



Optimización del monitoreo de la transparencia del agua, por medio de MOD09GA: un caso de estudio en el lago Guamués, San Juan de Pasto, Colombia*

Ricardo Javier Moncayo Eraso^a ■ Mery Liliana López Martínez^b

Resumen: El lago Guamués (LG) es considerado humedal Ramsar desde el 2000. Debido a su importancia, los ecosistemas lénticos como el LG requieren de programas de monitoreo que sobrepasen su cobertura espacial y temporal. En este estudio se demuestra que usar productos de reflectancia de superficie, generados por el sensor MODIS, puede ser útil para verificar la dinámica espaciotemporal de la profundidad medida con el disco de Secchi (pds), en el periodo 2001-2020. Para calibrar el modelo, se utilizó una imagen coincidente con los trabajos de campo realizados; se correlacionaron los datos de transparencia de la columna de agua medida con el disco de Secchi con los píxeles de la imagen captados en la banda centrada en los 858,5 nm. Para validar el modelo, se utilizó el método Leave out One Cross Validation (Loocv). Así, se determinó que el modelo cuadrático presenta mejores resultados con un ajuste en su $R^2 = 0,74$ y un error asociado a las observaciones inferior a los 0,013 m. El análisis espacial reveló que el LG presenta zonas localizadas en sus márgenes donde la pds puede ser inferior a los 0,5 m. De la misma forma el promedio en su pds para la imagen del 24 de abril es de 3,87 m. El análisis temporal del lago indica que en 2006-2008 y 2017-2020, se ha presentado mayor variabilidad para los puntos observados, con valores de 3,3 y 2,8 m, respectivamente.

Palabras clave: disco de Secchi; MODIS; léntico; reflectancia; teledetección.

Recibido: 26/06/2020 **Aceptado:** 20/12/2020 **Disponible en línea:** 23/07/2021

Cómo citar: R. J. Moncayo Eraso y M. L. López Martínez, «Optimización del monitoreo de la transparencia del agua, por medio de MOD09GA: un caso de estudio en el lago Guamués, San Juan de Pasto, Colombia», Cien.Ing.Neogradina, vol. 31, n.º 1, pp. 93-108, jul. 2021.

* Artículo de investigación.

- a Ingeniero de sistemas, máster en Monitoreo y Control Ambiental, doctor en Ciencias Cartográficas. Docente investigador de la Universidad Cesmag, Pasto, Colombia. Correo electrónico: ricardo.javier79@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5550-6012> Dedicatoria: En el año de tu nacimiento para ti mi dulce hija Iara Marina.
- b Bióloga, Especialista en Microbiología, Magíster en Ingeniería Ambiental. Docente Asistente, Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD. Pasto, Colombia. Correo electrónico: mery.lopez@unad.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8921-1888>

Optimization of Water Transparency Monitoring through MOD09GA: A Case Study in Lake Guamués, San Juan de Pasto, Colombia

Abstract: Lake Guamués (LG) has been considered a Ramsar Wetland since 2000. Due to its importance, lentic ecosystems such as LG require monitoring programs that exceed their spatial and temporal scope. This study shows that using surface reflectance products, generated by the MODIS sensor, can be useful in verifying the spatial dynamics of the Secchi disk depth (zsd), in the 2001-2020 period. To calibrate the model, an image matching the field work performed was used. The transparency data of the Secchi disk-measured water column was correlated with the image pixels captured in the band centered at 858.5 nm. To validate the model, the Leave Out One Cross Validation (loocv) method was used. Thus, it was determined that the quadratic model showed better results with an adjustment in its $R^2 = 0.74$ and an error associated with observations less than 0.013 m. Spatial analysis revealed that LG has areas located at its banks, where the zsd may be less than 0.5 m. Likewise, its zsd average in the image taken on April 24 is 3.87 m. The temporal analysis of the lake indicates that between the 2006-2008 and 2017-2020 periods, greater variability has been reported for the observed points, with values of 3.3 and 2.8 m, respectively.

Keywords: Secchi's disk, MODIS, lentic, reflectance, remote sensing.

Introducción

Los lagos de alta montaña, generalmente, se encuentran en áreas protegidas; sus cuencas presentan gradientes pronunciados, temperaturas frías y radiación solar y ultravioleta de alta incidencia [1]-[3]. Estas características hacen que este tipo de cuerpos de agua presenten una gran sensibilidad a los cambios ambientales, atmosféricos y climáticos asociados a eventos de origen natural o la acción antrópica [4], [5].

Lo expuesto lleva a que las entidades encargadas de la preservación natural realicen seguimientos continuos a estos ecosistemas estratégicos, con el fin de conservar un registro de sus variables físicas, químicas y biológicas [6], [7]. Sin embargo, este tipo de monitoreos sigue enfoques convencionales (muestreos *in situ*) que tienden a ser limitados en términos de cobertura espacial y frecuencia [8], [9].

Con el fin de mejorar la representatividad y comprender la dinámica espaciotemporal de los lagos de alta montaña, se hace necesario utilizar herramientas como la teledetección. Por medio de esta, pueden obtenerse datos sinópticos que logran abarcar grandes áreas y largos periodos, de forma repetitiva y no intrusiva [10], [11].

En ese contexto, se encuentra que el uso de los productos de teledetección satelital aumentaría sustancialmente la comprensión de la dinámica del cuerpo de agua y los procesos biológicos (producción primaria como la clorofila-a), físicos (transparencia, color y sedimentos en suspensión) y químicos (ciclos de nutrientes) que tienen lugar en la columna de agua y dependen del campo de luz subacuático [9], [12]-[14].

Dentro de los métodos para determinar la calidad del agua, destaca por su sencillez (toma de muestra y lectura de resultado) el disco de Secchi (DS). La profundidad medida con este dispositivo está influenciada por los tres componentes ópticos principales: clorofila-a (Chl-a), materia orgánica disuelta coloreada (CDOM) y el total de materia en suspensión (TMS). Al ser un parámetro cuya lectura depende de la luz, ha sido ampliamente acogido en estudios de teledetección en aguas continentales, además, son necesarios solo unos pocos puntos

para obtener modelos basados en la transparencia del agua [14]-[18].

En los últimos treinta años, el uso de imágenes satelitales para el análisis de cuerpos de agua en sus componentes ópticamente activos se ha popularizado. Sensores diversos como Sentinel, Landsat 5, 7, 8, MERIS y MODIS, entre otros, proveen imágenes utilizadas luego para estimar la profundidad medida con el disco de Secchi [18]-[20]. De estos sensores, el de mayor potencial para proveer datos satelitales y correlacionarlos con medidas tomadas en campo de las variables físicas, químicas o biológicas es el sensor MODIS.

Este sensor puede generar productos hasta con 36 bandas espectrales, con una resolución espacial de 250 m y una frecuencia temporal diaria. Por ello, es posible, por medio de estos productos crear series temporales útiles para observar la dinámica y evolución del lago [21]-[26]. Otra gran ventaja de este sensor es que genera productos de reflectancia de superficie (MOD09GA) los cuales no necesitan calibración atmosférica y geométrica, al venir ya sus datos generados en la proyección geográfica sinusoidal [12]-[14].

En ese contexto, numerosos modelos empíricos multibanda o de una banda han sido desarrollados para calcular la transparencia del agua, correlacionando las mediciones de campo de la PDS con las imágenes de sensores remotos, en este sentido, podemos encontrar algoritmos que utilizan diferentes operaciones entre las longitudes de onda localizadas en los espectros verde y rojo y azul, para poder correlacionar este valor, ya sea con las mediciones de PDS o con su logaritmo natural, la representatividad de los modelos revisados en la bibliografía es superior a 0,7 en su R^2 [18], [27]-[29].

En lo que respecta al sensor MODIS se encuentra que, además de las diferentes combinaciones que pueden implementarse para las bandas ubicadas en los espectros azul, verde y rojo, es posible utilizar un algoritmo basado en la banda centrada en los 645 nm (banda 1). De ello se encuentra que puede obtenerse algoritmos con estimaciones aceptables que oscilan entre 0,6 y 0,92 en su R^2 [12]-[14], [27], [28], [30], [31].

La banda centrada en los 858,5 nm (banda 2) tiene una aplicación más práctica en la estimación

del total de los sólidos en suspensión en aguas interiores [32]-[34]. Sin embargo, esta misma longitud de onda puede ser utilizada en la derivación de valores de la PDS, teniendo en cuenta que la turbidez del agua está directamente relacionada con las medidas que pueden obtenerse con el disco de Secchi [33], [35]-[37].

El propósito de este estudio fue probar la practicidad de un modelo basado en imágenes de reflectancia de superficie (RS) generadas por el sensor MODIS para monitorear y caracterizar la PDS en el LG, esta situación es motivada por la necesidad de contar con un registro de monitoreo espaciotemporal de este parámetro dentro del cuerpo de agua. A partir de ello, es posible generar información que sirva para verificar la tendencia y dinámica evolutiva del lago. Para alcanzar nuestro objetivo fue necesario:

- 1) Validar los algoritmos, utilizando el procedimiento LOOCV para encontrar el mejor ajuste en las estimaciones PSD-RS, y evaluar la predicción del modelo utilizando medidas estadísticas como R^2 y RMSE.
- 2) Generar visualizaciones temporales (*Horizon-Graphs*) que permitan observar la dinámica temporal del cuerpo de agua en 2001-2020.

Materiales y métodos

Lugar de estudio

El lago Guamués (LG) se encuentra a 2765 msnm, al suroeste de San Juan de Pasto, capital del departamento de Nariño (figura 1a-b) [38], [39]. Es un lago altoandino, localizado a lo largo de la falla

tectónica de Algeciras, fenómeno geológico que, a su vez, se extiende entre los departamentos del Putumayo, Nariño, Caquetá, Cauca, Huila y Meta [40]. El LG es un importante cuerpo de agua que hace parte de la cuenca alta del río Guamués, su localización geográfica presenta las siguientes coordenadas: 0°50", -1°15" latitud Norte, y 77°05", -77°20" longitud Oeste [41].

Este lago es el mayor humedal de los Andes colombianos, con un espejo de agua que cubre 41,74 km². La longitud de este lago continental es 14,1 km y, en su parte más ancha, cuenta con 6,2 km; su parte más profunda mide 70 m y la temperatura promedio es de 11 °C (figura 1c) [42].

Trabajo de campo

Se hicieron sesenta mediciones de parámetros físico-químicos del agua, producción primaria (Chl-a) y la PDS, las mediciones se adelantaron en seis trabajos de campo (diez estaciones de monitoreo para cada trabajo de campo), que se desarrollaron entre los meses de enero y junio de 2013 (figura 1c).

Transparencia de la columna de agua medida con el disco de Secchi

La medición se llevó a cabo con un disco Secchi (DS), un instrumento bicromático de medición de la penetración luminosa, de 30 cm de diámetro, divididos en cuartos de color negro y blanco alternados y peso de plomo unido a una cuerda con guía por cada metro. El procedimiento consiste en introducir el DS en el agua y dejarlo caer hasta que se pierde de vista. Este proceso se repitió dos veces y se registraron los valores de longitud, promediados luego, para obtener la PDS.

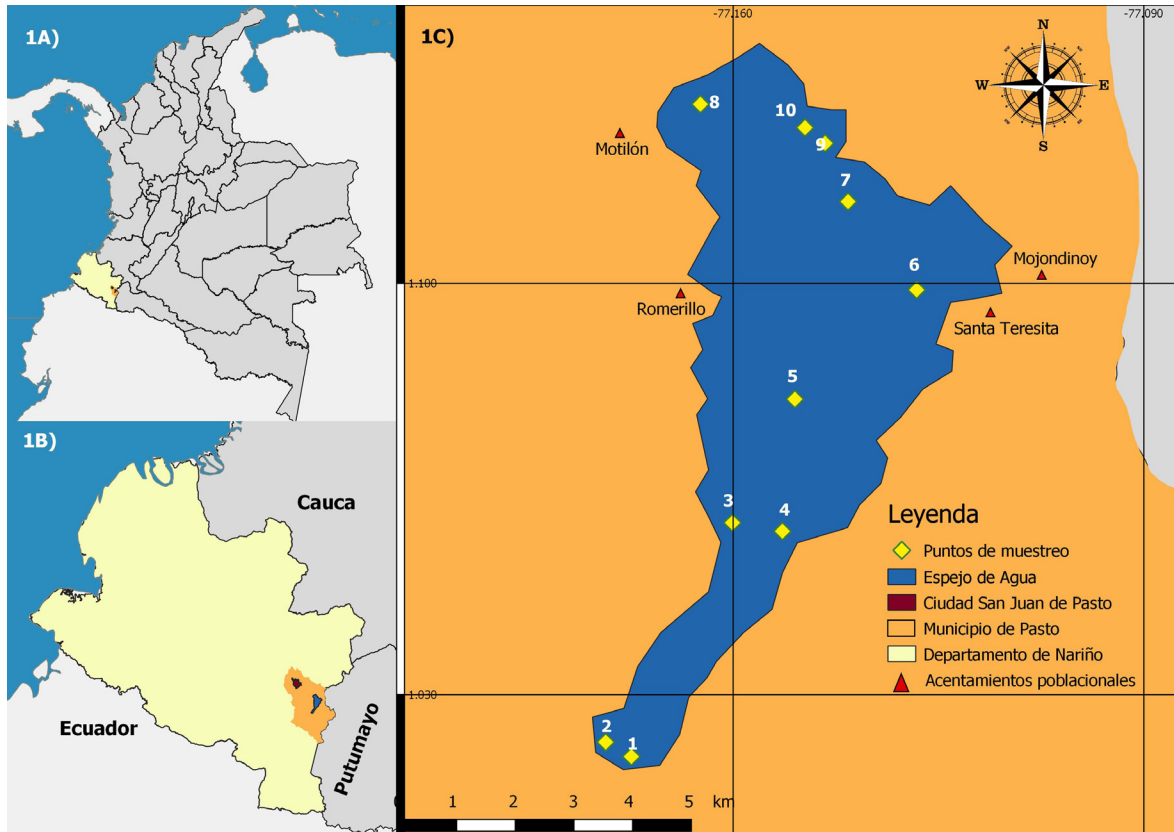


Figura 1. Localización geográfica del lago Guamués y ubicación de los puntos de muestreo dentro del espejo de agua.

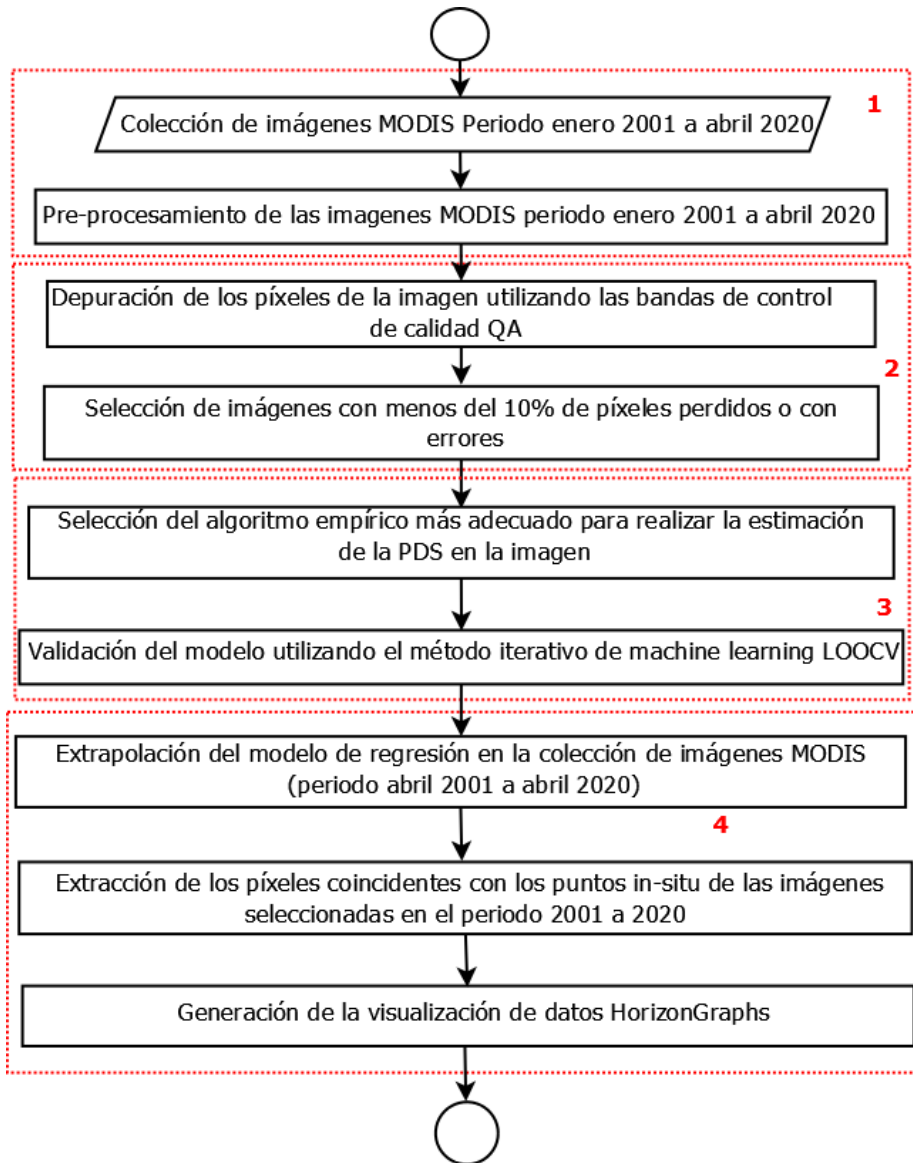
Fuente: elaboración propia.

Procesamiento de las imágenes de satélite, generación de imágenes y representaciones gráficas

En la figura 2, se ilustra el desarrollo del trabajo de procesamiento digital de imágenes y generación de resultados. Asimismo, se muestran las etapas desde la selección de las imágenes en términos de amplitud, resolución temporal, adquisición y tratamiento de datos, la generación de la visualización de datos *HorizonGraph*, así como todos los análisis realizadas en el proceso.

Descarga de imágenes y preprocesamiento de las imágenes. Una vez definido que el producto MOD-09GA es el producto más adecuado para calcular

la PDS [27], [28], [43]-[46], se descargaron las imágenes del sitio web <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Se seleccionaron y descargaron 291 imágenes para crear una colección de datos temporales referentes al periodo enero de 2001 a abril de 2020. Las imágenes fueron procesadas utilizando rutinas computacionales desarrolladas en los lenguajes *Python* y *R*, las cuales permitieron realizar la reproyección, recorte espectral y espacial del *Tile* MODIS H10V8, lo cual permitió aislar el cuerpo de agua. A partir de una máscara creada con la aplicación *Envi* del LG, se utilizaron las bandas de control de calidad QA y se delimitó la superficie acuática del lago, al utilizar solo píxeles clasificados efectivamente como agua.



Nota: las líneas punteadas indican los procesos necesarios en la PDI, creación de modelo de estimación de PDS, generación de mapas, series del tiempo y control de calidad de las imágenes.

Figura 2. Flujograma de las etapas desarrolladas en la investigación.

Fuente: elaboración propia.

Selección de imágenes MODIS. Para seleccionar las imágenes que serían utilizadas, las bandas de control de calidad (QA), junto con rutinas computacionales desarrolladas en *Python*, permitieron eliminar las imágenes del LG que presentaban más de 10% de errores en sus píxeles. Este proceso permitió obtener la imagen para realizar la calibración y validación (imagen del 24 de abril) y

seleccionar también la mejor imagen MODIS por año (20 imágenes).

Antes de la generación del algoritmo predictivo, se realizó la conversión de los números digitales de las imágenes a valores de reflectancia de superficie. Este valor se derivó a partir de la ecuación 1.

$$P_f = \frac{P_i}{10\,000} \quad (1)$$

Donde: P_i es el número digital registrado en la banda MODIS y P_f es el número digital final.

Calibración y validación del modelo. La imagen MODIS que mejor calidad radiométrica presentó en el periodo del trabajo de campo (enero a junio de 2013) se obtuvo el 24 de abril de 2013. Una vez realizados los procesos de preprocesamiento y extracción del cuerpo de agua, fueron identificados los píxeles que coinciden con las coordenadas geográficas de los puntos de muestreo. Este vector espectral extraído de la imagen fue utilizado para evaluar iterativamente modelos lineales y polinomiales (segundo y tercer grado) en las bandas 1 y 2 (valores de reflectancia B_x y sus inversos B_x^{-1}) del sensor MODIS.

Con los vectores extraídos de la imagen y los datos de campo de la PDS se realizó el modelo de calibración y validación. Esta fase es fundamental en un proceso de estimación [47], [48], ya que sus resultados permiten evaluar la confiabilidad del algoritmo y las incertidumbres asociadas a los valores calculados. Por tal razón, teniendo en cuenta la limitante en el número de imágenes coincidentes con los trabajos de campo y que, además, el modelo debe ser evaluado con observaciones independientes, fue necesario utilizar el procedimiento LOOCV, para analizar el desempeño del modelo de estimación.

En estos procedimientos, excepto uno de los pares de datos de la relación, todos son utilizados para validar el modelo. A continuación, se calculó el error de estimación (PDS estimado frente a PDS observado), a partir del par excluido. El procedimiento se repitió excluyendo, a su vez, todos los N pares disponibles. Adicionalmente, para verificar la validez del modelo, se utilizaron los estimadores estadísticos R^2 y RMSE (detalles del procedimiento en [35], [48]-[51]).

Visualización temporal de datos. Para obtener observaciones realistas en las series temporales generadas por sensores remotos, es necesario, por un lado, utilizar observaciones de referencia tomadas en campañas de campo de muestreos *in situ* (dominio de origen); por otro, asociar los modelos de calibración obtenidos extrapolando esos modelos en la colección de imágenes en el tiempo

(dominio de destino) [52]. En esta investigación, el dominio de origen fue la imagen MODIS relacionada con el trabajo de campo de abril de 2013 y el dominio destino las demás imágenes de la serie temporal. Con la aplicación de los modelos predictivos en las imágenes del dominio destino, ahora estas representaron las estimaciones del PDS.

Una vez obtenida esta información, se extrajeron vectores temporales coincidentes con las coordenadas geográficas de los puntos de muestreo; además, utilizando rutinas computacionales del lenguaje de programación *Python* y *R* se generó la visualización de datos *HorizonGraph* (HG) para el periodo 2001-2020.

La HG es una técnica diseñada para optimizar el espacio y la comprensión de series del tiempo multivariadas o con múltiples puntos de observación [53]-[55]. Dentro de la gráfica, se utilizan colores contrastantes (rojo y azul) y cada cambio de color indica que el valor leído en ese punto está por encima o por debajo del promedio. Además, se utilizan tres tonalidades de cada color que muestran la intensidad de la variable observada en ese momento. Este tipo de gráficas permite la presentación simultánea de mayor volumen de datos y la comparación entre series de tiempo multivariadas o univariadas multipunto [54], [56]-[59].

Resultados y discusión

Parámetros de la calidad del agua

Los parámetros de calidad del agua fueron tomados en seis campañas de muestreo, llevadas a cabo entre los meses de enero y junio de 2013. En la tabla 1, se muestran algunas medidas de estadística descriptiva para la PDS medida en campo.

En general, se observa que el promedio de PDS en los puntos medidos *in situ* varió entre 3,45 y 4,93 metros. En los datos, se infiere que junio fue el mes que presentó valores mínimos en las lecturas, mientras que los máximos medidos para este parámetro se distribuyeron entre los meses de febrero y marzo. La desviación estándar en los puntos observados osciló entre 0,60 y 1,84 m. Los puntos de muestreo con mayor y menor profundidad fueron el siete y el diez, respectivamente.

Tabla 1. Estadística descriptiva de las mediciones realizadas en los trabajos de campo entre los meses de enero y junio

Estación	Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
1	4,37	5,1	3,7	0,60
2	4,23	5,6	2,7	1,02
3	4,87	6,2	3,4	1,08
4	4,93	7	2,9	1,33
5	4,70	6,4	3,4	1,15
6	4,67	7,4	3,1	1,61
7	4,65	8	3,2	1,84
8	4,6	7	3,2	1,53
9	4,08	6,5	2,4	1,58
10	3,45	4,3	2,2	0,82

Profundidad en metros, medida con el disco de Secchi.
Fuente: elaboración propia.

Sensibilidad del modelo

En este trabajo, se desarrolló un modelo empírico para la recuperación de la PDS en el lago Guamués, a partir de la Rs captada por la banda 2 del sensor MODIS. Para evaluar el rendimiento del modelo de estimación de la PDS propuesto, se utilizaron siete pares de datos; píxeles banda 2 (858,5 nm) —datos de campo de PDS—; se excluyeron tres puntos (8, 9 y 10), debido a que algunos no fueron medidos en

el trabajo de campo (punto 8) y, en otros casos, se presentaron errores en los píxeles extraídos de la imagen MODIS (puntos 9 y 10).

En total, fueron evaluados doce modelos que usan las bandas 1 y 2 (valores de reflectancia B_x y sus inversos B_x^{-1}) del sensor MODIS para estimar los valores de PDS; los estimadores estadísticos RMSE y R^2 fueron utilizados para evaluar la sensibilidad de los algoritmos y sus resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados de los estimadores estadísticos aplicados para evaluar el rendimiento de los modelos de calibración y validación

Calibración												
Banda	B1			B2			B_1^{-1}			B_2^{-1}		
Modelo	Lin	Cua	Pol3	Lin	Cua	Pol3	Lin	Cua	Pol3	Lin	Cua	Pol3
R^2	0,28	0,32	0,50	0,50	0,79	0,93	0,06	0,38	0,79	0,74	0,92	0,92
RMSE(m)	0,42	0,44	13,6	0,36	0,23	29,20	2,34	0,18	0,95	2,10	0,14	7,69
Validación												
Banda	B1			B2			B_1^{-1}			B_2^{-1}		
Modelo	Lin	Cua	Pol3	Lin	Cua	Pol3	Lin	Cua	Pol3	Lin	Cua	Pol3
R^2	0,20	0,42	0,52	0,52	0,74	0,91	0,18	0,53	0,63	0,53	0,76	0,83
RMSE(m)	0,004	0,0039	0,0035	0,01	0,0128	0,0067	4,40	3,35	3,10	5,32	3,39	3,01

Fuente: elaboración propia.

A partir de los datos de la tabla 2, se observa que los modelos lineales presentan desempeños modestos en los estimadores estadísticos R^2 , sobre todo, los errores asociados al modelo predictivo que, en algunos casos, llegan a superar los 5,32 m en el RMSE. Por otra parte, los modelos basados en polinomios de tercer grado muestran un R^2 para la banda 2 superior a 0,9. Sin embargo, el RMSE es muy alto, pues, en algunos casos, alcanza los 29,2 m.

Teniendo en cuenta lo anterior, el mejor algoritmo predictivo es el modelo cuadrático basado en la banda 2. Este algoritmo cuenta con un ajuste moderado de $R^2 = 0,79$ en la calibración y $R^2 = 0,74$ en la validación, lo que indica que el modelo puede explicar el 74 % de la varianza de la PDS dentro del LG, con errores asociados al modelo predictivo inferiores a los 0,013 m. Por ello, muestra una

alta sensibilidad a los cambios en la reflectancia capturada por la imagen MODIS.

Los resultados obtenidos por el modelo utilizado aquí, en muchos casos, son superiores a los que se presentan en otros estudios, como es el caso de la investigación desarrollada en el lago Rawal en Pakistán [60] o de los algoritmos utilizados para estimar PDS en los lagos de Michigan en Estados Unidos [26], donde los coeficientes de determinación (R^2) oscilaron entre 0,49 a 0,79 y 0,32 a 0,71, respectivamente.

Una vez probada la validez del algoritmo basado en la banda 2 del sensor MODIS, fue modelado en términos matemáticos (ecuación 2) y representado gráficamente (figura 3). Asimismo, la validación del modelo presentada en la figura 4 muestra la dispersión de los valores de PDS estimados y observados obtenidos a partir del procedimiento LOOCV.

$$PDS = -695,33 \times R_2 (858,5)^2 + 104,04 \times R_2 (858,5) + 1,0997 \tag{2}$$

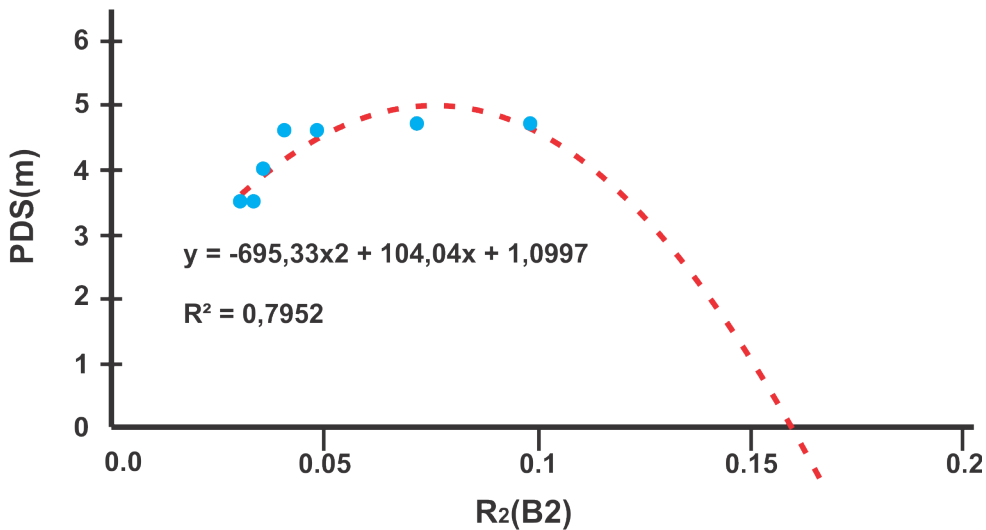


Figura 3. Modelo de calibración para estimar la profundidad medida con el disco de Secchi a partir de la banda 2 del sensor MODIS.

Fuente: elaboración propia.

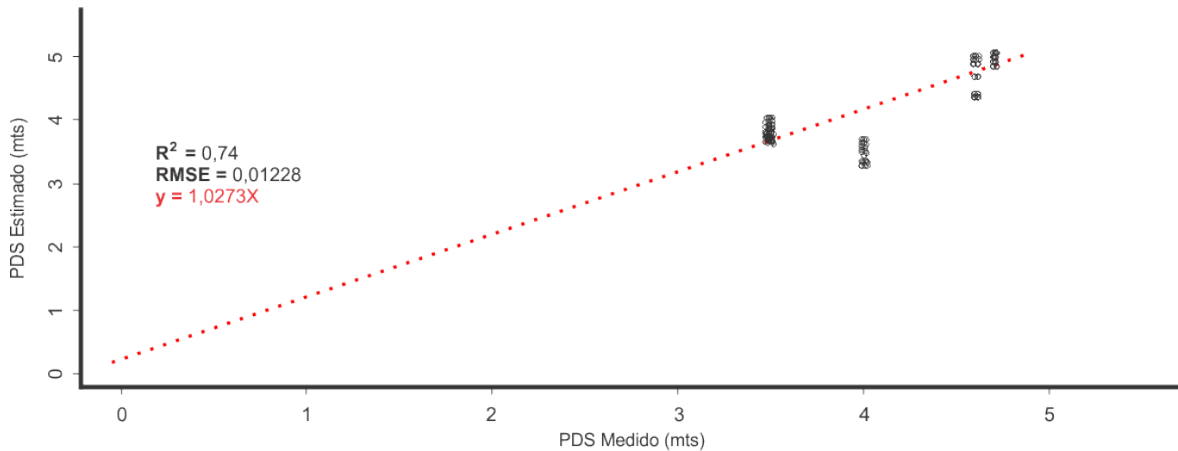


Figura 4. Modelo de validación de los valores de PDS estimados y observados a través del procedimiento LOOCV.
Fuente: elaboración propia.

Distribución espacial

Generalmente, la variabilidad en la calidad del agua en un lago no uniforme es fácilmente visible a través de imágenes derivadas de sensores remotos (figura 5). Esta imagen MODIS coincidente con la fecha del trabajo de campo de abril de 2013 se utilizó para producir un mapa que muestra la dinámica espacial de la PDS sobre la superficie del lago Guamués. En esta figura, se revela que, aun siendo la resolución espacial de 250 m para los píxeles del sensor MODIS, fue posible captar la homogeneidad que el lago presenta en gran parte del espejo de agua, así como las zonas que presentan niveles que indican la existencia de un gran flujo de sólidos en suspensión, llevados al lago por algunos cursos de agua de magnitud considerable.

Realizando un análisis más detallado de la imagen MODIS, se tiene que la profundidad del disco Secchi o PDS promedio del lago fue de 3,87 m y los valores más altos se localizaron, como se esperaba, en la parte central del lago. Esto se debe a que esta zona se caracteriza por sus aguas profundas. Otro punto interesante que presenta valores superiores al promedio es la desembocadura del río Guamués. Esta área muestra un valor superior a los cuatro metros para la PDS.

Por último, los valores por debajo del promedio de la PDS, se ubican particularmente en las desembocaduras de las quebradas Flautal, Romerillo y El Motilón. En estos lugares, el algoritmo de estimación calculó medidas inferiores a los 0,5 m.

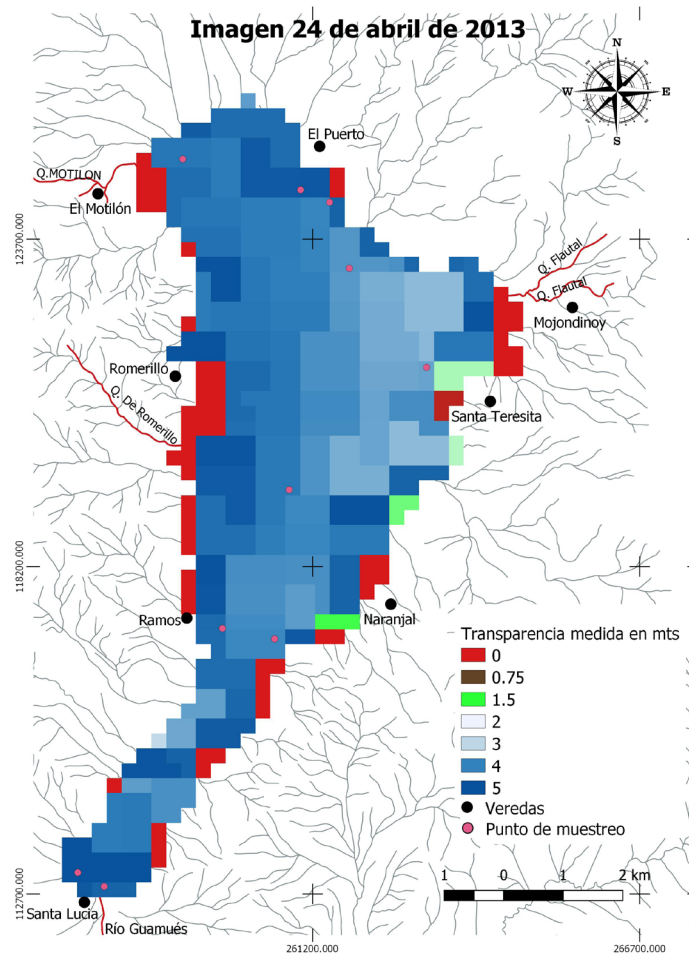


Figura 5. Mapa de estimación de la PDS derivado de la imagen MODIS-Terra para abril.

Fuente: elaboración propia.

Visualización de la serie del tiempo en *HorizonGraphs*

La visualización *HorizonGraphs* (HG) se utiliza para observar el comportamiento simultáneo de los vectores temporales de los píxeles extraídos de las imágenes MODIS coincidentes con las coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo para el parámetro PDS.

La visualización HG permite, de un lado, observar la dinámica temporal de los diez puntos de muestreo en conjunto y, de otro, apreciar con un mejor nivel de detalle los lapsos de tiempo y los puntos que presentan mayores y menores variaciones a lo largo de la serie temporal. La figura 6 utiliza esta técnica de visualización para indicar

la variabilidad de las diez estaciones de muestreo para la variable PDS. Para las diez series de tiempo observadas, se tiene que su promedio es 3,32 m y su desviación estándar es de 1,44 m.

Los periodos en que se observa disminución de los valores de la PDS están resaltados en líneas discontinuas rojas. En la serie del tiempo, se observan dos periodos con valores menores del promedio en 2005-2007 (a) y 2017-2020 (b). Estos momentos de bajo PDS se hacen más notorios en la estación de muestreo siete, donde para los periodos indicados se tiene un PDS menor a 0,42 m. Otro punto con alta variabilidad es el seis, pero la oscilación dentro de esta estación de muestreo está en 1,2-3,0 m.

Otros puntos que presentan valores oscilantes entre 1,5 y 3,2 m son los puntos cuatro y cinco. Los

restantes puntos de muestreo indican lecturas homogéneas con poca variabilidad, con una PDS promedio de 3,9 m.

Espacialmente, se observa que los puntos más dinámicos son los comprendidos entre las estaciones de muestreo 4-7.

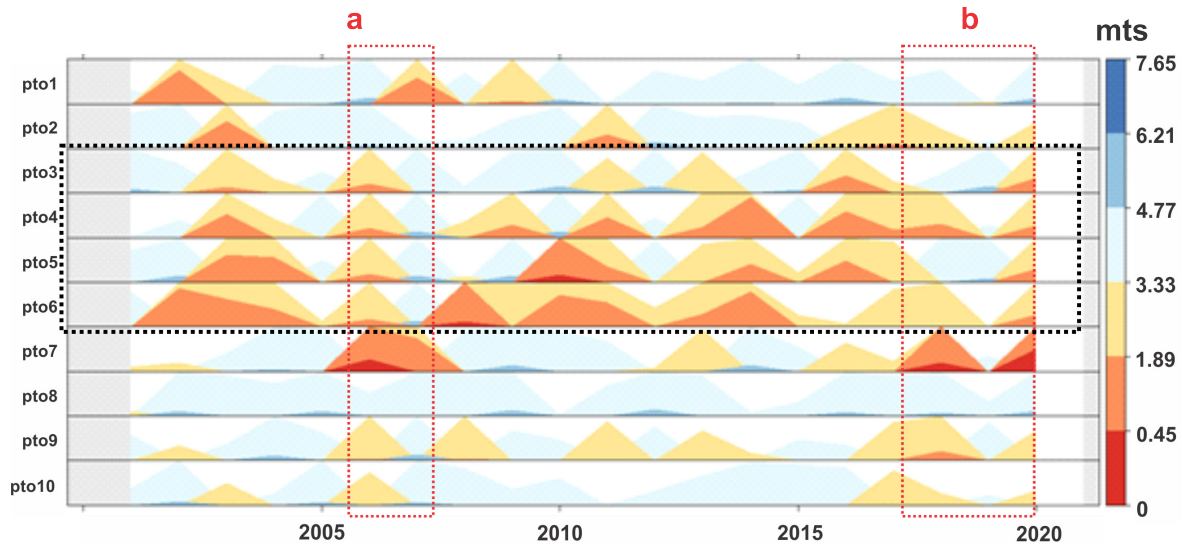


Figura 6. Serie del tiempo (2001-2020) de PDS presentada con el uso de la técnica HorizonGraph.

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones y recomendaciones

Los productos MOD09GA fueron muy útiles para crear una línea base que explica la variabilidad anual de la transparencia en el lago Guamués, no obstante, la continua oclusión por nubes dentro del área de estudio no permitió verificar la variación interestacional de la PDS dentro del cuerpo de agua en las épocas de menor y mayor precipitación.

Incluso con esta limitante, fue posible construir un modelo bio-óptico con una moderada sensibilidad entre la reflectancia captada por el sensor y las medidas realizadas en campo. De la misma forma, las imágenes MODIS permitieron observar que existen cursos de agua que aportan una gran cantidad de sedimentos de forma continua y en diferentes años, como las quebradas el Flautal, Romerillo y Motilón, cercanas a los asentamientos humanos de Mojondinoy y Santa Teresita (Flautal), Romerillo (Romerillo) y la vereda el Carrizo (Motilón).

El mapa generado a partir de los productos MODIS del 23 de abril de 2013 permite observar que,

después de realizado un conteo con píxeles menores a un metro, este valor llegó a representar el 15% del área total del lago. La serie de tiempo visualizada en HG también fue de utilidad para comprender la dinámica espacio temporal del lago, indicando los años 2006, 2007 y 2017-2020, y las zonas con mayor dinámica y variabilidad (puntos 3-6).

Para futuros estudios, se recomienda usar drones para el monitoreo dentro del lago Guamués, lo cual anulará la oclusión ocasionada por las nubes y maximizará la cobertura temporal de imágenes para realizar estudios de mayor precisión.

Agradecimientos

A la Universidad Cesmag, en especial, a su Facultad de Ingeniería, y a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (Unad), por apoyar con recursos financieros, infraestructura y equipos de medición la presente investigación. Al proyecto MODIS por permitir la descarga de los productos MOD09GA. Asimismo, al geógrafo Andrés Burbano, por permitirnos trabajar con geodata actualizada del municipio de San Juan de Pasto.

Referencias

- [1] K. A. Moser, *et al.* "Mountain Lakes: Eyes on Global Environmental Change", *Global and Planetary Change*, vol. 178, pp. 77-95, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.04.001>
- [2] Z. Zeng, D. Wang, W. Tan y J. Huang, "Extracting Aquaculture Ponds from Natural Water Surfaces around Inland Lakes on Medium Resolution Multispectral Images", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 80, pp. 13-25, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.03.019>
- [3] T. Llorens-Marès, J. Catalán y E. Casamayor, "Taxonomy and Functional Interactions in Upper and Bottom Waters of an Oligotrophic High-mountain Deep Lake (Redon, Pyrenees) Unveiled by Microbial Metagenomics", *Science of the Total Environment*, vol. 707, pp. 1-9, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135929>
- [4] H. Pirjo, J. Ramírez, L. Caputo e I. Gómez "Mapping of Spatial and Temporal Variation of Water Characteristics through Satellite Remote Sensing in Lake Panguipulli, Chile", *Science of the Total Environment*, vol. 769, pp. 196-208, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.367>
- [5] O. Mare *et al.*, "Impact of Anthropogenic Activities on Water Quality Parameters of Glacial Lakes from Rodnei Mountains, Romania", *Environmental Research*, vol. 182, pp. 1-11, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109136>
- [6] C. Kuhn *et al.*, "Performance of Landsat-8 and Sentinel-2 Surface Reflectance Products for River Remote Sensing Retrievals of Chlorophyll-a and Turbidity", *Remote Sensing of Environment*, vol. 224, pp. 104-118, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.023>
- [7] P. Majozi, M. Suhyb, S. Bernard, D. Harper y M. Ghirmai, "Remote Sensing of Euphotic Depth in Shallow Tropical Inland Waters of Lake Naivasha Using MERIS Data", *Remote Sensing of Environment*, vol. 148, pp. 178-189, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.025>
- [8] H. Froehlich, R. Gentry, M. Rust, D. Grimm y B. Halpern, "Public Perceptions of Aquaculture: Evaluating Spatiotemporal Patterns of Sentiment around the World", *PLoS ONE*, vol. 12, n.º 1, pp. 1-18, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169281>
- [9] S. Palmer, T. Kutser, y P. Hunter, "Remote Sensing of Inland Waters: Challenges, Progress and Future Directions", *Remote Sensing of Environment*, vol. 157, pp. 1-8, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.021>
- [10] K. Bosse, *et al.*, "Spatial-Temporal Variability of in situ Cyanobacteria Vertical Structure in Western Lake Erie: Implications for Remote Sensing Observations", *Journal of Great Lakes Research*, vol. 45, n.º 3, pp. 480-489, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.02.003>
- [11] G. Zheng *et al.*, "Sustained Growth of High Mountain Lakes in the Headwaters of the Syr Darya River, Central Asia", *Global and Planetary Change*, vol. 176, pp. 84-99, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.03.004>
- [12] M. Xu *et al.*, "A Spectral Space Partition Guided Ensemble Method for Retrieving Chlorophyll-A Concentration in Inland Waters from Sentinel-2a Satellite Imagery", *Journal of Great Lakes Research*, vol. 45, n.º 3, pp. 454-465, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2018.09.002>
- [13] J. Cannizzaro *et al.*, "Remote Detection of Cyanobacteria Blooms in an Optically Shallow Subtropical Lagoonal Estuary Using MODIS Data", *Remote Sensing of Environment*, vol. 231, pp. 1-18, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111227>
- [14] L. Feng, X. Hou y Y. Zheng, "Monitoring and Understanding the Water Transparency Changes of Fifty Large Lakes on the Yangtze Plain Based on Long-term MODIS Observations", *Remote Sensing of Environment*, vol. 221, pp. 675-686, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.007>
- [15] Q. Zhou, *et al.*, "Seasonal and Spatial Distributions of Euphotic Zone and Long-Term Variations in Water Transparency in a Clear Oligotrophic Lake Fuxian, China", *Journal of Environmental Sciences*, vol. 72, pp. 185-197, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.01.005>
- [16] C. Giardino, M. Pepe, P. Brivio, P. Ghezzi y E. Zilioli, "Detecting Chlorophyll, Secchi Disk Depth and Surface Temperature in a Sub-Alpine Lake Using Landsat Imagery", *Science of the Total Environment*, vol. 268, n.º 1-3, pp. 19-29, 2001. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00692-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00692-6)
- [17] V. Bohn *et al.*, "Development of an Empirical Model for Chlorophyll-a and Secchi Disk Depth Estimation for a Pampean Shallow Lake (Argentina)", *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, vol. 21, n.º 2, pp. 183-191, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.04.005>
- [18] Z. Lee, S Shang, L. Qi, J. Yan y G. Lin, "A semi-analytical scheme to estimate Secchi-disk depth from Landsat-8 measurements", *Remote Sensing of Environment*, vol. 177, pp. 101-106, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.033>

- [19] S. Peckham y T. Lillesand, “Detection of Spatial and Temporal Trends in Wisconsin Lake Water Clarity Using Landsat-derived Estimates of Secchi Depth”, *Lake and Reservoir Management*, vol. 22 n.º 4, pp. 331-341, 2006. Doi: <https://doi.org/10.1080/07438140609354367>
- [20] M. Pereira-Sandoval *et al.*, “Calibration and Validation of Algorithms for the Estimation of Chlorophyll-a Concentration and Secchi Depth in Inland Waters with Sentinel-2, *Limnetica*, vol. 38, n.º 1, pp. 471-487, 2019. Doi: <https://doi.org/10.23818/limn.38.27>
- [21] F. Gao, Y. Wang y X. Hu, “Evaluation of the Suitability of Landsat, MERIS, and MODIS for Identifying Spatial Distribution Patterns of Total Suspended Matter from a Self-organizing Map (SOM) Perspective”, *CATENA*, vol. 172, pp. 699-710, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.031>
- [22] C. Huang, Y., Zhang, T. Huang, H. Yanga, Y. Li y Z. Zhang, “Long-term Variation of Phytoplankton Biomass and Physiology in Taihu Lake as Observed Via MODIS Satellite.”, *Water Research*, vol. 153, pp. 187-199. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.017>
- [23] R. Eraso, M. Galo, E. Alcántara, M. Shimabukuro y A. Carmo, “Locally Tuned Model to Map the Chlorophyll-a and the Trophic State in Porto Primavera Reservoir Using MODIS/Terra Images”, *Modeling Earth Systems and Environment*, pp. 1-9, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0415-3>
- [24] S. Wang *et al.*, “Trophic State Assessment of Global Inland Waters Using a MODIS-derived Forel-Ule Index”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 217, pp. 444-460, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.026>
- [25] Z. Cao, *et al.*, “Using VIIRS/NPP and MODIS/Aqua data to provide a continuous record of suspended particulate matter in a highly turbid inland lake”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 64, pp. 256-265, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.09.012>
- [26] K. Shi, Y. Zhang, B. Qin y B. Zhou, “Remote Sensing of Cyanobacterial Blooms in Inland Waters: Present Knowledge and Future Challenges”, *Science Bulletin*, vol. 64, n.º 20, pp. 1540-1556, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.07.002>
- [27] I. McCullough, C. Loftin y S. Sader, “High-frequency Remote Monitoring of Large Lakes with MODIS 500 m Imagery,” *Journal of Remote Sensing of Environment*, vol. 124, pp. 234-241, 2012. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.05.018>
- [28] I. Knight y M. Voth, “Application of MODIS Imagery for Intra-annual Water Clarity Assessment of Minnesota Lakes”, *Journal of Remote Sensing of Environment*, vol. 4, n.º 7, pp. 2181-2198, 2012. Doi: <https://doi.org/10.3390/rs4072181>
- [29] G. Wu, J. de Leeuw, A. Skidmore, H. Prins y Y. Liu, “Comparison of MODIS and Landsat TM5 images for mapping tempo-spatial dynamics of Secchi disk depths in Poyang Lake National Nature Reserve, China”, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29, n.º 8, pp. 2183-2198, 2008. Doi: <https://doi.org/10.1080/01431160701422254>
- [30] Z. Chen, C. Hu y F. Muller-Karger, “Monitoring Turbidity in Tampa Bay Using”. *Journal Remote Sensing of Environment*, vol. 109, n.º 2, pp. 207-220, 2007. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.019>
- [31] K. Koponen, *et al.*, “Analysis on the Feasibility of Multi-source Remote Sensing Observations for chl-a Monitoring in Finnish Lakes”, *Science of the Total Environment*, vol. 268, n.º 1-3, pp. 287-291, 2001. Doi: [https://doi.org/10.1016/s0048-9697\(00\)00689-6](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(00)00689-6)
- [32] C. Petus, G. Chust, F. Gohin, D. Doxaran, J. Froidefond, y Y. Sagarminaga, “Estimating Turbidity and Total Suspended Matter in the Adour River Plume (South Bay of Biscay) Using MODIS 250-m Imagery”, *Continental Shelf Research*, vol. 30, n.º 5, pp. 379-389, 2010. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.12.007>
- [33] L. Zhu, S. Wang, Y. Zhou y F. Yan, “Estimation of Suspended Sediment Concentration Changes in Taihu Lake Based on Multi-temporal MODIS Image Data”. In: Symposium Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), pp. 3023-3026, 2006. Doi: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2006.776>
- [34] S. Chen, L. Han, C. Xiuzhi, L. Dan, S. Lin y Y. Li., “Estimating Wide Range Total Suspended Solids Concentrations from MODIS 250-m Imageries: An Improved Method”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 99, pp. 58-69, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.10.006>
- [35] D. Jiang, B. Matsushita, F. Setiawan y A. Vundo, “An Improved Algorithm for Estimating the Secchi Disk Depth from Remote Sensing Data Based on the New Underwater Visibility Theory”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 152, pp. 13-23. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.002>
- [36] V. Bohn, F. Carmona, R. Rivas, L. Lagomarsino, N. Diovisalvi y H. Zagarese, “Development of an Empirical Model for Chlorophyll-a and Secchi Disk Depth Estimation for a Pampean Shallow Lake (Argentina)”, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, vol. 21, n.º 2, pp. 183-191, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.04.005>
- [37] A. Kulshreshtha y P. Shanmugam, “Estimation of Secchi Transparency in Turbid Coastal Waters”, *Aquatic*

- Procedia*, vol. 4, pp. 1114-1118, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.141>
- [38] E. González-Legarda, M. Imuez, G. Duque, E. Burbano y C. Guerrero, “Efecto de la producción acuícola sobre las variables de calidad del agua del lago Guamuéz”, *Revista Investigación Pecuaria*, vol. 5, n.º 2, pp. 33-43. Doi: <https://doi.org/10.22267/revip.1851.4>
- [39] J. Duque, M. Hermelin y G. Toro, “The Guamuéz (La Cocha) Lake”, En *Landscapes and Landforms of Colombia. World Geomorphological Landscapes*. M. Hermelin (Ed.). Springer. 2016, pp. 203-212. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-11800-0_17
- [40] E. Saeid, K. Bakioglu, J. Kellogg, A. Leier, J. Martínez y E. Guerrero, “Garzón Massif basement tectonics: Structural control on evolution of petroleum systems in upper Magdalena and Putumayo basins, Colombia”, *Marine and Petroleum Geology*, vol. 88, pp. 381-401, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.08.035>
- [41] E. Burbano, R. Aparicio, G. Duquey M. Imuez, “Impactos de la acuicultura en los nutrientes del agua y macroinvertebrados bentónicos del lago Guamuéz”, *MVZ Córdoba*, vol. 23, n.º S, pp. 7035-7047, 2018. Doi: <https://doi.org/10.21897/rmvz.1429>
- [42] M. López y S. Madroño, “Estado trófico de un lago tropical de alta montaña: caso laguna de La Cocha”, *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 25, n.º 2, pp. 21-42, 2015. Doi: <https://doi.org/10.18359/rcin.1430>
- [43] K. Shi, Y. Zhang, G. Zhu, B. Qin y D. Pan, “Deteriorating Water Clarity in Shallow Waters: Evidence from Long Term MODIS and In-Situ Observations”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 68, pp. 287-297, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.12.015>
- [44] S. Chen, L. Han, X. Chen, D. Li, L. Sun y Y. Li, “Estimating Wide Range Total Suspended Solids Concentrations from MODIS 250-M Imageries: An Improved Method”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 99, pp. 58-69, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.10.006>
- [45] A. Digliotti, K. Ruddick, B. Nechad, D. Doxaran y E. Knaeps, “A single Algorithm to Retrieve Turbidity from Remotely-sensed Data in All Coastal and Estuarine Waters”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 156, pp. 157-168, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020>
- [46] R. Moncayo, “Mapeo de la Dinámica regional de la transparencia en aguas continentales usando productos de reflectancia MOD09GA”, vol. 13 n.º 2, *Entramado*, pp. 270-276, 2017. Doi: <https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n2.26233>
- [47] S. Hafeez, M. *et al.*, “Comparison of Machine Learning Algorithms for Retrieval of Water Quality Indicators in Case-Ii Waters: A Case Study of Hong Kong”, *MDPI Remote Sensing*, vol. 11, n.º 6, pp. 1-26, 2018. Doi: <https://doi.org/10.3390/rs11060617>
- [48] L. Arias, Z. Duan, R. Sepúlveda, S. Martínez y M. Disse, “Monitoring Water Quality of Valle de Bravo Reservoir, Mexico, Using Entire Lifespan of MERIS Data and Machine Learning Approaches”, *MDPI Remote Sensing*, vol. 12, n.º 10, pp. 1-26, 2020. Doi: <https://doi.org/10.3390/rs12101586>
- [49] K. Alikas y S. Kratzter, “Improved retrieval of Secchi Depth for Optically-Complex Waters Using Remote Sensing Data”, *Ecological Indicators*, vol. 77, pp. 218-227, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.02.007>
- [50] C. Neil, E. Spyarakos, P. Hunter y A. Tyler, “A Global Approach for Chlorophyll-a Retrieval Across Optically Complex Inland Waters Based on Optical Water Types”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 229, pp. 159-178, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.027>
- [51] V. Sagan, *et al.* (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*, vol. 205, pp. 1-31. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103187>
- [52] B. Demir, F. Bovolo y L. Bruzzone, Classification of Time Series of Multispectral Images With Limited Training Data. *IEEE*, vol. 2, n.º 8, pp. 3219-3233, 2013. Doi: <https://doi.org/10.1109/TIP.2013.2259838>
- [53] W. Javed, B. McDonnel y N. Elmqvist, “Graphical Perception of Multiple Time Series”, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 16, n.º 6, pp. 927-934, 2010. Doi: <https://doi.org/10.1109/TVCG.2010.162>
- [54] T. Le, T. Dang y T. Luong, “Visualizing Access Logs of a Scientific Digital Library Effectively as Multiple Time Series Using Modified Horizon Graphs”, *International Conference on Advanced Computing and Applications*, pp. 85-91, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1109/ACOMP.2019.00020>
- [55] W. Aigner, H. Schumann y C. Tominski. *Visualization of Time-Oriented Data*. Londres: Springer, 2011.
- [56] J. Heer, N. Kong y M. Agrawala, “Sizing the Horizon: The Effects of Chart Size and Layering on the Graphical Perception of Time Series Visualizations”, *Conference Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1303-1312, 2009. Doi: <https://doi.org/10.1145/1518701.1518897>

- [57] S. Few, "Time on the Horizon", *Visual Business Intelligence Newsletter*, pp. 1-7, 2008.
- [58] T. Saito, H. Nakamura, M. Yamamoto, H. Saito, Y. Hosida y T. Kaseda, "Two-Tone Pseudo Coloring: Compact Visualization for One-Dimensional", *IEEE Symposium on Information Visualization*, pp. 173-180, 2005.
- [59] A. Jabbari, R. Blanch y S. Dupuy-Chessa, "Composite Visual Mapping for Time Series Visualization", *IEEE Pacific Visualization Symposium*, pp. 116-124, 2018.
- [60] M. Butt y M. Nazeer, "Landsat ETM+ Secchi Disc Transparency (SDT) Retrievals for Rawal Lake, Pakistan", *Journal Advances in Space Research*, vol. 56, n.º 7, pp. 1428-1440, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.06.041>