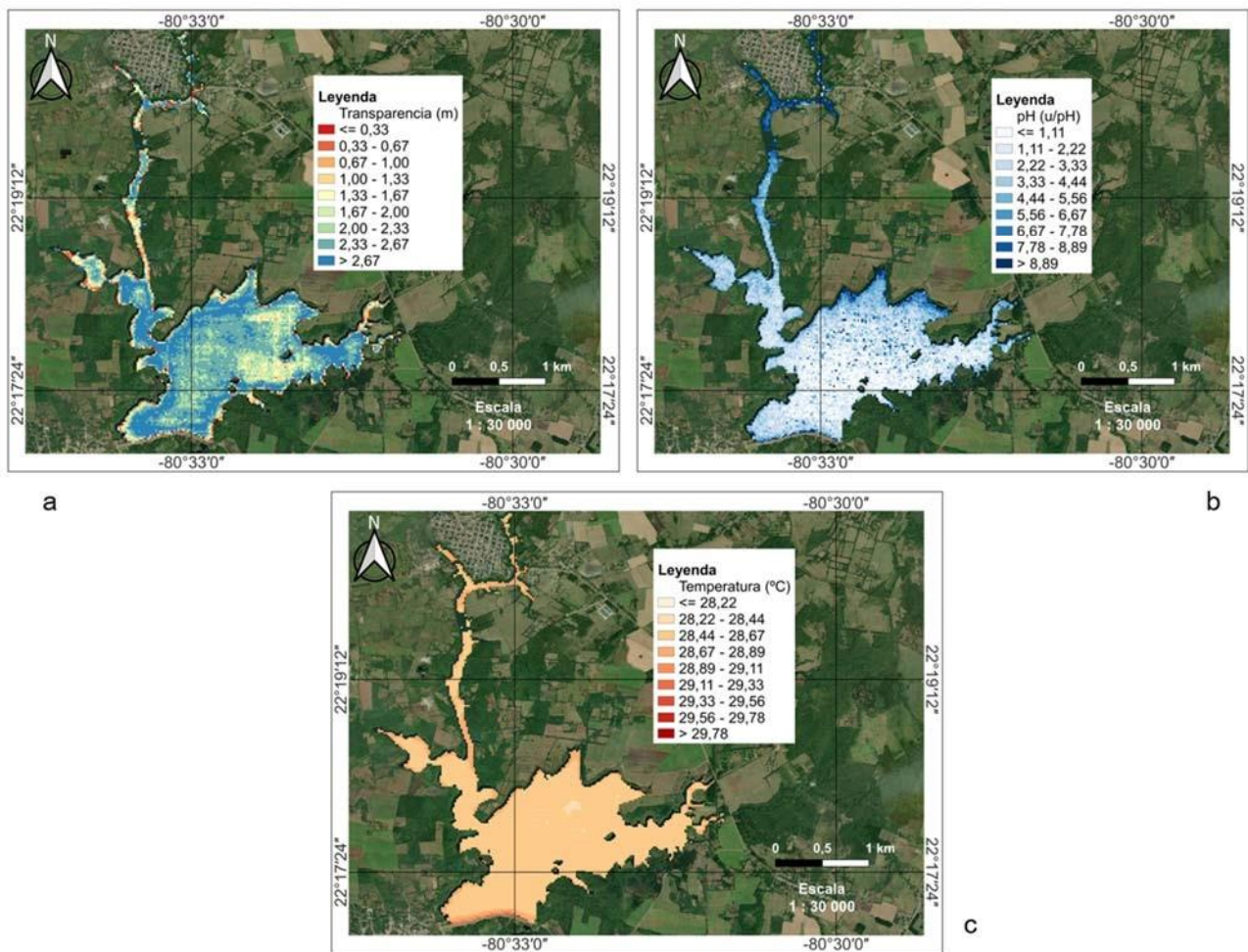


Figura 4. Mapas temáticos sobre la distribución espacial de la transparencia del agua (a), el pH (b) y la temperatura (c).

Los resultados obtenidos demuestran que se pueden utilizar imágenes satelitales del Landsat-8 en la determinación de algunos parámetros de calidad del agua en los embalses de la isla. El principal logro de este trabajo radica en la obtención de nuevos algoritmos para la estimación de la transparencia del agua y el pH, siendo estos los primeros en Cuba, y la comprobación de las posibilidades de empleo de una ecuación de canal simple para estimar la temperatura de la superficie del agua; a su vez, esta investigación supone un paso de avance en el desarrollo de la Tarea Vida y los ODS en Cuba, más específicamente, a fortalecer los sistemas de monitoreo, vigilancia y alerta temprana, para evaluar sistemáticamente el estado y la calidad del agua. Las técnicas de percepción remota utilizadas, aunque poseen menor precisión en la obtención de los datos con respecto al muestreo en campo, significan un ahorro económico considerable y la disminución de personal e instrumental empleados en estas labores, este último en ocasiones difícil de adquirir debido al presupuesto con que se cuenta, su uso representa un aumento de la periodicidad en la obtención de los datos sin la necesidad continua de ir a campo, por otra parte, las imágenes satelitales ofrecen la posibilidad de estimar el parámetro analizado en la totalidad del

espejo de agua del embalse, lo cual se hace engorroso para el muestreo puntual. Aunque la resolución espacial del sensor (30 m), no es la ideal para los trabajos en los embalses nacionales, debido a sus pequeños tamaños, garantiza su empleo en el embalse Abreus y si, según Sagan (2020), un satélite con resolución espacial < 15 m puede mapear todos los lagos globales con un área de 0.002 km², el Landsat-8, podría emplearse en embalses con menor superficie que la presa Abreus.

4. CONCLUSIONES.

1. Esta investigación demuestra que el empleo de imágenes satelitales constituye un complemento al muestreo en campo, lo cual posibilita un mejoramiento en los métodos de monitoreo de la calidad de las aguas superficiales en Cuba, esta circunstancia, unida al incremento en la actualidad de la contaminación del medio acuático, debido a diversas causas, aumentan el interés por los resultados obtenidos en este trabajo.
2. Los modelos de regresión polinomial se destacaron por ser los más efectivos en la estimación de los indicadores de calidad del agua empleados en esta investigación para el embalse Abreus.
3. Se lograron calibrar y validar tres algoritmos matemáticos, para estimar la transparencia, temperatura del agua y el pH en el embalse Abreus, con resultados estadísticos satisfactorios. La precisión lograda por estos modelos con el empleo de imágenes del Landsat-8, manifiestan la factibilidad del uso de este satélite y los similares de esta serie en el monitoreo continuo y a largo plazo de los parámetros mencionados anteriormente.
4. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, es recomendable el estudio de otros modelos matemáticos, que logren una mayor correlación entre la temperatura superficial del agua y las imágenes satelitales, se debe profundizar igualmente, en las posibilidades de empleo de otros sensores remotos satelitales, que permitan elevar la eficacia de los datos obtenidos, para evaluar la calidad del agua, así como, en las particularidades de otros parámetros que puedan ser estimados mediante estas técnicas.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Abdelmalik, K.W. (2016). Role of statistical remote sensing for Inland water quality parameters prediction. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 21, 193–200. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.12.002>.

Aguilar, H., Mora Zamora, R. y Vargas Bolaños, C. (2014). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes ASTER, Rapideye, Spot 2 y Landsat 8 con el módulo FLAASH, del software ENVI. *Revista Geográfica de América Central*, 53, 39-59. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>.

Ariza, A. 2013. *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. DOI:10.13140/RG.2.2.21308.44167.

Jesús, C. y Herrera Díaz, M. A. (2019). Monitoreo de la calidad del agua del lago Chinchaycocha, mediante técnicas de teledetección espacial. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, 2(2), 23-31. <https://doi.org/10.46380/rias.v2i2.46>.

- Ballagas, A. (2021). *Tarea Vida en Cuba: avances y perspectivas*. Evento Científico AMBIMED 2021. Facultad de Ciencias Médicas de Bayamo, Granma. <https://ambimed2021.sld.cu/index.php/ambimed/2021/paper/viewFile/101/33>.
- Barsi, J., Barker, J. y Schott, J. (2003). An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a Single Thermal Band Earth-Sensing Instrument. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1294665>.
- Basit, A., Khalil, R., Khan, I., Zia, I. y Sadiq, S. (2023). Comparing radiative transfer equation method (rtem) and the generalized single-channel method (gscm) for retrieving sea surface temperature along the Karachi coast, Pakistan. *FUUAST Journal of Biology*, 13(1), 27-37. <https://fuuastjb.org/index.php/fuuastjb/article/view/724>.
- Berdugo, A. y Reales, G. (2016). *Análisis multiespectral de imágenes satelitales para evaluar variaciones espacio - temporales en la calidad del agua del embalse el Guájaro, Atlántico*. [Tesis de Grado, Universidad de la Costa]. <http://repositorio.cuc.edu.co>.
- Betancourt, C. (2011). *Procedimiento para el análisis de la calidad del agua en algunos embalses de la provincia de Cienfuegos, Cuba*. [Tesis de Doctorado, Universidad de Alicante]. <https://dialnet.unirioja.es>.
- Betancourt, C., Suárez, R. y Toledo, L. (2009). Patrones de distribución temporal de algunas variables físicas y químicas en el embalse Paso Bonito, Cienfuegos, Cuba. *Limnetica*, 28(1), 2334. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3008040>.
- Betancourt, C., Suárez, R. y Toledo, L. (2010). Variabilidad iónica y características tróficas del embalse de Abreus, Cuba. *Limnetica*, 29(2), 341-352. <https://www.limnetica.net/documentos/limnetica/limnetica-29-2-p-341.pdf>.
- Briceño, I., Pérez, W., San Miguel, D. y Ramos, S. (2018). Determinación de calidad de agua en el Lago Vichuquén, con imágenes de satélite Landsat 8, sensor OLI, año 2016, Chile. *Revista de Teledetección*, 52, 67-78. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.10126>.
- CITMA. (2016). *Estrategia ambiental 2016/2020* [Archivo PDF]. <https://repositorio.geotech.cu/jspui/bitstream/1234/2727/1/Estrategia%20Ambiental%20Nacional%202016-2020.pdf>.
- CITMA. (31 de marzo de 2024). *Principales problemas medioambientales*. <https://www.citma.gob.cu/principales-problemas-ambientales-ean/>.
- Cooley, T., Anderson, G. P., Felde, G. W., Hoke, M. L., Ratkowski, A. J., Chetwynd, J.H., y Gardner, J.A. (2002). FLAASH, a MODTRAN4-based Atmospheric Correction Algorithm, Its Application and Validation. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. DOI:10.1109/IGARSS.2002.1026134.
- Corcho Amador, J. A. y Valle Pombrol, A. (2023). Empleo de técnicas de percepción remota para la estimación de clorofila-a en el embalse Abreus. *Revista Cubana de Geomática*, 3(1). <https://geomatica.geocuba.cu/rcg/article/view/76>.
- Dekker, A. G. y Hestir, E. L. (2012). *Evaluating the Feasibility of Systematic Inland Water Quality Monitoring with Satellite Remote Sensing* [Archivo PDF]. <https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=csiro:EP117441&dsid=DS10>.
- Delegido, J., Urrego, P., Vicente, E., Sòria-Perpinyà, X., Soria, J.M., Pereira-Sandoval, M., Ruiz-Verdú, A., Peña, R. y 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. <https://doi.org/10.4995/raet.2019.12603>.

Dörnhöfer, K. y Oppelt, N. (2016). Remote sensing for lake research and monitoring – Recent advances. *Ecological Indicators*, 64, 105-122. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.009>.

Gholizadeh, M., Melesse, A. y Reddi, L. (2016). A Comprehensive Review on Water Quality Parameters Estimation Using Remote Sensing Techniques. *Sensors*, 16, 1298. doi:10.3390/s16081298.

Hernández, L. (2021). *Desarrollo de cuatro modelos matemáticos utilizando información procedente de los satélites Landsat 7, 8 y AMSA -periodo 2008-2014-, para establecer la condición físico-química y trófica del lago de Amatitlán, municipio de Amatitlán, Guatemala*. [Trabajo de Grado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. <http://www.repositorio.usac.edu.gt>.

Japitana, M. y Burce, M. (2019). A Satellite-based Remote Sensing Technique for Surface Water Quality Estimation. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 9(2), 39653970, DOI:10.48084/etasr.2664.

Jiménez-Muñoz, J., Sobrino, J. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 108(22), 4688, doi:10.1029/2003JD003480.

Jiménez-Muñoz, J., Sobrino, J., Skokovic, D., Mattar, C. y Cristóbal, J. (2014). Land Surface Temperature Retrieval Methods From Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data. *IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS*, 11(10), <https://ieeexplore.ieee.org/document/6784508>.

Lamaro, A., Mariñelarena, A., Torrusio, S. y Sala, S. (2013). Water surface temperature estimation from Landsat 7 ETM+ thermal infrared data using the generalized single-channel method: Case study of Embalse del Rio Tercero (Córdoba, Argentina). *Advances in Space Research*, 51, 492–500. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2012.09.032>.

Martínez García, I. (2017). *Monitorización de la calidad del agua en embalses mediante técnicas de observación remota*. [Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Cantabria]. <http://repositorio.unicam.es>.

Palmer, S., Kutser, B. y Hunter, P. (2015). Remote sensing of inland waters: challenges, progress and future directions. *Remote Sensing of Environment*, 157, 1-8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.021>.

Peraza Escarrá, R. (2017). *Diversidad y abundancia de fitoplancton del embalse Abreus (Cienfuegos, Cuba)*. [Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Biología Marina y Acuicultura con Mención en Ecología Marina, Universidad de La Habana]. <http://hdl.handle.net/1834/10996>.

Perdomo Vanegas, A. 2015. *Predicción de parámetros físico químicos de calidad del agua mediante el uso de sensores remotos: caso de estudio embalse del Neusa*. [Tesis de Maestría, Universidad de Bogotá]. <http://expeditiorepositorio.utadeo.co>.

Pereira-Sandoval, M., Urrego, E., Ruiz-Verdú, A., Tenjo, C., Delegido, J., Soria-Perpinyà, X., Vicente, E., Soria, J. y Moreno, J. (2019). Calibration and validation of algorithms for the estimation of chlorophyll-a concentration and secchi depth in inland waters with Sentinel-2. *Limnetica*, 38(1): 471-487 (2019). DOI: 10.23818/limn.38.27.

- Pizani, F., Maillard, P., Ferreira, A. y Amorim, C. (2020). Estimation of water quality in a reservoir from Sentinel-2 MSI and Landsat-8 OLI sensors. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals>.
- Presidencia y Gobierno de Cuba. (5 de mayo de 2023). Objetivos de Desarrollo Sostenible en Cuba, I Informe Nacional Voluntario Cuba. <https://www.presidencia.gob.cu/es/gobierno/objetivos-de-desarrollo-sostenible-en-cuba>.
- Rodríguez, W., Escartín, E., Fernández, H. y Valcarce, R. (2022). *Estado actual del empleo de la teledetección para el estudio de las variaciones espaciales y temporales de los ecosistemas relacionados con el agua* [Archivo PDF]. Departamento de Geociencias, CUJAE, La Habana. <https://www.researchgate.net/publication/364848711>.
- Sagan, V., Peterson, K., Maimaitijiang, M., Sidike, P., Sloan, J., Greeling, B., Maalouf, B. y Adams, C. (2020). Monitoring inland water quality using remote sensing: potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing. *Earth-Science Reviews*, 205. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103187>.
- Tao, H., Song, K., Liu, G., Wang, Q., Wen, Z., Jacinthe, P-A., Xu, X., Du, J., Shang, Y., Li, S., Wang, Z., 1, Lyu, L., Hou, J., Wang, X., Liu, D., Shi, K., Zhang, B. y Duan, H. (2022). A Landsat-derived annual inland water clarity dataset of China between 1984 and 2018. *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 79–94. <https://doi.org/10.5194/essd-14-79-2022>.
- Tenjo, C., Ruiz-Verdú, A., Delegido, J., Peña, R. y Moreno, J. 2014. Determinación de componentes ópticamente activos en aguas continentales a partir de imágenes LANDSAT 8. *Memorias de XVI Simposio Internacional SELPER 2014*. <https://selper.org.co/papers-XVISimposio/Fotogrametria-PDI-Fusion-de-datos/FP11>.
- Toming, K., Kutser, T., Laas, A., Sepp, M., Paavel, B. y Nõges, T. (2016). First Experiences in Mapping Lake Water Quality Parameters with Sentinel-2 MSI Imagery. *Remote Sensing*, 8, 640. doi:10.3390/rs8080640.
- Topp, S.N., Pavelsky, T., Jensen, B., Simard, M. y Ross, M. (2020). Research Trends in the Use of Remote Sensing for Inland Water Quality Science: Moving Towards Multidisciplinary Applications. *Water*, 12, 169. doi:10.3390/w12010169.
- Valle, A., Comas, A., Castro, D., García, A. y Wilson, A. (2021). Planktonic cyanobacteria from the Abreus Reservoir, Cienfuegos, Cuba. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 16(1), 2029. [http://panamjas.org/pdf_artigos/PANAMJAS_16\(1\)_20-29.pdf](http://panamjas.org/pdf_artigos/PANAMJAS_16(1)_20-29.pdf).
- Vanhellemont, Q. (2020). Automated water surface temperature retrieval from Landsat 8/TIRS. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111518>.
- Wang, X. y Yang, W. (2019). Water quality monitoring and evaluation using remote sensing techniques in China: a systematic review. *Ecosystem Health and Sustainability*, 5(1), 47-56, DOI: 10.1080/20964129.2019.1571443.
- Zhang, Yi., Zhang, Yu., Shi, K., Zhou, Y. y Li, N. (2021). Remote sensing estimation of water clarity for various lakes in China. *Water Research*, 192. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.116844>.