

Empleo de la teledetección para estimar la calidad de las aguas en embalses de la República de Cuba

Use of remote sensing to estimate water quality in reservoirs in the Republic of Cuba

Héctor Manuel Fernández Núñez¹, Isabela Díaz Pérez², Daily González Henríquez³, Willy Roberto Rodríguez Miranda⁴

¹Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría Calle 114 No 11901 e/ Rotonda y Ciclo Vía, Marianao, La Habana, Cuba, CP 19390, Email: hector@civil.cujae.edu.cu

²Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría Calle 114 No 11901 e/ Rotonda y Ciclo Vía, Marianao, La Habana, Cuba, CP 19390, Email: isabeladp@civil.cujae.edu.cu

³Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría Calle 114 No 11901 e/ Rotonda y Ciclo Vía, Marianao, La Habana, Cuba, CP 19390, Email: dailygh@civil.cujae.edu.cu

⁴Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría Calle 114 No 11901 e/ Rotonda y Ciclo Vía, Marianao, La Habana, Cuba, CP 19390, Email: willy@civil.cujae.edu.cu

*Autor de correspondencia: willy@civil.cujae.edu.cu [wrodriguezml955@gmail.com]

Resumen

Los trabajos para estudiar la calidad del agua en los embalses son costosos y suelen ser también demorados, además solo se pueden hacer análisis puntuales que no permiten abarcar todo el cuerpo de agua. En la actualidad se emplea la teledetección para resolver este problema, permitiendo estudiar los embalses en toda su extensión, así como disminuir el tiempo de la obtención de los datos, no obstante, aún se precisa de tener mediciones in situ para correlacionarlas con los datos de reflectancia ofrecidos por las imágenes del satélite. Este trabajo tiene como objetivo proponer una metodología para hacer los estudios cualitativos y semicuantitativos de la calidad del agua, en las condiciones de Cuba, utilizando las técnicas de teledetección cuando no se cuenta con datos in situ. Para esto se realizó una investigación bibliográfica donde se extrajeron los modelos de regresión con mayor coeficiente de correlación, los cuales fueron aplicados en imágenes del Landsat 8 de la región occidental y central de Cuba. Como resultados, se obtuvo una metodología que involucra el cálculo del contenido de clorofila-a a partir del promedio de cinco modelos de regresión, el cálculo de la profundidad del disco de Secchi y el cálculo del índice de calidad del Agua (WQI). La cartografía obtenida de los parámetros, permitió realizar el análisis temporal entre los años 2013 al 2024 demostrando el carácter estacional que presenta la calidad del agua en los embalses.

Palabras clave: Calidad del agua, clorofila-a, Disco de Secchi, Landsat, teledetección.

Abstract

The work to study the quality of the water in the reservoirs is expensive and usually takes time, and only specific analyzes can be carried out, which do not allow the entire body of water to be covered. Currently, remote sensing is used to solve this problem, allowing the reservoirs to be studied in their entirety, as well as reducing the time to obtain the data. However, it is still necessary to have in situ measurements to correlate them with the data from reflectance offered by satellite images. This work aims to propose a methodology to carry out qualitative and semi quantitative studies of water quality, under the conditions of Cuba, using remote sensing techniques when in situ data are

not available. For this, a bibliographic research was carried out where the regression models with the highest correlation coefficient were extracted, which were applied in Landsat 8 images of the western and central region of Cuba. As a result, a methodology was obtained that involves the calculation of the chlorophyll-a content from the average of five regression models, the calculation of the depth of the Secchi disk and the calculation of the Water Quality Index (WQI). The cartography obtained from the parameters allowed the temporal analysis to be carried out between the years 2013 to 2024, demonstrating the seasonal nature of the water quality in the reservoirs.

Keywords: Water quality, chlorophyll-a, Secchi disk, Landsat, Remote sensing.

1. Introducción

El agua constituye el compuesto químico más esencial, no solo para la existencia de la propia vida, sino para su conservación y resiliencia. Dicho esto, su cuidado y preservación debería constituir una tarea fundamental para todos los seres humanos. Como es sabido el agua dulce representa un bajo porcentaje en cantidad comparada con toda la existente en nuestro planeta, no obstante, debido a su potabilidad, su uso clave en las actividades domésticas, industriales y de diversos sectores, como la agricultura, acuicultura, la generación de energía, la navegación, el esparcimiento y el turismo es la más utilizada y la que con mayor rapidez se agota. Por todo lo anterior, su monitoreo constituye una preocupación, no solo de los gobiernos de los diferentes países, sino también de los organismos internacionales como la ONU que la incluyó en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, la cual se compone de 17 objetivos y 169 metas, además de 232 indicadores que se miden a través de los datos estadísticos que se recogen por las instituciones autorizadas en cada país [1]. El objetivo 6 se centra en garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos. Establece como meta 6.6 la protección y restablecimiento de los ecosistemas relacionados con el agua [2], dentro de esta, el indicador 6.6.1 es descrito como el cambio en la extensión de los ecosistemas relacionados con este vital fluido con el paso del tiempo. Este indicador tiene por objeto reunir y suministrar datos sobre la extensión de estos ecosistemas relacionados con el agua y la cantidad y calidad del agua que contienen, en apoyo a todos los procesos de adopción de decisiones [3].

En resumen, la calidad de las aguas se basa principalmente en las características químicas, físicas, radiológicas y biológicas de las mismas por lo que se hace necesario realizar mediciones de algunos parámetros para hacer su evaluación. Los parámetros de calidad del agua (PCA) fundamentales que se miden son turbidez, las concentraciones de clorofila-a, nitrógeno, fósforo, oxígeno disuelto, nutrientes, algas nocivas y sólidos totales suspendidos, aunque se incluyen otros como la temperatura, la salinidad el PH y algunos compuestos químicos contaminantes. Esta cantidad de parámetros es necesario medirlos para una correcta valoración de la calidad de las aguas, generalmente se realizan in situ por lo que resultan muy costosos, requieren mucha mano de obra y además son lentos, para hacer un monitoreo constante con el agravante de ser mediciones puntuales que no caracterizan completamente los diferentes cuerpos de agua en estudio. El uso de los métodos convencionales tiene una capacidad limitada para capturar la heterogeneidad horizontal en el sistema hídrico a gran escala y extensión [4], por lo que desde hace un tiempo se vienen introduciendo las técnicas de teledetección, para mejorar la confianza y la predicción de estos parámetros.

Debido a la ventaja de la cobertura espacial, tanto global como temporal y dada la cantidad de plataformas satelitales con diferentes resoluciones espectrales, radiométricas y temporales, unido a que es posible por la reflectividad del agua, en sus diferentes condiciones, tener una correlación significativa entre estos valores radiométricos y diferentes parámetros de calidad es que se hace posible el uso, cada vez mayor, de estas técnicas. Los parámetros del agua ópticamente activos, como la claridad, la turbidez, el color del agua, los sólidos suspendidos totales, la clorofila-a y la materia orgánica disuelta coloreada, controlan las propiedades visuales de un cuerpo de agua [5].

Parámetros como la claridad y la turbidez afectan la absorción y dispersión de la luz, mientras que la clorofila-a (Chl-a) es un compuesto clave que se encuentra dentro de los organismos fotosintéticos (es decir, fitoplancton, algas, plantas verdes) y su fuerte pigmento verde es fácilmente detectable mediante teledetección satelital; por tal motivo son ampliamente utilizados para estos tipos de estudios. Aunque no es visible, la temperatura del agua también se puede observar utilizando la porción infrarroja térmica del espectro electromagnético que captan algunos de los principales satélites terrestres. Existen otros parámetros que no son ópticamente activos y que se obtienen de manera indirecta algunos de ellos son los contenidos de nutrientes, la demanda química de oxígeno entre otros.

Existen innumerables trabajos que versan sobre el uso de técnicas de teledetección para estimar PCA debido a que los sensores capturan firmas espectrales de los componentes del agua y esto ha permitido desarrollar una herramienta eficaz para su estudio ya sean cuantitativos o cualitativos. Ejemplo de estos tipos de investigaciones se pueden encontrar en: [6, 7, 8, 9 y 10]

En la mayoría de estas investigaciones se demuestra como las metodologías utilizadas para estimar los parámetros de calidad de agua a partir de datos in situ dependen de las características específicas de una zona y que por ende no pueden transferirse a otras regiones, aunque hay que decir, que existe una tendencia a desarrollar algoritmos más regionales transferibles o universales que puedan ser utilizados en diferentes regiones, principalmente utilizando técnicas de Inteligencia Artificial, ejemplo es el trabajo [4].

En Cuba, el departamento de Geociencias de la Cujae, desde el año 2022 trabaja en el proyecto PS113LH001-021 con el título “Aplicaciones de la teledetección al estudio de la variación espacio temporal de los ecosistemas relacionados con el agua en Cuba” que entre sus objetivos incluye el estudio sobre la calidad de las aguas. Por otro lado, se han realizado varios estudios de calidad de las aguas, por ejemplo, el embalse Abreus en la provincia de Cienfuegos ha sido uno de los más estudiados y resaltan los trabajos [11, 12 y 13] siendo este último una investigación donde se hace uso de las técnicas de la teledetección para hacer estudio de calidad y se obtienen dos modelos de regresión para la clorofila-a.

El objetivo de esta investigación es proponer una guía para hacer los estudios cualitativos y semi-cuantitativos de la calidad del agua utilizando las técnicas de teledetección cuando no se cuenta con datos in situ.

Se utilizó el embalse Ejército Rebelde de la Habana Cuba para probar la metodología el cual tiene una extensión suficiente grande para ser estudiada y se extendieron los resultados a dos áreas de la región occidental y central que abarcan las escenas 15-44 y 14-45 del Landsat 8.

2. Materiales y Métodos

La metodología para estudio de la calidad de las aguas a partir de la teledetección parte de realizar una investigación bibliográfica que permitió identificar, los materiales necesarios para realizar la propuesta, detectar cuáles son los procedimientos que más se emplean, así como determinar que nuevos aportes se podrían hacer, hasta finalmente conformar un grupo de procedimientos para alcanzar el objetivo final.

Se realizó una profunda búsqueda bibliográfica para resumir las principales metodologías y resultados de los procesos empíricos, analíticos semi-empíricos e incluso los obtenidos por trabajos con inteligencia artificial.

Estos tipos de investigaciones exigen que se hagan mediciones in situ en los cuerpos de agua estudiados con el objetivo de calibrar y validar los resultados de todo el procesamiento, que según [14] debe ser 60% de estos para calibración y 40% para validación. Esto es lógico teniendo en cuenta que la toma de la imagen precisa de factores que dependen del lugar geográfico de donde se obtuvo la imagen, la época del año, las condiciones del tiempo, así como la altura del sol entre otros factores que implican que los valores estimados de los PCA tengan sus diferencias. En este

proceso se deben escoger los parámetros que más se correlacionan con la reflectancia de las imágenes dadas por la teledetección. En la tabla 1 se presentan algunos de los más usados. Para esta investigación fueron seleccionados los parámetros: Clorofila-a y profundidad del disco de Secchi.

Tabla 1. Parámetros de calidad del agua más usados comúnmente en la teledetección. Tomado de [14]

Parámetros de calidad del agua [PCA]			
PCA	Siglas en inglés	Unidades	Actividad óptica
Profundidad del Disco de Secchi	CHL-a	mg/l	Activo
Temperatura	SDD	m	Activo
Sólidos Suspendidos Totales	T	°C	Activo
Materia Orgánica disuelta coloreada	SST	mg/l	Activo
Carbón Orgánico Total	CDOM	mg/l	Activo
Carbón Orgánico Disuelto	TOC	mg/l	Activo
Turbidez	DOC	mg/l	Inactivo
Salinidad de la superficie del Mar	TUR	NTU	Activo
Fósforo Total	SSS	PSU	Activo
Demanda Química de Oxígeno	TP	mg/l	Inactivo
Demanda Bioquímica de Oxígeno	COD	mg/l	Inactivo
Conductividad Eléctrica	BOD	mg/l	Inactivo
Profundidad del Disco de Secchi	EC	mS/cm	Activo

El siguiente paso es seleccionar las imágenes que se van a utilizar, para esto se debe tener en cuenta la resolución espacial, radiométrica y temporal, todo eso depende del objetivo a alcanzar, la escala y el presupuesto disponible. Esto último es importante porque a pesar que hay muchas imágenes con acceso público hay otras de mayor calidad que es necesario pagar para obtenerlas.

El Servicio Geológico de EE. UU. (USGS) ofrece productos científicos que se encuentran en varias colecciones y niveles en este caso se utilizó el nivel 2 (L2SP) de la colección 2 de sensores infrarrojos térmicos/imagen terrestre operacional.

Del sitio WEB <https://earthexplorer.usgs.gov/> se descargaron las imágenes correspondientes a la escena 16-44, 15-44 y 14-45 del Landsat 8 desde el 2013 al 2024 que ya vienen con la corrección atmosférica, por lo que sus valores están dados en reflectancia superficial correspondiente al occidente y la región central de Cuba, de la escena 16-44 se extrajo, la Presa Ejército Rebelde donde fue probada la metodología propuesta.

Estas imágenes vienen con valores de reflectancia de superficie que se generan en el Centro de Ciencia y Observación de Recursos Terrestres (EROS) con una resolución espacial de 30 metros. La misma es una estimación de la reflectancia espectral de la superficie de la Tierra tal como se mediría a nivel del suelo en ausencia de dispersión o absorción atmosférica. Los datos de reflectancia de la superficie Landsat 8-9 se generan a partir del Código de Reflectancia de la Superficie Terrestre (LaSRC) el cual utiliza la banda costera de aerosoles para realizar pruebas de inversión de aerosoles, utiliza datos climáticos auxiliares de MODIS y utiliza un modelo de transferencia radiactiva único.

Como último paso se realizó la conversión de escala de todas imágenes multiplicando por 0,0000275 y sumando (-0,2).

Una vez obtenidas las imágenes se preparó la siguiente secuencia de operaciones que difiere con el esquema general utilizado, porque no se cuenta con datos medidos in situ, por tal motivo, la idea es utilizar algunos de los modelos obtenidos por otros autores y probar cuáles funcionan en las condiciones de Cuba, partiendo de la hipótesis, que a pesar de las diferencias en las condiciones en que fueron obtenidas esas imágenes se puede tener, al menos una valoración cualitativa o semi-cuantitativa del comportamiento de la calidad de las aguas.

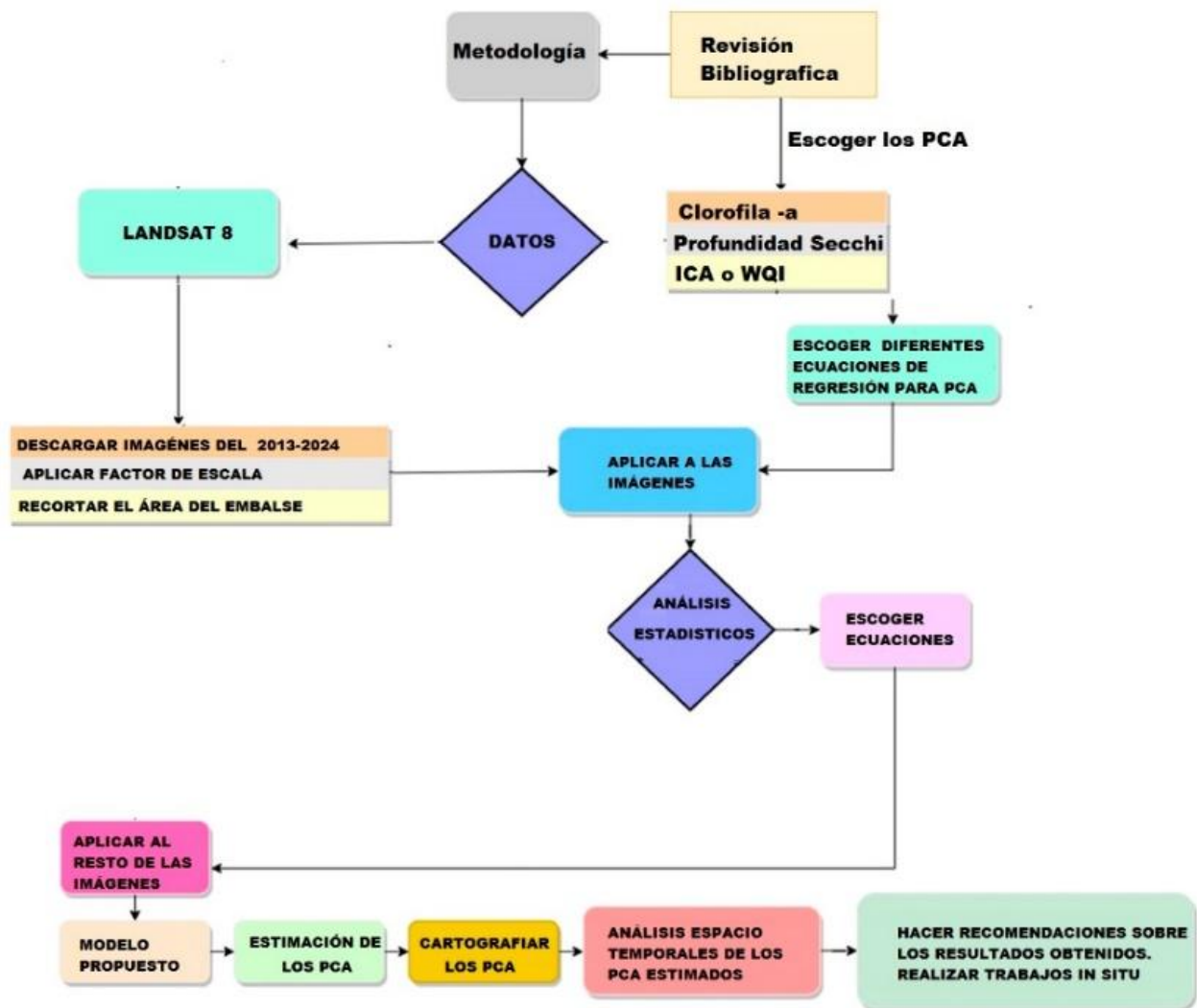


Fig.1 Metodología de trabajo de la investigación

3. Resultados y Discusión

Como resultado de la profunda revisión bibliográfica fueron escogidos algunos modelos de diferentes fuentes donde correlacionaban las imágenes del Landsat con la clorofila-a y la profundidad del Disco de Secchi.

Clorofila- a es un pigmento verde presente en algas y plantas que permite la absorción de la luz solar para que realicen el proceso de fotosíntesis. Generalmente es usada como indicador de productividad de algas en ecosistemas acuáticos, es decir que, mediante la concentración de Clorofila-a presente en el agua, se determina el aumento de biomasa de algas. Por lo general altas concentraciones indican mala calidad del agua. Su aumento se ve influenciado por la presencia de materia orgánica proveniente de las plantas de tratamiento de agua residual, de altos niveles de nutrientes de fertilizantes y escorrentía urbana. El Disco de Secchi permite la medición de la penetración luminosa en el agua por tanto es un reflejo de la turbidez de ríos, lagos y mares.

Se escogió como imagen de prueba la escena LC08_L2SP_016044_20130802_20200912_02_T1 que posee muy bajo porcentaje de nubes y donde el espejo de agua de la presa se reflejaba perfectamente. Se recortó solamente el área alrededor del embalse para garantizar que los valores de reflectancia del agua sean los mayores dentro de la imagen.

Se aplicaron todos los modelos consultados y como era de esperar la gran mayoría no ofrecían resultados lógicos debido a que estaban fuera de los valores permisibles para la clorofila-a ($\mu\text{g/l}$) y

profundidad del disco de Secchi (m). Esto es posible porque muchas veces en los artículos no aparecen las unidades de los parámetros utilizados para obtener las ecuaciones de regresión, además de lo ya señalado en cuanto a las diferencias de los valores de reflectividad dada las condiciones atmosféricas y geográficas donde fueron captadas las imágenes. También porque se hacen diferentes correcciones a las imágenes con diferentes algoritmos y en algunos casos utilizan la reflectancia del techo de la atmósfera (TOC) y no la superficial. Las ecuaciones que mejores resultados ofrecieron son las ecuaciones lineales, siendo las peores las exponenciales y las cuadráticas.

Se escogieron 10 modelos para la predicción de la clorofila-a (tabla 2), utilizando como criterio aquellos que tenían los mejores coeficientes de correlación con los datos medidos in situ (siempre con R mayor que 0.8), así como valores pequeños del error medio cuadrático (RMS).

Para el caso de la Profundidad del Disco de Secchi se escogieron los modelos propuestos por (Kloiber, Brezonik et al. 2002) donde para su obtención se tomaron datos de más de 500 lagos de Estados Unidos en varios periodos de tiempo.

Tabla 2. Ecuaciones escogidas para el análisis estadístico.

Ecuaciones escogidas		
ID	Ecuación	Autores
Chl-1	$Chl - a = 3.4 * \left(\frac{B3 - B2}{B4} + \frac{B5}{B4} \right) + 2.37$	[15]
Chl-2	$Chl - a = -14.61 * \left(\frac{B2}{B3 + B4} \right) + 10.98$	[16]
Chl-3	$Chl - a = -11.50 * \left(\frac{B2 - B3}{B2 + B3} \right) + 2.50$	[16]
Chl-4	$Chl - a = -10.40 * \left(\frac{B1}{B3 + B4} \right) + 7.93$	[16]
Chl-5	$Chl - a = 0.2818 * \left(\frac{B5 + B6}{B4} \right)^{3.497}$	[17]
Chl-6	$Chl - a = 7.820 * \left(\frac{B1}{B3} \right)^2 - 20.734 \left(\frac{B1}{B3} \right) + 13.767$	[18]
Chl-7	$Chl - a = -9,145 * \left(\frac{B4}{B1} \right)^2 + 9,639x - 2,444$	[18]
Chl-8	$Log(Chl - a) = 1.05 + 103.37 + B1 - 221.63 * B2 + 119.1 * B3 - 19.09 * B4 + 21.39 * B5$	[19]
Chl-9	$Chl - a = 4050.2 * B3 - 170.43$	[20]
Chl-10	$Chl - a = 13,053(NDVI) + 12,756$	[21]

Análisis exploratorio de los datos

Del análisis fueron eliminados los resultados de las ecuaciones 5 y 7 porque aparecían muchos valores aislados extremos aleatorios, relacionados con zonas de sombras, que las ecuaciones aplicadas a las imágenes convertían en valores muy altos o negativos, a pesar de que la gran mayoría estaban en los rangos lógicos de ambos parámetros. La estadística descriptiva, muestra cierta similitud entre los valores del parámetro clorofila-a estimados por los modelos analizados, igualmente sus desviaciones estándar no son muy grandes como se puede observar en la figura 2, solo el modelo CHL10 se aleja de la tendencia.

Análisis de correlación

Esta etapa es importante en el trabajo porque se partía del supuesto que, a pesar de las condiciones diferentes en la estimación de los parámetros de calidad del agua, la respuesta de los modelos, al menos cualitativamente, debería ser similar, a pesar de todos los factores que intervienen para que esto no sea exactamente así.

Se calcularon los coeficientes de correlación lineal y de Pearson porque se observó que no todos los parámetros estimados por las fórmulas presentan una correlación línea, los resultados se presentan en la figura 3 y las tablas 3 y 4. Como se puede observar los que mejor coeficiente de correlación poseen entre ellos son los modelos CHL1, CH2, CH3, CHL-4 y CHL-6.

Como resultado del análisis estadístico finalmente se escogieron 5 modelos para la clorofila-a y uno para la profundidad del Disco Secchi, para ser aplicados en el resto de las imágenes.

En el caso de la clorofila se calcularon las cinco ecuaciones y se promediaron debido a las altas correlaciones que poseen las mismas. Con esto se garantiza que el resultado final tenga la influencia de varios criterios.

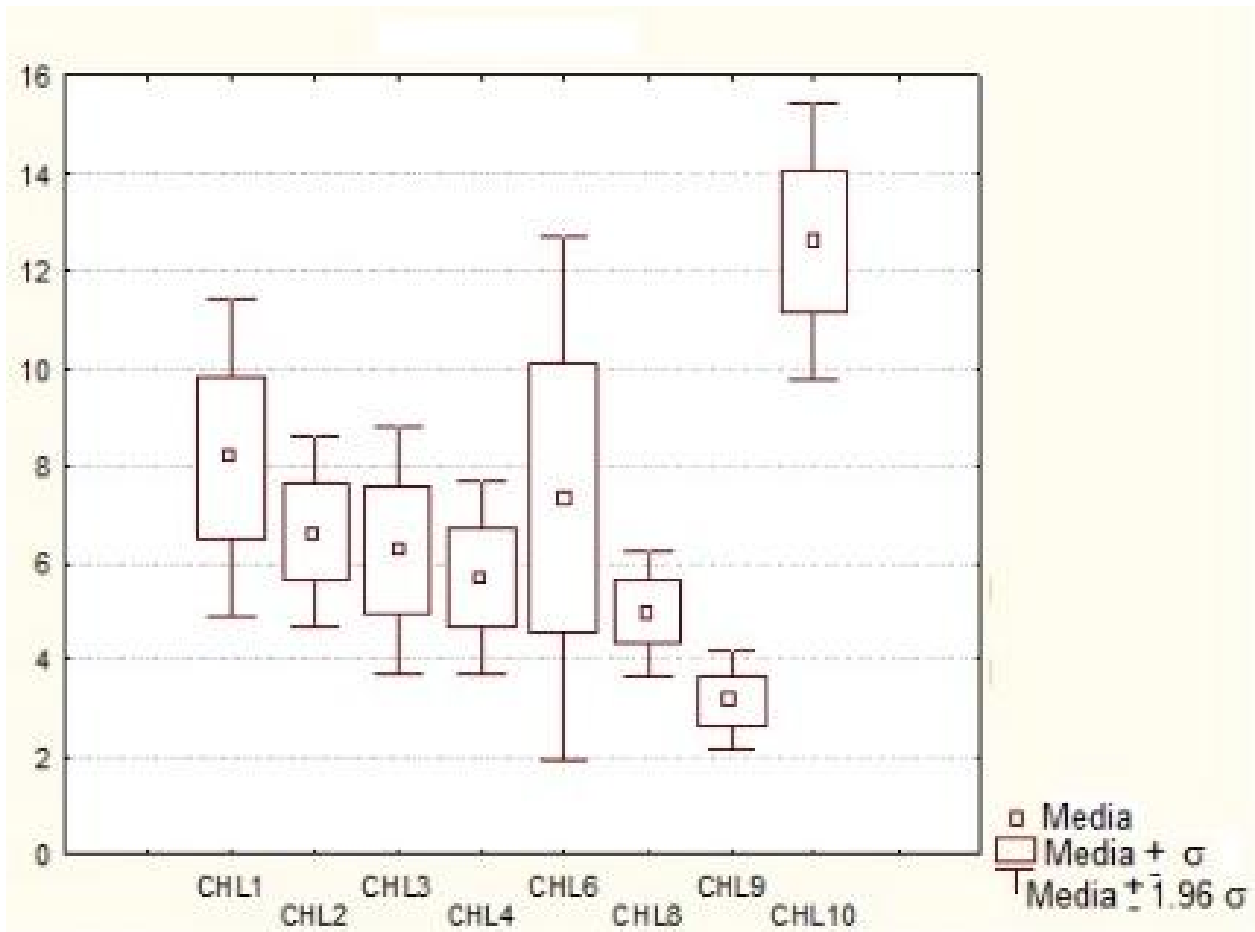


Fig.2 Gráfico de caja y de bigotes de los datos de clorofila-a(µg/l) estimados por las ecuaciones seleccionadas

Tabla 3. Matriz de correlación entre los resultados obtenidos por los modelos del ensayo.

	Chl-1	Chl-2	Chl-3	Chl-4	Chl-5	Chl-6	Chl-8	Chl-9	Chl-10
Chl-1	1,00								
Chl-2	0,44	1,00							
Chl-3	0,50	0,95	1,00						
Chl-4	0,45	0,97	0,94	1,00					
Chl-5	0,23	0,02	0,07	0,04	1,00				
Chl-6	0,46	0,97	0,94	0,99	0,05	1,00			
Chl-8	0,70	0,41	0,44	0,37	0,17	0,36	1,00		
Chl-9	0,61	0,39	0,41	0,33	0,25	0,32	0,92	1,00	
Chl-10	0,84	0,04	0,08	0,01	0,24	0,02	0,63	0,53	1

Tabla 4. Matriz de correlación de Pearson

Las correlaciones marcadas son significativas para $p < 0,05$								
	Chl-1	Chl-2	Chl-3	Chl-4	Chl-6	Chl-8	Chl-9	Chl-10
Chl-1	1,000	0,772	0,809	0,748	0,768	0,673	0,627	0,549
Chl-2	0,772	1,000	0,961	0,972	0,975	0,480	0,496	0,122
Chl-3	0,809	0,961	1,000	0,948	0,960	0,495	0,505	0,125
Chl-4	0,748	0,972	0,948	1,000	0,997	0,418	0,419	0,102
Chl-6	0,768	0,975	0,960	0,997	1,000	0,433	0,439	0,103
Chl-8	0,673	0,480	0,495	0,418	0,433	1,000	0,956	0,412

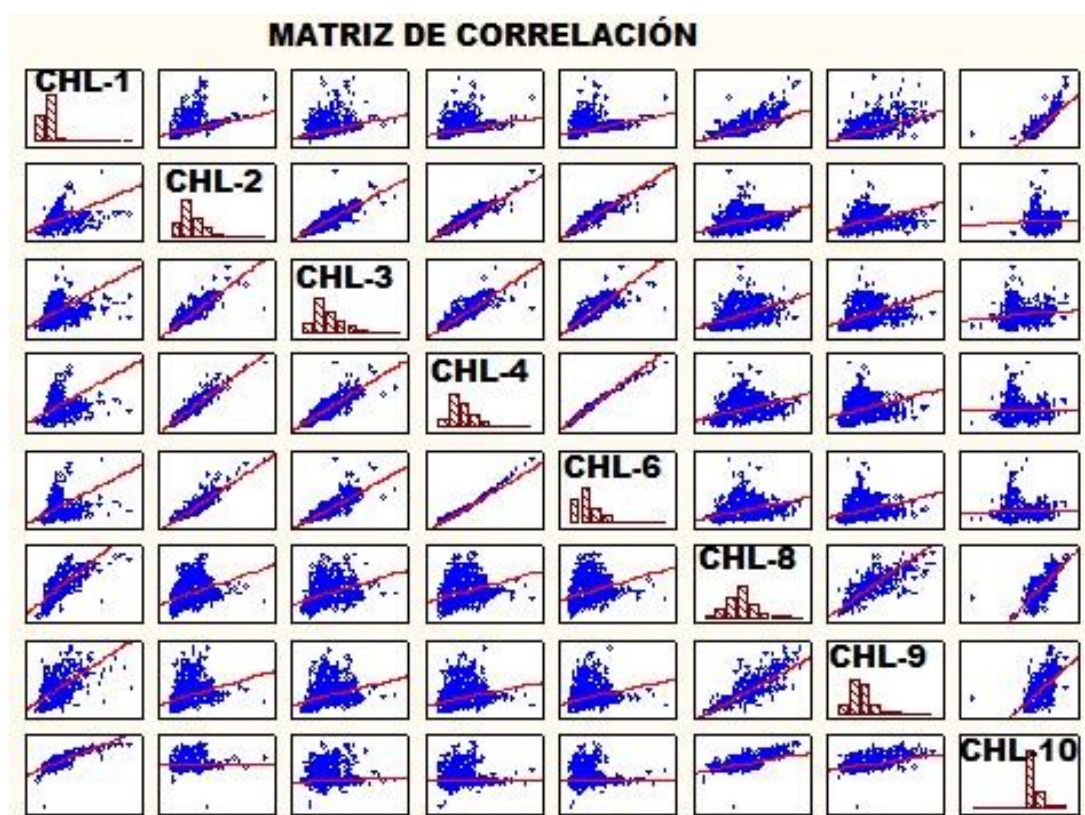


Fig.3 Gráfico de dispersión entre los resultados de las diferentes formulaciones para la clorofila-a.

Obtención de los parámetros de calidad del agua en el Sistema de Información Geográfica

Se creó un proyecto en ambiente de sistema de información geográfica utilizando las imágenes obtenidas del sitio de EarthExplorer desde el año 2013 hasta el 2024. El criterio fue utilizar las imágenes que no tuvieran nubes sobre el espejo de agua, en ocasiones hubo que utilizar algunas con nubes por lo que se creaban valores anómalos que hubo que eliminar.

Para probar las ecuaciones se utilizó la imagen LC08_L2SP_016044_20130802_20200912_02_T1, para lo cual se utilizó la calculadora raster del Qgis. Se puede observar en la figura 4 el comportamiento espacial del parámetro Clorofila-a calculada para todos los modelos.

Para la representación de los parámetros en los mapas se utilizó la clasificación trófica dada por Carlson (tabla 5) aunque se pudo observar durante la investigación bibliográfica que muchos autores hacen modificaciones a estos valores o utilizan las normas propias de sus países.

Para el caso de la profundidad del Disco de Secchi se utilizaron las ecuaciones dadas en [23], pudiendo comprobar que ambas dieron resultados similares como se puede observar en la figura 5.

Tabla 5. Relación entre índice trófico (IT) clorofila (Chl), y profundidad de Secchi (SD, metros), y la clasificación trófica según [22].

Relaciones obtenidas entre IT, Chl, SD y la clasificación trófica			
Índice del estado trófico	Chl [mg/l]	SD [m]	Clasificación trófica
<30-40	0-2.6	>8-4	Oligotrófico
40-50	2.6-20	4-2	Mesotrófico
50-70	20-56	2-0.5	Eutrófico
70-100+	56-155+	0.5-<0.25	Hipertrofico

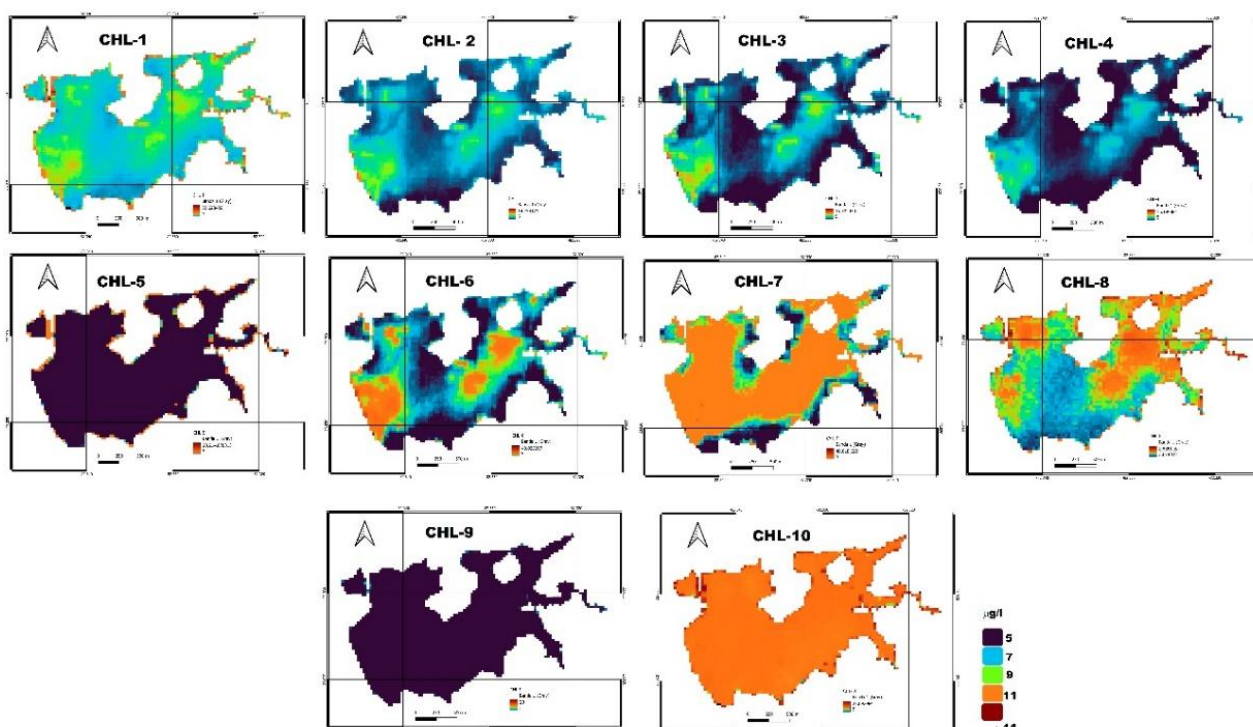


Fig.4 Mapas de clorofila a utilizando los modelos de prueba.

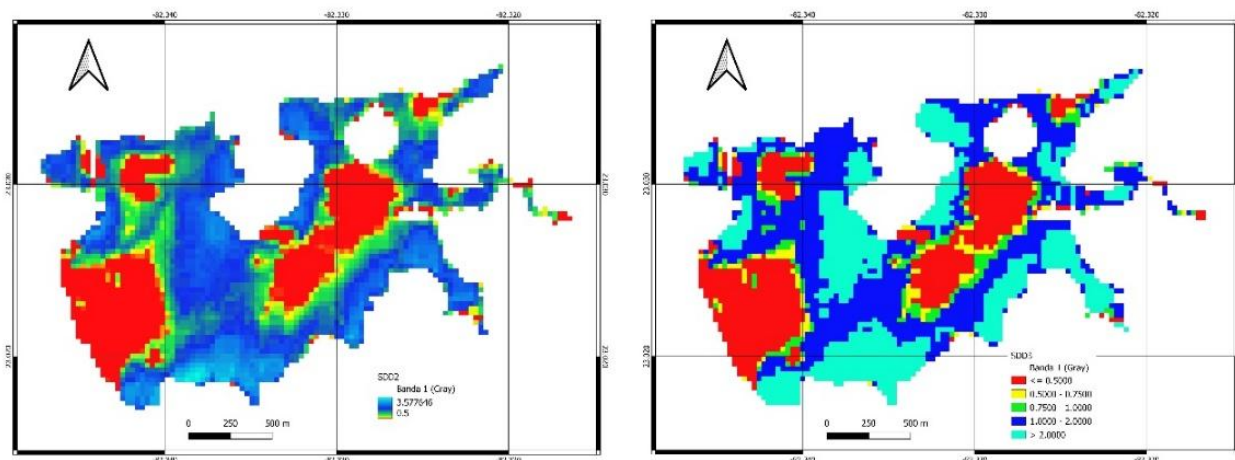


Fig.5 Ejemplos de mapas de Profundidad del Disco de Secchi obtenidas por los modelos propuestos por [23]

Una vez realizado el análisis espacial se corroboró lo obtenido por el análisis estadístico y se llegó a las siguientes conclusiones parciales:

Existen cinco modelos para la estimación de la clorofila-a que poseen una alta correlación y una buena representación de este parámetro espacialmente, por lo que para obtener valores aceptables que permitan hacer una valoración cualitativa lo más cercana a la realidad se sugiere que se utilicen las 5 y se le halle el promedio, por ser este el estadígrafo más robusto para este tipo de situación. Los modelos son las siguientes:

Para la clorofila-a:

$$Chl - a = \left(3.4 * \left(\frac{B3-B2}{B4} + \frac{B5}{B4} \right) + 2.37 \right) + \left(-14.61 * \left(\frac{B2}{B3+B4} \right) + 10.98 \right) + \left(-11.50 * \left(\frac{B2-B3}{B2+B3} \right) + 2.50 \right) + \left(-10.40 * \left(\frac{B1}{B3+B4} \right) + 7.93 \right) + \left(7.820 * \left(\frac{B1}{B3} \right)^2 - 20.734 \left(\frac{B1}{B3} \right) + 13.767 \right) / 5 \quad (1)$$

Para la profundidad del disco de Secchi:

$$\ln(SDD) = 1.066 * \left(\frac{B2}{B4} \right) - 0.0588 * B2 - 0.557 \quad (2)$$

Análisis espacio temporal de la calidad de las aguas del embalse Ejército Rebelde

Para realizar este análisis se utilizó el siguiente procedimiento:

Se escogieron dos imágenes anuales, una para el periodo lluvioso y otro para el seco, en el caso del año 2023 y hasta el 24 se hizo un análisis más continuo utilizando todas las imágenes que no contenían nube. Se utilizaron los modelos propuestos para la clorofila-a, y el de profundidad del Disco de Secchi. Se calculó el Índice espectral del Estado Trófico propuesto por [24] adaptado para el Landsat 8.

$$WQI = \frac{\{B3+(B2-B4)\}-B6}{\{B3+(B2-B4)\}+B6} \quad (3)$$

Se realizó el análisis estadístico de los resultados.

Se obtuvieron los mapas para un mes del periodo lluvioso y otro para el periodo seco de los dos parámetros y del índice espectral de calidad del agua (WQI) desde el 2013 al 2022 y para el año 2023 se realizó un análisis más continuo y se obtuvieron los mapas de estas mismas variables de todos los meses en que no habían nubes sobre el embalse. Los meses que no se pudieron estudiar fueron abril, agosto, octubre y noviembre, se incluyeron los meses de febrero y marzo del 2024.

A manera de ejemplo se presentan los resultados de la metodología para el año 2021 donde se procesaron las imágenes de agosto y diciembre para el periodo lluvioso y seco respectivamente. En la figura 6 se muestra que ambos meses presentan una situación similar en cuanto al comportamiento del parámetro clorofila-a observándose valores altos en las orillas y cercanos a la cortina, asociados principalmente a las presencia de plantas acuáticas, en la zona central existen valores medios mientras que los valores más bajos están al noroeste, en cuanto a la transparencia del agua el parámetro SDD refleja valores medios en casi todo el embalse mientras que el índice de calidad nos presenta con buena calidad de las aguas todo el centro del embalse y con mala calidad las orillas. Ese año fue de una intensa sequía donde hubo un descenso considerable del nivel de las aguas que provocó que la calidad del agua, principalmente en las orillas del embalse, se clasificara durante casi todo el año, como mala.

Análisis espacio temporal de la calidad de las aguas en las escenas Landsat 15-44 y 14-45

La metodología fue implementada en otras dos zonas del occidente y centro de Cuba donde se pudo constatar los buenos resultados que ofrece la misma, ya trabajando a una escala más regional donde se involucran todos los cuerpos de aguas presentes en una escena del satélite Landsat 8.

Fueron utilizadas las escenas 15-44 y 14-45 y realizados análisis temporales de la calidad del agua de los principales embalses en el periodo 2013-2024 demostrando que con la metodología propuesta, a pesar que no se tienen mediciones in situ de los parámetros de calidad de agua, se pueden obtener valores semicuantitativos que a pesar de no estar validados con datos in-situ, al

menos permiten una estimación del comportamiento de la calidad de las aguas con el tiempo, como se puede observar en las figuras 7 y 8.

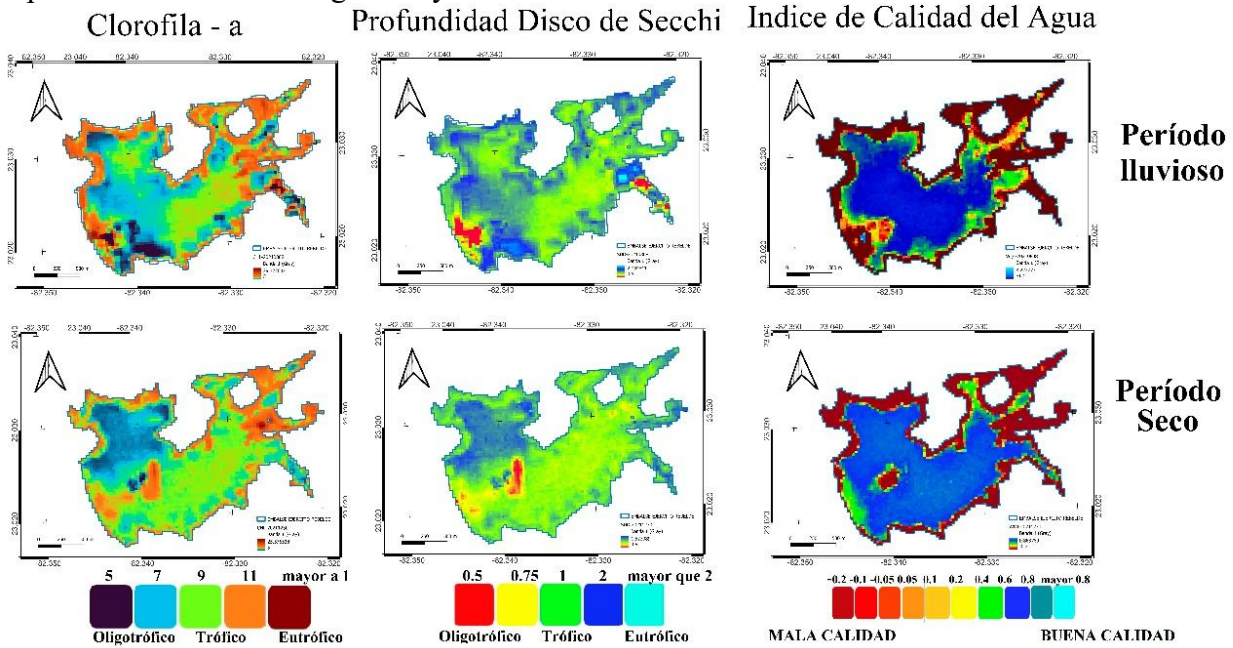


Fig.6 Parámetros de calidad del agua embalse Ejército Rebelde año 2021.

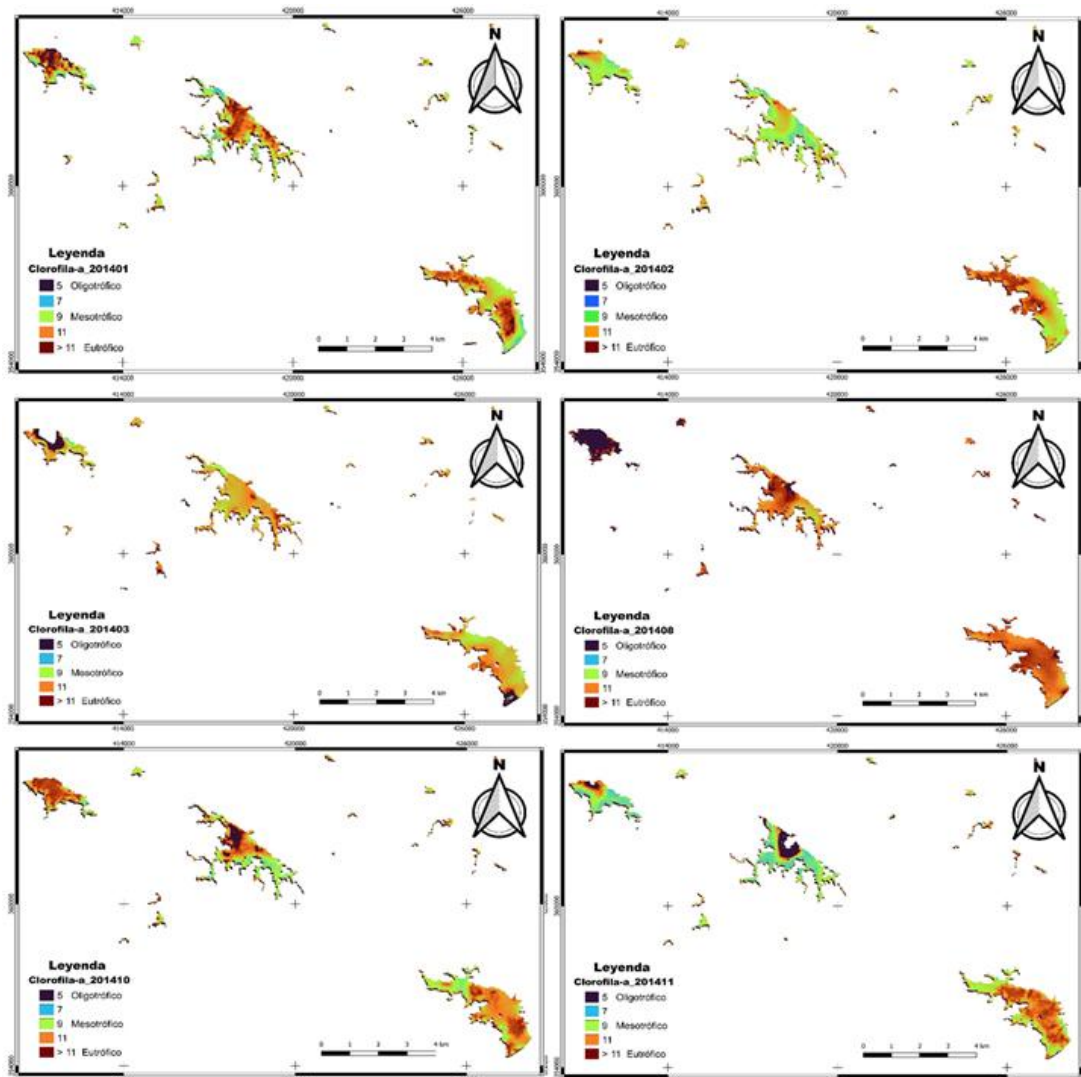


Fig.7 Contenido de Clorofila-a estimado por teledetección de los embalses Jibacoa, Canasí y Caunavaco en varios meses del año 2014.

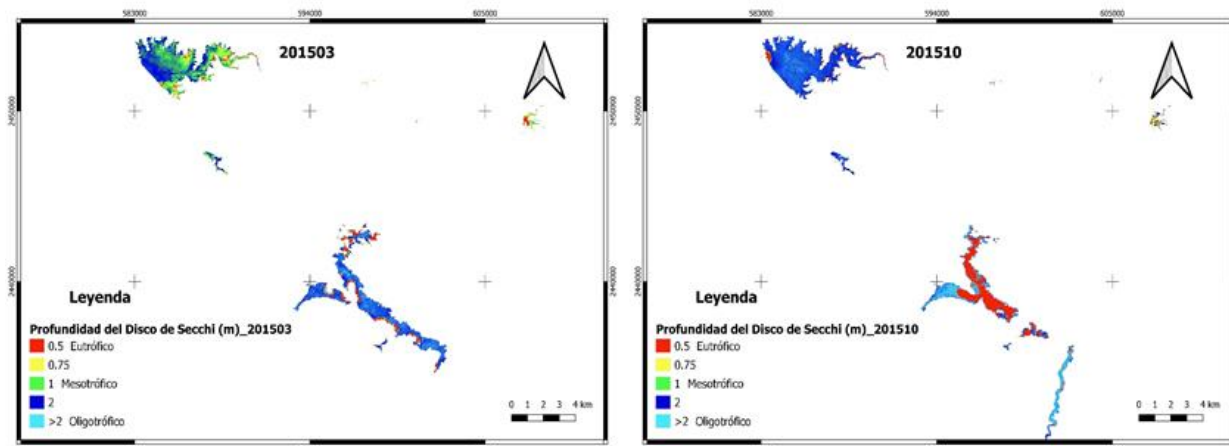


Fig.8 Profundidad del Disco de Secchi estimado por teledetección en los embalses Hanabanilla y Avilés mes de marzo y octubre del 2015.

4. Conclusiones

A partir del análisis de una amplia variedad de procedimientos utilizados actualmente se propone una guía metodológica, para la utilización de las imágenes de teledetección, con el fin de evaluar la calidad del agua en los embalses del territorio nacional cubano, cuando no se disponga de datos in situ para ello. La propuesta fue desarrollada utilizando la presa Ejército Rebelde como objeto de estudio y un análisis espacio-temporal para los parámetros Clorofila-a, Profundidad del Disco de Secchi e Índice de Calidad del Agua. Finalmente se realizó la evaluación de la calidad de los cuerpos de agua en las escenas Landsat 15-44 y 14-45 utilizando la propuesta metodológica y sus resultados fueron considerados satisfactorios por especialistas del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos en un taller del Proyecto Sectorial PS113LH001-021 realizado al efecto.

Referencias

1. INE. *Indicadores de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible [en línea]*. Disponible en: <https://www.ine.es/dyngs/ODS/es/index.htm> [Consulta en: febrero de 2023].
2. ONU. *Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos [en línea]*. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/> [Consulta en: marzo de 2023].
3. ONU-Agua, 2020. Cálculo del cambio en la extensión de los ecosistemas relacionados con el agua con el paso del tiempo: Metodología de seguimiento del indicador 6.6.1 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. PNUMA. <https://wesr.unep.org/projects>
4. Adjovu, G. E., H. Stephen, D. JAMES and S. Ahmad. *Overview of the Application of Remote Sensing in Effective Monitoring of Water Quality Parameters*. Remote Sensing, 2023, 15(1938), 35. <http://dx.doi.org/10.3390/rs15071938>
5. Sagan, V., K. T. Peterson, M. Maimitjiang, P. Sidike, et al. *Monitoring inland water quality using remote sensing: potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing*. In ELSEVIER. Version of Record: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825220302336>. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103187>
6. Awfa, D., A. N. Wicakson, Putra, Raden and P. Soewondo. *Remote sensing estimation of water transparency for Saguling Dam in the past decade (2013-2022) based on Landsat 8*. E3S Web of Conferences, 2024, 485(03303). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448503003>

7. Ellis, E. A., G. H. Allen, R. M. Riggs, H. Gao, et al. *Bridging the divide between inland water quantity and quality with satellite remote sensing: An interdisciplinary review*. WIREs Water / Early View, 2024, e1725, 91. <http://dx.doi.org/10.1002/wat2.1725>
8. Ivanda, A., L. Šeric, D. Žagar and K. Oštir. An application of 1D convolution and deep learning to remote sensing modelling of Secchi depth in the northern Adriatic Sea. *Big Earth Data*, 2024, 8(1), 82-114. <http://dx.doi.org/10.1080/20964471.2023.2273058>
9. Jassam, J. D., I. A. Mawlood and K. N. Sayl. *Applying Remote Sensing and Artificial Neural Networks for Water Quality Index Modeling in the Euphrates River*. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, Abril 2024, 19(2), 605-611. <http://dx.doi.org/10.18280/ijdne.190226>
10. Steinbach, S., A. Rienow, M. W. Chege, N. Dedring, et al. *Low-Cost Sensors and Multitemporal Remote Sensing for Operational Turbidity Monitoring in an East African Wetland Environment*. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, 17, 20. <http://dx.doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3381756>
11. Betancourt, C., R. Suárez and L. Toledo. *Variabilidad iónica y características tróficas del embalse de Abreus, Cuba*. *Limnetica*, 2010, 29(2), 341-352. <http://dx.doi.org/10.23818/limn.29.28>
12. Peraza, R. *Diversidad y abundancia de fitoplancton del embalse Abreus (Cienfuegos, Cuba)*. Universidad de la Habana, 2017.
13. Corcho Aamado, J. A. and A. Valle Pombrol. *Empleo de técnicas de percepción remota para la estimación de clorofila-a en el embalse Abreus*. *Revista Cubana de Geomática*, 2022, 2550, 16
14. Gholizadeh, M. H., A. M. Melesse and L. Reddi. *A Comprehensive Review on Water Quality Parameters Estimation Using Remote Sensing Techniques*. *Sensors*, 2016, 16(1298), 43. <http://dx.doi.org/10.3390/s16081298>
15. Diédhiou, C., S. Diop, G. Faye, T. Moshod, et al. *Study on the Applicability of Landsat-8 Images as a Tool for Monitoring the Trophic State of Lake Guiers (Senegal)*. *Journal of Water Resource and Protection*, 2019, 11, 434-447. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2019.114026>
16. Meng, H., J. Zhang and Z. Zheng. *Retrieving Inland Reservoir Water Quality Parameters Using Landsat 8-9 OLI and Sentinel-2 MSI Sensors with Empirical Multivariate Regression*. *International Journal of Environment Research and Public Health*, 2022, 19(3), 7725. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph19137725>
17. Wijaya, D. R. P., R. Haribowo and J. E. *Evaluation of Landsat 8 imagery capability to estimate chlorophyll-a concentrations using spatially and temporally different data*. *Civil and Environmental Science Journal (CIVENSE)*, 2023, 06(01), 015-023. <http://dx.doi.org/10.21776/ub.civense.2023.00601.3>
18. Omondi, A. N., Y. Oumaa, J. R. Kosgeia, V. Kongob, et al. *Estimation and mapping of water quality parameters using satellite images: a case study of Two Rivers Dam, Kenya*. *Water Practice & Technology*, 2023, 18(2), 428. <http://dx.doi.org/10.2166/wpt.2023.010>
19. Matus-Hernández, M. A., N. Y. Hernández-Saavedra and R. O. Martínez-Rincón. *Predictive performance of regression models to estimate Chlorophyll-a concentration based on Landsat imagery*. *PLoS ONE*, 2018, 13(10). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0205682>
20. Ouma, Y. O., K. Noor and K. Herbert. *Modelling Reservoir Chlorophyll-a, TSS, and Turbidity Using Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI Satellite Sensors with Empirical Multivariate Regression*. *Hindawi Journal of Sensors*, 2020, 2020, 21. <http://dx.doi.org/10.1155/2020/8858408>
21. Morillo, G., G. J. Aldana, Á. Pineda and G. A. Royero. *Estimación de clorofila a en el Lago de Maracaibo, Venezuela utilizando imágenes LANDSAT 8*. *REVISTA MAPPING*, 2018, 27(188), 4-14.
22. Carlson, R. and J. Simpson. *A Coordinator's Guide to Volunteer Lake Monitoring Methods*. USA: 1996.

23. Kloiber, S. M., P. L. Bresonik and M. E. Bauer. *Application of Landsat imagery to regional-scale assessments of lake clarity*. Water Research, 2002, 36(2002), 4330–4340. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00146-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00146-X)
24. Sultana, M. S. and A. Dewan. *A reflectance-based water quality index and its application to examine degradation of river water quality in a rapidly urbanising megacity*. Environmental Advance, 2021, 5. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100097>

Agradecimientos

Agradecemos al Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) la posibilidad de realizar esta investigación, así como por los intercambios obtenidos con ellos que permiten validar los resultados obtenidos. Agradecemos también a los colegas del departamento de Geociencias de la Cujae que participan en el proyecto PS113LH001-021 con el título “Aplicaciones de la teledetección al estudio de la variación espacio temporal de los ecosistemas relacionados con el agua en Cuba” y que han participado en la obtención del resultado que ahora se presenta, así como en otros relacionados con los ecosistemas relacionados con el agua en el territorio nacional.

Conflicto de Intereses

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses relacionado con la investigación que se presenta.

Contribución de los autores

Héctor Manuel Fernández Núñez. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0096-2894>

Participó en el diseño de la investigación, el procedimiento para evaluar la calidad del agua en los embalses a partir de imágenes satelitales, la validación de los resultados en el embalse Ejército Rebelde y la supervisión de los resultados en todas las áreas. Participó en la redacción y edición del manuscrito.

Isabela Díaz Pérez. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2160-8716>

Participó en el diseño de la investigación, la validación de los resultados en embalses de la región occidental del territorio nacional a partir de imágenes satelitales. Participó en la redacción del manuscrito.

Daily González Henríquez. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3416-6634>

Participó en el diseño de la investigación, la validación de los resultados en embalses de la región central del territorio nacional a partir de imágenes satelitales. Participó en la redacción del manuscrito.

Willy Roberto Rodríguez Miranda. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-6472>

Participó en el diseño de la investigación, la adquisición de los fondos, la administración y los recursos vinculados con el Proyecto Sectorial PS113LH001-021, así como en la supervisión de los resultados. Participó en la redacción y edición del manuscrito.