

Monitoreo de la calidad del agua mediante clorofila-a aplicando imágenes satelitales en el Humedal Ramsar, lago Guamués

Water quality monitoring by chlorophyll-a applying satellite images in the Ramsar wetland, lake Guamués

Luis Alejandro Bucheli Rosero¹
Brayan Franklin Rojas Bastidas²
Francisco Mafla Chamorro³

DOI: <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.31.8935>

RESUMEN

Las fuentes puntuales y no puntuales de contaminación influyen directamente en la calidad del agua de los reservorios del planeta. Unos niveles altos de concentración de clorofila-a son indicadores de eutroficación, razón por la cual su monitoreo con metodologías alternativas de menor costo se convierte en una herramienta fundamental para alcanzar dicho objetivo, más aún cuando el humedal Ramsar empieza a tener síntomas de condiciones mesotróficas en sectores y periodos específicos. La metodología presentada se basa en la correlación entre clorofila-a (Cl-a) *in situ* y niveles de reflectancia extraída del análisis de imágenes satelitales. Se encontró una correlación con la combinación de bandas b2, b3, b4, b5 y b7 y se evidenció la variación espacial de Cl-a, así como valores altos en los años 2018 y 2020 en zonas de Mojondinoy, El Naranjal, Santa Teresita y Santa Lucía.

Palabras clave: Eutroficación, clorofila-a, imágenes satelitales ópticas, reflectancia, humedal Ramsar.

ABSTRACT

The sources of pollution both direct and dispersed are directly influenced the water quality in the planet's reservoirs. Higher concentration of chlorophyll-a are indicators of eutrophication, this is the reason why low-cost techniques to monitoring it become a fundamental tools to achieve the goal and even more when the Ramsar Wetlands start to manifested symptoms of meso-trophic conditions in specific zones and periods. The actual methodology presented is based on the establishment of the correlation between chlorophyll-a (Cl-a), taken In-situ, and the reflection levels, taken from the optical satellite images analysis. A correlation was founded with the combination of bands as followed: b2, b3, b4, b5 and b7 in which spatial variations of chlorophyll-a was evident. The higher values were founded in the years 2018 and 2020 in the following zones Mojondinoy, El Naranjal, Santa Teresita and Santa Lucía.

Keywords: Eutrophication, chlorophyll-a, optical satellite imagery, reflectance, Ramsar wetland.



Cómo citar este artículo: L. A. Bucheli, B. F. Rojas and F. Mafla. "Monitoreo de la calidad del agua mediante clorofila-a aplicando imágenes satelitales en el Humedal Ramsar, lago Guamués". *Ingeniare*, vol. 17, no. 31, pp. 21-31, Diciembre 2021.

¹ Ingeniero ambiental de la Universidad Mariana, Pasto, Colombia. luibucheli@umariana.edu.co

² Ingeniero ambiental de la Universidad Mariana, Pasto, Colombia. brrojas@umariana.edu.co

³ Ingeniero sanitario, MSc en Ciencias de la Ingeniería. Docente de la Universidad Mariana, Pasto, Colombia, fmafla@umariana.edu.co

INTRODUCCIÓN

Las cuencas hidrográficas son espacios geográficos donde se solapa la acción combinada de los procesos naturales actuantes con las actividades de los diversos grupos sociales que la ocupan y el impacto que éstos generan [1]. Resulta apropiado efectuar el manejo desde la perspectiva de la gestión integrada de los recursos hídricos, definida como el proceso que promueve la gestión y el desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados [2].

Como consecuencia del rápido incremento de la población y la intensificación del uso de la tierra por parte del hombre en las últimas décadas, el ecosistema global ha experimentado niveles sustanciales de presión y se ha alterado drásticamente, dando como resultado la degradación de varios servicios de los ecosistemas y el aumento de riesgos ecológicos [3].

Las actividades terrestres adyacentes a los cuerpos de agua afectan directamente su calidad a través de fuentes puntuales (afluentes de aguas residuales, escorrentía de depósitos de desechos, desagües de aguas pluviales) y no puntuales de contaminación (escorrentía agrícola, deforestación y cambios en el uso de la tierra) [4], lo que conduce a procesos de polución, contaminación y eutrofización, siendo esta última el resultado del aumento de la producción primaria del sistema, provocada por el arrastre de nutrientes como nitrógeno y fósforo [5].

Dada la importancia de estos recursos se hace relevante el estudio de la distribución espacial y temporal de las variables indicadoras de la calidad del agua para desarrollar planes de gestión adecuados [4]. Muchos investigadores han reportado mapeos y monitoreos de la calidad del agua usando análisis espacial por sensores remotos [6], [7].

El uso de imágenes satelitales se considera de gran interés, razón por la cual en los últimos años se han desarrollado diversos modelos que permiten estimar algunos parámetros biofísicos [8]. En general, estos métodos se basan en la cuantificación de aquellas sustancias disueltas o partículas en suspensión que modifican las propiedades ópticas de la masa de agua. Uno de los parámetros más utilizados para determinar el nivel de eutrofización en el agua es la concentración de Cl-a, basado en el hecho de que la variación de su cantidad tiene un efecto distintivo en el espectro de reflectancia del agua.

1. METODOLOGÍA

1.1 Área de estudio

El lago Guamués o laguna La Cocha, ubicado en las coordenadas 1°06'42.53" N y 77°08'29.15" O, es un lago tropical de alta montaña ubicado en el corregimiento El Encano del municipio de Pasto, departamento

de Nariño, al suroccidente de Colombia, en límites con la República del Ecuador. Este reservorio hace parte del sistema alto-andino, posee una superficie de 41,5 m² y una profundidad máxima de 75 m [9]. Hace parte fundamental de las cuencas de los ríos Guamués y Putumayo, este último es afluente del río Amazonas. Es un área de gran diversidad biológica endémica restringida y especializada. Algunos de sus usos son almacenamiento y control del flujo de agua, retención de sedimentos y tóxicos, hábitat para vida silvestre, soporte de cadenas alimenticias, además de recreación pasiva y activa, entre otras [9].

1.2 Recopilación de los niveles de fósforo, transparencia, Cl-a y determinación del IET

Se recopiló y procesó información relacionada con las variables IETPt, IETDs IETCla, debido a que influyen en la eutroficación y son indicadores reales para la evaluación de este proceso. Para determinar el estado trófico del lago se utilizó la ecuación del índice IET:

$$\text{IET promedio} = 10 * \left(\frac{\text{IETPt} + \text{IETCla} + \text{IETDs}}{3} \right) \quad (1)$$

Se escogió este índice, propuesto por Carlson en 1977 [10], porque se define como el peso total de la biomasa presente en un cuerpo de agua, localizada durante un tiempo específico.

1.3 Procesamiento de imágenes satelitales ópticas

En cuanto al procesamiento de imágenes satelitales, se seleccionaron con la fecha más cercana a la de las campañas de Cl-a medida *in situ* para calibrar el modelo con imágenes de los últimos cinco años y así poder determinar la evolución de los niveles de CL-a en este periodo. Luego se realizaron correcciones radiométricas utilizando la conversión de números digitales a reflectancia de las seis primeras bandas de los sensores Landsat 7 y 8, mediante el *software* QGIS 3.14.16.

Tabla 1. Lista de imágenes satelitales seleccionadas

Zona	Fecha imagen satelital	Fecha campaña <i>in situ</i>
Lago Guamués	Imágenes utilizadas para calibración y validación del modelo correlacional	
	29 de enero 2013	18 de marzo 2013
	10 de septiembre 2014	14 de agosto 2014
	10 de octubre 2018	4 de agosto 2018
	Imágenes utilizadas para monitoreo de niveles de Cl-a en los últimos cinco años	
	3 de septiembre 2015	
	29 de octubre 2019	
	22 de marzo 2020	

Fuente: Elaboración propia.

Las imágenes Landsat 8 OLI de nivel 1 se presentan en unidades digitales que se pueden convertir a reflectancia. En este caso, la imagen correspondiente a septiembre de 2014 se convirtió siguiendo la ecuación de la guía del USGS [11].

Las imágenes Landsat 7 ETM de nivel 1 correspondientes a enero de 2013, septiembre de 2015, octubre de 2018, octubre de 2019 y marzo de 2020 se convirtieron de niveles digitales (ND) a valores de radiancia espectral, luego a valores de reflectancia, en las que se utilizaron las ecuaciones del manual USGS [12].

Para calibrar el modelo en el caso del lago Guamués, las imágenes que se usaron correspondían a enero de 2013, septiembre de 2014 y octubre de 2018.

1.4 Generación del modelo Reflectancia vs. CI-a

El modelo se calibró con la imagen de enero de 2013, con la que se obtuvo un mejor comportamiento, mientras que las imágenes de septiembre de 2014 y octubre de 2018 se utilizaron para llevar a cabo una validación. De las imágenes se extrajeron los valores de reflectancia para cada banda y cada píxel, correspondientes a las coordenadas del punto de muestreo *in situ*.

Se aplicó un análisis estadístico de los coeficientes de Spearman (r), de determinación (r^2) y de determinación ajustado ($r^2 a$) con las bandas espectrales del sensor que presentaron la mayor relación con la variable CI-a, medida *in situ*.

El resultado de la correlación del modelo de regresión múltiple se representa por la siguiente expresión matemática:

$$\gamma = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_n X_n \dots \quad (2)$$

Esta ecuación se seleccionó para calcular la concentración de clorofila-a estimada por el sensor remoto (γ , que permite conocer las variables X_1 , X_2 , X_n , en las que se representan las bandas de reflectancia seleccionadas, siendo los coeficientes de regresión β_0 , β_1 , β_2 , β_n los resultados estadísticos [5].

1.5 Monitoreo espacio temporal de la CI-a

Después de calibrar y validar el modelo de aplicación se generaron diferentes escenarios de niveles de clorofila, utilizando las imágenes correspondientes a septiembre de 2015, octubre de 2019 y marzo de 2020, lo que ha permitido monitorear y analizar la evolución de la concentración de clorofila-a hasta la fecha. Así mismo, al aplicar el modelo en las imágenes Landsat 7 y 8 se generaron datos atípicos (valores negativos), que sugieren la presencia de otras superficies diferentes al espejo de agua, como sedimentos y sombra generada por las nubes [12]. A estos valores se les denominó en los mapas de distribución espacial de clorofila-a como "otros valores".

Para monitorear la concentración de clorofila-a se construyeron mapas de distribución de la variable, generando una máscara del cuerpo de agua sobre la cual se aplicó el modelo desarrollado en las imágenes satelitales. De esta manera se logró predecir el valor de dicho parámetro en toda la superficie del cuerpo de agua, permitiendo estimar sus variaciones espaciales.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1. Niveles de fósforo, transparencia y Cl-a

Los resultados obtenidos para las variables o indicadores de calidad del agua medidos en el lago Guamués muestran diferentes rangos de valores entre sus mediciones. Los datos de fósforo total durante los años 2014, 2017 y 2018 oscilaron entre 5,0 y 16,0 $\mu\text{g/L}$, en temporada de lluvias bajas, y 10,2 y 40,0 $\mu\text{g/L}$ en temporada de lluvias altas, evidenciando una mayor acumulación de fósforo total en las zonas de mayor actividad piscícola por la existencia de jaulas flotantes activas, correspondientes a Mojondino, El Naranjal y Santa Teresita. El fenómeno de escorrentía también estaría incidiendo en el arrastre de sedimentos. De esta forma se evidencia una fuerte influencia del régimen de lluvias en las condiciones del lago [13].

Los datos de transparencia medidos en 2008, 2013, 2014 y 2018 oscilaron entre 2,0 y 4,9 m, en temporada de lluvias bajas, y 1,32 y 5,5 m, en temporada de lluvias altas. Con respecto a esta variable, el lago no presenta un decaimiento en su estado de calidad de agua, a excepción de algunos valores en periodo de lluvias altas en zonas donde se ubican criaderos de trucha de la Universidad de Nariño, en el sector norte [14].

Los datos de Cl-a medidos en campo durante 2008, 2013, 2014 y 2018 oscilaron entre 0,98 y 9,3 $\mu\text{g/L}$, en temporada de lluvias bajas, y 0,36 y 3,48 $\mu\text{g/L}$, en la temporada de lluvias altas. Se presentan valores altos en zonas donde existen aportes difusos y puntuales de nutrientes, materia orgánica y contaminantes provenientes de las descargas no tratadas. Los valores más bajos de Cl-a involucran la variación de los niveles de profundidad, que puede ser consecuencia de la alteración de procesos fotosintéticos de la comunidad fitoplanctónica, debido a la reducción de la capa fótica [15].

La determinación de la calidad del agua se considera la parte central de cualquier estudio de valoración o monitoreo de un lago o embalse. Con base en los límites tróficos establecidos por los criterios del índice IET [11], el lago Guamués se categorizó como un sistema oligotrófico en la mayoría de las zonas de muestreo en cada periodo anual, lo que evidenció una buena calidad del agua y buena oxigenación; sin embargo, se presentan promedios IET más elevados en algunas zonas, que corresponden a Mojondino en temporada de lluvias altas, en las que se obtuvo un valor de 49,90%, y para la temporada de lluvias bajas se obtuvo un promedio de 47,76% en los años 2014 y 2018, lo que se categoriza en un sistema mesotrófico. Las zonas con mayor incidencia a desarrollar eutroficación están asociadas al incremento de nutrientes que ingresan al sistema, especialmente por actividades agrícolas, vertimientos de aguas residuales o el establecimiento de jaulas flotantes para la cría de trucha [16].

2.2 Calibración del modelo

La Tabla 2 muestra los coeficientes de correlación más altos de Spearman (r), de determinación (r^2) y de determinación ajustado (r^2a), obtenidos a partir de los modelos de regresión múltiple realizados por diferentes combinaciones de banda.

Las bandas que explican el comportamiento de la variable clorofila-a son: azul (b2), verde (b3), rojo (b4), infrarrojo cercano (b5) e infrarrojo medio (b7) [17].

Tabla 2. Combinación de bandas para Landsat-7 y 8 con la correlación establecida para la estimación de clorofila-a, a partir de regresiones múltiples

Landsat-7 2013			
Combinación bandas	r	r^2	r^2a
b2,b3,b5	0,625	0,391	-0,066
b3*b4,b5	0,638	0,407	0,169
b5/b4,b2,b3	0,635	0,403	-0,045
b2,b3,b4,b5,b7	0,970	0,941	0,793
b4/b5,b2,b3	0,673	0,453	0,042

Fuente: Elaboración propia.

De esta forma, el modelo de regresión múltiple con mejor bondad en el ajuste correspondió a la combinación de bandas **b2, b3, b4, b5, y b7** del año 2013, ya que explicó el 79,3% de la variabilidad de la concentración de clorofila-a. La Tabla 3 presenta el modelo de respuesta estimado que mejor explicó la distribución espacial de la variable Cl-a en el lago Guamués.

Tabla 3. Estadísticas de la regresión múltiple seleccionada

Variable	Coefficientes β	Error típico
Intercepción	3,0907	0,7725
X 1 (b2)	4,8647	23,1033
X 2 (b3)	-103,9123	36,4369
X 3 (b4)	30,6150	13,0361
X 4 (b5)	-54,0996	25,1830
X 5 (b7)	147,0981	35,6484

Fuente: Elaboración propia.

$$Cl - a = 3,090 + 4,8647 * b2 - 103,912 * b3 + 30,6150 * b4 - 54,099 * b5 + 147,098 * b7$$

Por lo tanto, para el caso del lago Guamués se obtuvieron los coeficientes de regresión de cada variable (b2, b3, b4, b5 y b7), generando la ecuación final para la estimación de clorofila-a.

2.3 Validación del modelo

Las Gráficas 1 y 2 muestran la comparación entre los valores de Cl-a *in situ* y los calculados por los sensores remotos. El buen ajuste obtenido a partir del análisis de regresión ($R^2 = 0,64$ y $0,62$) indica la capacidad predictiva del modelo propuesto, que fue menor al encontrado en estudios similares [5]. Los resultados obtenidos confirman que la metodología utilizada en el presente estudio es adecuada para determinar el Cl-a en el lago Guamués.

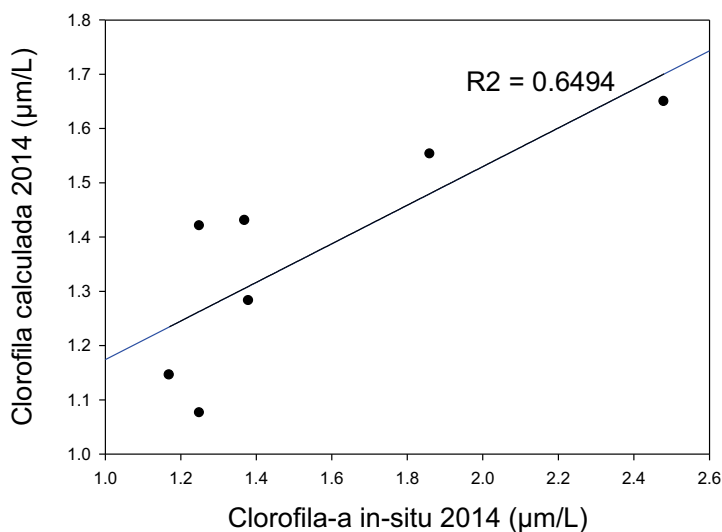


Figura 1. Relación entre los valores de clorofila-a calculada y los valores clorofila-a *in situ* (2014)

Fuente: Elaboración propia.

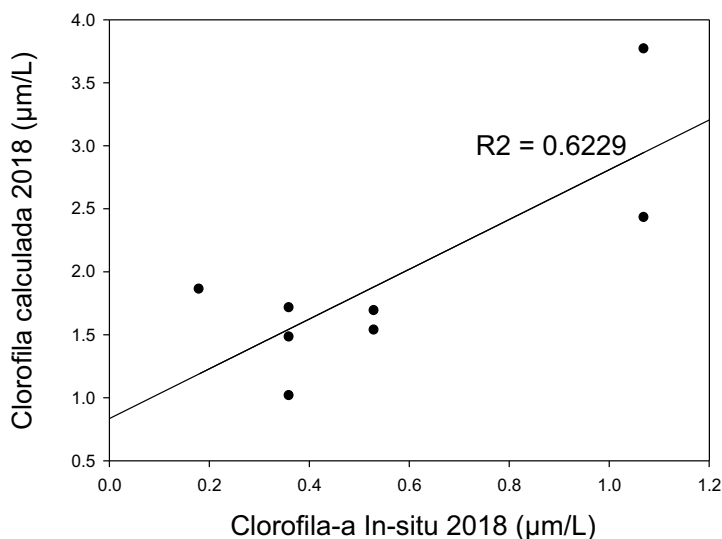


Figura 2. Relación entre los valores de clorofila-a calculada y los valores clorofila-a *in situ* (2018)

Fuente: Elaboración propia.

El modelo estimado para el lago Guamués permitió calcular la concentración de clorofila-a a nivel espacio-temporal, ya que los parámetros estadísticos muestran buena correlación. En consecuencia, los errores derivados del modelo pueden explicarse, probablemente, por la complejidad y dinámica del sistema. Otro factor que limita la confiabilidad del modelo es el intervalo de tiempo entre la toma de datos *in situ* y la disposición de la fecha de la imagen satelital, puesto que debe ser lo más reducida posible, e incluso debe ser simultánea para tener mayor confiabilidad de los datos [7].

Por otro lado, se desconoce el error de las campañas de clorofila-a obtenidas *in situ*, recolectadas mediante información secundaria, ya que pueden existir errores en el muestreo o en los laboratorios utilizados para determinar la clorofila-a, porque no existe certeza de si la calidad de los datos es adecuada. Además, la cantidad de estaciones de muestreo en campo pueden no ser suficientes, debido a la extensión del lago, a la variabilidad de sus procesos hidrológicos y a la calidad de agua.

2.2. Monitoreo espacio temporal de clorofila-a

A continuación, se presentan los resultados del monitoreo de la Cl-a mediante la utilización de imágenes satelitales en un periodo extendido, incluso determinando las condiciones actuales del lago (Figuras 3 y 4).

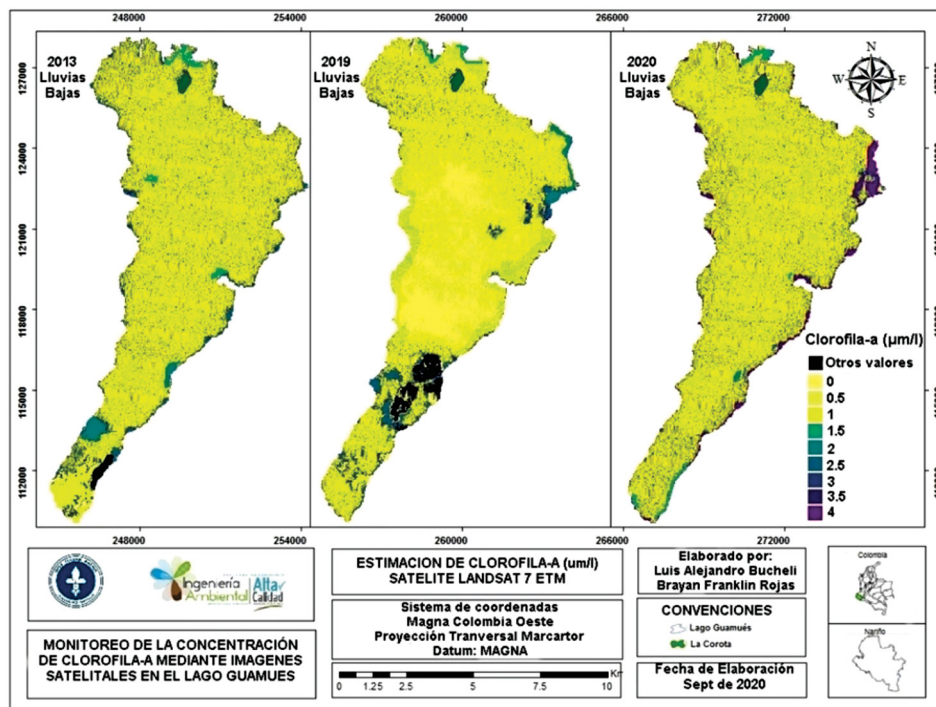


Figura 3. Distribución espacial de clorofila-a, estimada con satélite Landsat 7 ETM, para lluvias bajas

Fuente: Elaboración propia.

En la anterior figura (Figura 3) se observa que las concentraciones más elevadas de clorofila se encuentran en El Naranjal, El Puerto, Santa Teresita, Santa Lucía y Mojondinoy, tendencia que se está acentuando a través del tiempo, estimando una concentración de 3,62 $\mu\text{m/L}$ para el año 2020, que puede atribuirse a vertimientos procedentes del asentamiento de jaulas flotantes para la cría de trucha arcoiris [16].

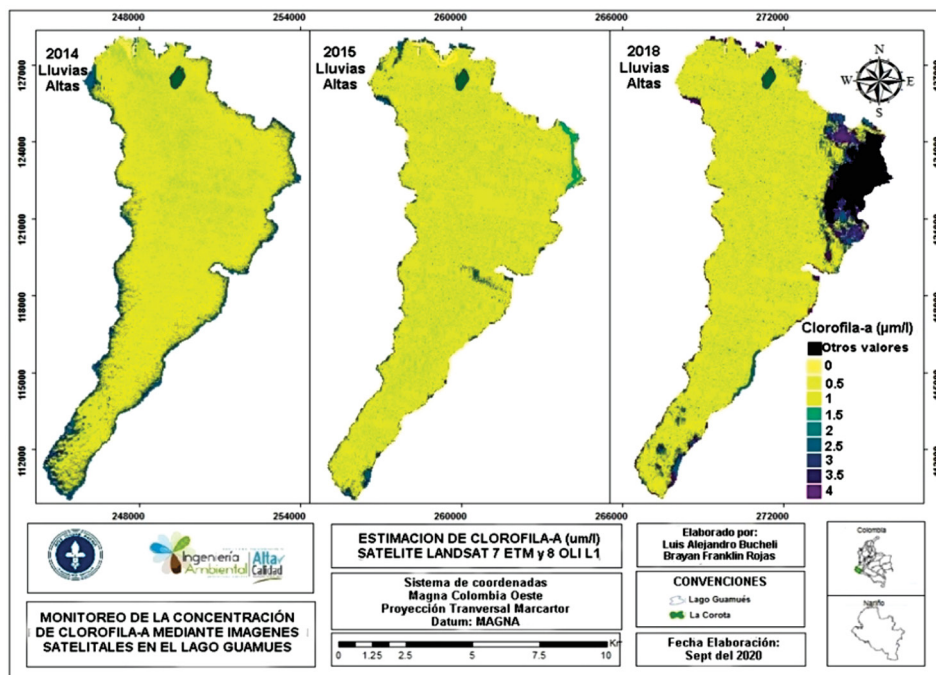


Figura 4. Distribución espacial de clorofila-a, estimada con satélite Landsat 7 y 8, para lluvias altas

Fuente: Elaboración propia.

De igual manera, en la Figura 4 se observa el comportamiento espacial de Cl-a, estimada en la temporada de lluvias altas. En esta época el lago presenta variaciones en la concentración de clorofila-a, destacando así mismo una mayor concentración en las zonas de Santa Teresita, Santa Lucía, El Puerto y Mojondinoy, encontrándose valores hasta de 3,76 $\mu\text{m/L}$ de Cl-a, indicando que sin importar la condición climática del lago la zona se encuentra deteriorada por factores puntuales de contaminación como los ya mencionados.

3. CONCLUSIONES

Las respuestas de regresión múltiple estimadas permitieron generar el modelo que relaciona la reflectancia de las combinaciones de banda y los datos *in situ* de clorofila-a. La estadística de regresión mostró que la varianza explicada no es muy alta ($r^2 a = 0,793$); sin embargo, se validó el mismo modelo para

los años 2014 y 2018, obteniendo unos coeficientes de correlación de 0,64 y 0,62, que se consideró adecuada para el análisis espacial y temporal. También se predijo la estimación de la Cl-a para los años 2015, 2019 y 2020, en los que se desconocen los datos *in situ* de Cl-a, permitiendo además alcanzar una mejor cobertura y variación espacial del parámetro analizado.

Con base en el estado de eutroficación, el lago Guamués se puede considerar oligotrófico para la mayoría de las zonas, con excepción de El Naranjal y Mojondinoy, que presentan un estado mesotrófico, debido a la presencia de fuentes antrópicas que las afectan. Se hace necesario contemplar planes de monitoreo periódico y gestión de la calidad del agua con el fin de vigilar la variación del estado trófico del recurso hídrico. Así mismo, los mapas obtenidos a partir de las imágenes satelitales permitieron monitorear la evolución de la concentración de clorofila-a, registrando un aumento en zonas que presentan riesgo de deterioro en su calidad del agua. Finalmente, fue importante monitorear los datos para establecer la calidad del agua actual, así como promover su monitoreo y conservación.

Debido al comportamiento dinámico del lago Guamués, y para obtener correlaciones más precisas, se recomienda adquirir información *in situ* con la fecha casi simultánea cuando el satélite capte la información, porque así se representa mejor la distribución espacio temporal de la concentración de clorofila-a.

REFERENCIAS

- [1] C. Dasso, E. Piovano, A. Pasquini, F. Córdoba, K. Lecomte, L. Guerra y V. Campodónico (2014). Recursos hídricos superficiales. En *Relatorio del XIX Congreso Geológico de Córdoba* [En línea]. 2, 1209-1231. Disponible en: <https://n9.cl/gmud9>.
- [2] Global Water Partnership (2000). *Towards water security: A framework for action*. GWP Secretariat, pp. 438-560.
- [3] B. Wang, M. Ding, S. Li, L. Liu y L. Ai (2020). Assessment of landscape ecological risk for a cross-border basin: A case study of the Koshi River Basin, central Himalayas. *Ecological Indicators*, [En línea] 117, 106621, pp. 4-8 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X20305586>.
- [4] M. Ledesma, M. Bonancea, C. Ledesma, M. Rodríguez y L. Pinotti (2018). Water quality assessment of the Cassaffouth Reservoir using multivariate statistical techniques. *Ab Intus* [En línea] 1(2), 27-38. Disponible en: <https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S180666902013000300002&script=sciarttext&tlng=es>.
- [5] C. Rodríguez, M. Bonansea, F. Bonatto, V. Reynoso, C. Proserpi, M. Mancini y C. Ledesma (2007). Remote Sensing- GIS to Predict on the Risk of Eutrophication in Aquatic Systems. Space Technology based tele-health project initiatives in Latin America and the Caribbean. *Nations Programme on Space Applications* [En línea] 28-30. Disponible en: <https://n9.cl/5qrm5>.

- [6] A. Boufekane y O. Saighi (2019). Assessing groundwater quality for irrigation using geostatistical method—Case of wadi Nil Plain (North-East Algeria). *Groundwater for Sustainable Development* [En línea]. 8, 179-186 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352801X18300560>.
- [7] Z. Yu, K. Yang, Y. Luo y C. Shang (2020). Spatial-temporal process simulation and prediction of chlorophyll-a concentration in Dianchi Lake based on wavelet analysis and long-short term memory network. *Journal of Hydrology*, [En línea] 582, 124488. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002216941931223>.
- [8] H.J. Gons, M. Rijkeboer y K.G. Ruddick (2005). Effect of a waveband shift on chlorophyll retrieval from MERIS imagery of inland and coastal waters. *Journal of Plankton research* 27(1), pp. 125-127 [En línea]. Disponible en: <https://academic.oup.com/plankt/article/27/1/125/1510826>.
- [9] Corponariño. Plan de manejo humedal Ramsar, La Cocha, Pasto, Colombia, pp. 24-36, 2011.
- [10] R. E. Carlson (1977). A trophic state index for lakes 1. *Limnology and oceanography* 22(2), pp. 361-369 [en línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/245122548_A_TrophicState.
- [11] USGS (2016). Landsat 8 Surface reflectance code (LASRC) product, guide. Versión 4.2. Disponible en: <https://landsat.usgs.gov/landsat-satellites>.
- [12] USGS (2016). Landsat 7 (L7) Data Users Handbook. (P. 79-80). Disponible en: https://prd-wret.s3.us-west2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/LSDS-1927_L7_Data_Users_Handbook-v2.pdf.
- [13] E. Burbano Gallardo (2018). Influencia de cultivos piscícolas en la calidad del agua y comunidades bacterianas en el sedimento del lago Guamués. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia. Disponible en: http://bdigital.unal.edu.co/70500/1/2018-Msc-Elizabeth_Burbano_Gallardo.pdf.
- [14] J. López, J. Salas, Y. Gómez, A. Gómez, H. López, A. Ortega y C. Guerrero, C., Diagnóstico del estado de trofización y estudio de la variabilidad de los parámetros limnológicos y su interrelación con la producción de trucha arco iris en jaulas flotante en el lago Guamués. Contrato interadministrativo, Universidad de Nariño y Corponariño, Pasto, 2008.
- [15] E. Hernández, N. Aguirre, J. Palacio, J. Ramírez y J. Restrepo (2008). Variación espacio-temporal de la asociación fitoplanctónica en diferentes momentos del pulso hidrológico en la ciénaga del Ayapel (Córdoba), Colombia. *Actualidades Biológicas* 30(88), pp. 67-81. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.udea.edu.co/index.php/actbio/article/view/329332>.
- [16] G. Cárdenas y F. Mafla, Capacidad de carga del lago Guamués o laguna de La Cocha del corregimiento El Encano, municipio de Pasto. Convenio interadministrativo de interés público No. 132711. Pasto, Colombia. Universidad Mariana, Universidad de Nariño, Corponariño, 2014.
- [17] B. Nas, H. Karabork, S. Ekercin y A. Berkay (2009). Mapping chlorophyll-a through *in-situ* measurements and Terra ASTER satellite data. *Environmental monitoring and assessment*, 157(1-4), pp. 375-382 [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-008-0542-9>.