

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DEL EMBALSE SAN JACINTO, CON IMÁGENES DE SATÉLITE LANDSAT 8, TARIJA, BOLIVIA

* Deimar Fernández¹
Luis Muñoz²
Esperanza Flor Coronel³

DETERMINATION OF THE TROPHIC STATE OF THE SAN JACINTO RESERVOIR, USING SATELLITE IMAGES LANDSAT 8, TARIJA, BOLIVIA

Recibido el 1 de octubre de 2021. Aceptado el 22 de marzo de 2022

Abstract

The values of the trophic status indicators such as chlorophyll-a (Chl-a), transparency (Z_{SD}) and turbidity, have contributed to the increase in the trophic levels of reservoirs and lakes. The objective of this research is to demonstrate that it is possible to estimate and predict the trophic state of the San Jacinto reservoir, with a high spatial resolution through the use of Landsat 8 satellite images, in combination with in situ data and through multiple linear regression models of Chl-a and Z_{SD} parameters in the dry and wet seasons of 2018 and 2019. The results categorize the reservoir as hypereutrophic in the wet period with an average Z_{SD} of 0.35 m. and eutrophic in the dry period with an average Z_{SD} of 1.94 m. For the Chl-a values, the average value in the wet period was 12.65 $\mu\text{g}/\text{l}$. Categorizing the reservoir as eutrophic and in the dry season as Ultraoligotrophic with an average value of 0.83 $\mu\text{g}/\text{l}$, with a variation with The classification using the Z_{SD} values, it is deduced that the low transparency of the water would not be due to a high concentration of phytoplankton or algae, but rather to high amounts of matter or solids in suspension (turbidity). This phenomenon occurs in the San Jacinto reservoir due to the dragging of sediment discharged by the waters of the Grande, Chico rivers and the Tablada Grande stream of the Tolomosa basin. The determination coefficient for each variable and each season varied in Chl-a from 80.06% in the wet season and 73.79% in the dry period. The R^2 of Z_{SD} of 74.83% in the wet season and 74.93% in the dry period. The results showed positive equations that allowed estimating the parameters of the trophic levels of the San Jacinto reservoir.

Keywords: San Jacinto Reservoir, trophic status, Landsat 8, OLI sensor, multiple linear regression models.

¹ Departamento de Manejo de Cuencas Hidrográficas y Medio Ambiente, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales, Estudiante de Doctorado en Ciencias - U.A.J.M.S., Bolivia.

² Laboratorio de Análisis de Agua COSAALT Ltda, Encargada del Área Físicoquímico de Agua Residual, Bolivia.

³ Empresa Dyma Asociados SRL, Especialista en Teledetección, Bolivia.

*Autor correspondiente: Departamento de Manejo de Cuencas Hidrográficas y Medio Ambiente, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales, Estudiante de Doctorado en Ciencias – U.A.J.M.S, Bolivia, Av. Víctor Paz Estensoro, Campus El Tejar, Tarija-Bolivia. Email: deimarfernandez@uajms.edu.bo

Resumen

Los valores de los indicadores del estado trófico como la clorofila-a (Chl-a), transparencia (Z_{SD}) y turbidez, han contribuido al incremento en los niveles tróficos de embalses y lagos. El objetivo de esta investigación es demostrar que es posible estimar y predecir el estado trófico del embalse San Jacinto, con una alta resolución espacial mediante el uso de imágenes satelitales Landsat 8, en combinación con datos *in situ* y a través de modelos de regresión lineal múltiple de los parámetros Chl-a y ZSD en las temporadas del periodo seco y húmedo del año 2018 y 2019. Los resultados categorizan al embalse, como hipereutrófico en el periodo húmedo con Z_{SD} promedio de 0.35 m. y eutrófico en el periodo seco con un Z_{SD} promedio de 1.94 m. Para los valores de la Chl-a, el valor promedio en el periodo húmedo fue de 12.65 $\mu\text{g/l}$, categorizándolo al embalse como eutrófico y en la temporada seca como Ultraoligotrófico con un valor promedio de 0.83 $\mu\text{g/l}$, existiendo una variación con la clasificación mediante los valores de Z_{SD} , se deduce que la baja transparencia del agua no estaría dada por una alta concentración de fitoplancton o algas, sino por altas cantidades de materias o sólidos en suspensión (turbidez). Este fenómeno se presenta en el embalse San Jacinto por el arrastre de sedimento que descargan las aguas de los ríos Grande, Chico y la quebrada Tablada Grande de la cuenca Tolomosa. El Coeficiente de determinación para cada variable y cada temporada varió en Chl-a de 80.06 % en la temporada húmeda y 73.79 % en el periodo seco. El R^2 de Z_{SD} de 74.83 % en la temporada húmeda y 74.93 % en el periodo seco. Los resultados mostraron ecuaciones positivas que permitieron estimar los parámetros de los niveles tróficos del embalse San Jacinto.

Palabras clave: Embalse San Jacinto, estado trófico, Landsat 8, Sensor OLI, modelos regresión lineal múltiple.

Introducción

La eutrofización es un fenómeno que viene siendo estudiado desde la década de los 70 (Ropal, 2010), es el resultado de una combinación de factores biológicos, químicos y físicos en los que destacan la luz, la temperatura, los nutrientes y la estabilidad horizontal y vertical de la columna de agua (Ledesma, C., Bonansea, M., Rodríguez, C., Sánchez A. R., 2013).

Las concentraciones de sustancias ópticamente activas en los cuerpos de agua y producen la proliferación de algas nocivas, anoxia y el deterioro de la calidad del agua (Wang, Y., Xia, Hao, Fu, J., She., G., 2004), ésta, se refleja en los efectos combinados de los procesos a lo largo de una cuenca hidrográfica, donde las actividades antropogénicas en todas las escalas espaciales contribuyen al deterioro de los cuerpos de agua (Briceño, I., Pérez, W., San Miguel, D., Ramos, R., 2018).

La alteración del paisaje y la vegetación no solo cambian el equilibrio hídrico, sino que también alteran los procesos que controlan la calidad del agua (Peters y Meybeck, 2000). El PMSJ (2019) mediante el Centro de Investigación del Agua "CIAGUA" (2019), hace referencia histórica sobre el proceso de sedimentación del embalse San Jacinto, siendo el principal problema ambiental de la calidad del agua.

Los estudios de análisis de parámetros físico químico y biológicos realizados en el embalse San Jacinto, son demasiados escasos, se destacan los estudios realizados por Laviolette (2005). Por otro lado, gracias a un pequeño financiamiento de la FUCID (Fondation Universitaire pour la Coopération Internationale au Développement), permitido la realización de estudios limnológicos relativamente cortos en el embalse San Jacinto (Descy & Sarmento, 2006).

No obstante, se destaca el estudio encargado al “Laboratorio de Proyectos Ambientales de la Universidad Nacional Autónoma de México” en el embalse San Jacinto, denominado “Informe de la UNAM” en 2006, los resultados de parámetros físicos, químicos y biológicos fueron demasiados alarmantes, llegando a la decisión de suspender el uso de las aguas provenientes de este embalse para el consumo humano; hubo bastante especulación y repercusiones. Al respecto, de acuerdo a Medina, I., Smolders, A., Lebrato, Coronel, F., Orozco, M., (2007), realizaron una interpretación del Informe técnico de la UNAM, encontrándose limitaciones al estudio de la UNAM.

Después del informe de la UNAM, se realizaron estudios esporádicos muy cortos. No obstante, se destaca el estudio realizado por Gutiérrez, Medrano & Universidad Católica Boliviana, (2015), donde concluyen que las aguas del Lago San Jacinto corresponden a la "Clase B", por el contenido de los valores de Coliformes Fecales de DBO. Después de este año no se conocen de otros estudios sobre calidad del agua.

La estimación de parámetros de calidad ambiental en cuerpos de agua a partir de imágenes satelitales ha sido posible debido a la relación que existe entre las propiedades ópticas del agua y la reflectancia en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético de la luz (Pérez y Muñoz, 2006). Los cuerpos de agua exhiben comportamientos de reflectancia/absorbancia variable y condicionado tanto por factores externos como por las propiedades físicas y químicas del agua (Pérez y Muñoz, 2006).

Según, Briceño, I., Pérez, W., San Miguel, D., Ramos, R., 2018, manifiesta que la teledetección, es una herramienta complementaria para la determinación de la calidad de agua desde el punto de vista espacial y temporal. Para la estimación de parámetros ambientales, algunas investigaciones han utilizado las imágenes satelitales de Landsat, desde las más recientes versiones para los sistemas continentales, lagos entre otros. Estos estudios se basan en las relaciones entre los valores de reflectancia de las distintas bandas espectrales y los valores de los parámetros registrados in situ durante el paso del satélite para establecer en su mayoría modelos de regresión lineal simples o múltiples que permitan estimar los parámetros ambientales en una escala espacial fina (Aviña, 2018).

Las imágenes Landsat (sensores TM, ETM y OLI) han sido utilizadas para analizar las propiedades limnológicas de las aguas como herramienta para complementar los análisis de seguimiento

fisicoquímico y biológicos y para establecer las relaciones que existen entre las reflectividades y los datos medidos en laboratorio e *in situ* (Chen, 2016, citado por Briceño, I., Pérez, W., San Miguel, D., Ramos, R., 2018).

En el año 1970, el Programa Cooperación sobre la Eutrofización” de la OECD, establece una secuencia de categorías tróficas para los cuerpos de agua lénticos, cimentado en las concentraciones de Clorofila “a” (Chl a), fósforo total (P total), y transparencia medida con el Disco de Secchi (Ds). Además de las concentraciones de turbidez (Laviolette, 2005; Sarmiento, 2006; San Martín, 2007). La concentración de clorofila-a y transparencia han sido unos de los parámetros más estimados a partir de imágenes Landsat (Lim y Choi, 2015; Aviña, 2018; Yunus, A.P., Dou, J., Sravanthi, N., 2015; Brezonik, P., Menken, K.M., Bauer, M. 2005; Wang, Y., Xia, Hao, Fu, J., She., G., 2004). Un claro ejemplo es el trabajo de Briceño, I., Pérez, W., San Miguel, D., Ramos, R., 2018, quienes estimaron la calidad de agua en el Lago Vichuquén, Chile, a partir de imágenes de satélite Landsat 8, y mediciones *in situ*, basados en el uso combinado de sensores ópticos y modelos regresión lineal múltiple para estimar clorofila-a (Chl-a), sólidos en suspensión y la transparencia Sechi (Z_{SD}).

Los resultados de diversas investigaciones científicas (Matthews, 2011; Gitelson, A., Garbuzov, G., Szilagyi, F., Mittenzwey, K.H., Karnieli, A., Kaiser, A. 1993; Wang, Y., Xia, Hao, Fu, J., She., G., 2004; Sánchez, E., Colmenarejo, M. F., Vicente, J., Rubio, A., García, M. G., Travieso, L., Borja, R. 2007; Giardino, C., Bresciani, M., Cazzaniga, H., Schenk, K., Rieger, P., Braga, F., Matta, R., Brando, V. E. 2014) permitieron evaluar y modelar espacial y temporalmente la calidad del agua mediante el análisis de regresiones, estableciendo relaciones estadísticas entre variables medidas *in situ* en limitados periodos de tiempo y con datos de sensores remotos. Estos estudios demostraron el potencial de la teledetección para el análisis de las dinámicas de cuerpos de aguas continentales, marítimas y humedales marino-costeros (Briceño, I., Pérez, W., San Miguel, D., Ramos, R., 2018).

La presente investigación pretende demostrar que es posible estimar y predecir el estado trófico del embalse San Jacinto, con una alta resolución espacial mediante el uso de imágenes satelitales Landsat 8, en combinación con datos *in situ* y a través de modelos de regresión lineal múltiple en las temporadas del periodo seco y húmedo del año 2018 y 2019.

Materiales y métodos

Área de estudio

La Figura 1., muestra la localización de la estación de muestreo estudiada y la Tabla 1., muestra algunas de sus características morfométricas del embalse San Jacinto, área de estudio.

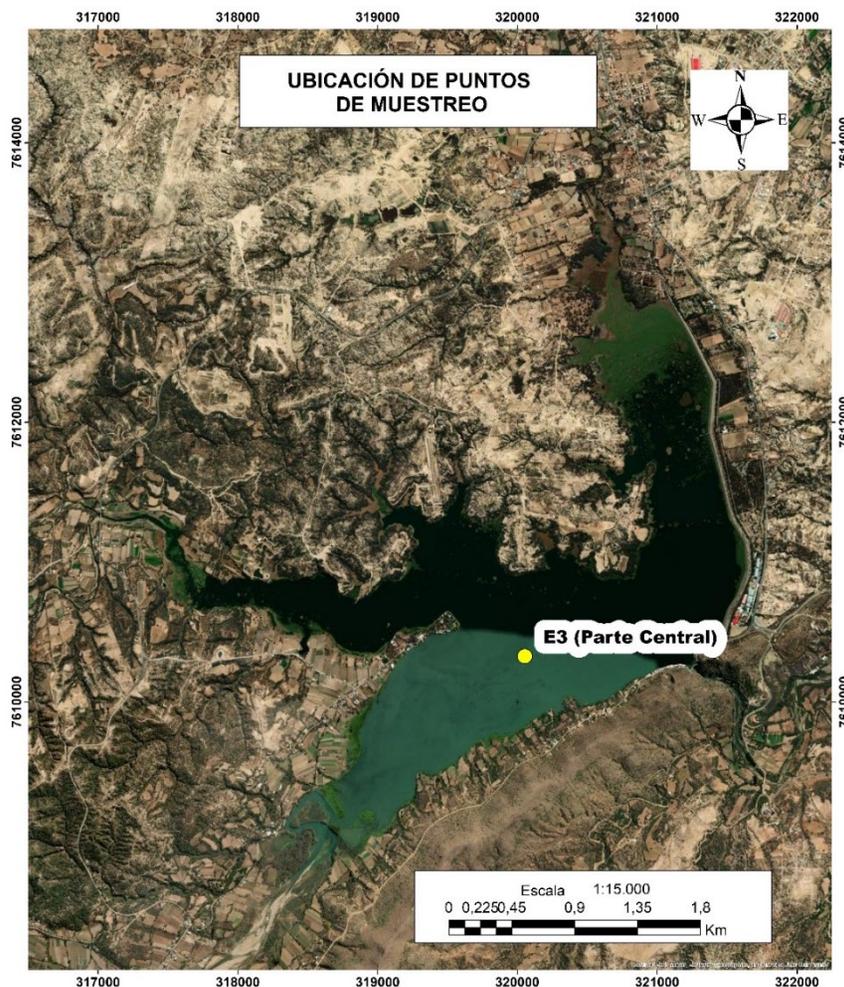


Figura 1. Localización de la estación de muestreo

Tabla 1. Características morfométricas del embalse San Jacinto.

Características	Detalle
Tipo de presa:	Presa de hormigón armado doble curvatura
Area de la cuenca:	437 km ² .
Altura de la presa:	46.5 m
Longitud de cada vertedero:	10 m
Longitud de coronamiento:	100 m
Cota de vertedero con presa inflable:	1884 m.s.n.m.
Espejo de agua (1884 m.s.n.m.):	602 has
Cota vertedero de cemento:	1882.50 m.s.n.m.
Capacidad:	7.5 kw/hr
Altura de carga:	50 m

Según, Laviolette (2005), el río Tolomosa, es uno de los principales afluentes que alimenta al embalse San Jacinto, nace con el nombre de río Calderillas con un recorrido de sur a norte en la parte alta de la cordillera de Sama, hasta llegar a la comunidad de Sola, donde adquiere éste nombre y cambia de dirección hacia el este, hasta la confluencia con el río Pinos desde donde toma el nombre de río Tolomosa, el cual después de un recorrido de aproximadamente 7 km, llega a unirse con el río Mena, formando el llamado “Río Grande”.

Otro curso de agua importante que alimenta al embalse, y nace como Río San Andrés, que al recorrer alrededor de 4 km., se une con la quebrada Negra, formando el denominado “Río Chico” (Laviolette, 2005). La quebrada Tablada Grande, es un afluente estacionario que conducen sus aguas al embalse San Jacinto.

El embalse San Jacinto, se localiza en la región sur, Tarija-Bolivia, entre los paralelos 20° 55' 44" y 22° 13' 35" de latitud sur y los meridianos de 64° 15' 14" y 65° 02' 03" de longitud Oeste, reservorio puesto en funcionamiento en el año 1989, sobre el cauce del río Tolomosa, a una altura de 1900 m.s.n.m, con una superficie promedio de 560 ha., y un perímetro de 48 km., ocupa una superficie de 467.2 km². El principal problema ambiental de las aguas del embalse, es el transporte de sedimentos, que según datos proporcionados por el Proyecto Múltiple San Jacinto (2019), el embalse contiene 18.117.214 m³., de sedimento acumulado.

El embalse registra una estratificación, con una termoclina a los 4 - 6 m. en la columna de agua, clasificando preliminarmente al embalse como polimíctico caliente (Fernández, 2018).

Planificación del Muestreo in situ

Se planteó un muestreo discrecional que estableció una (1) estación de muestreo (E), localizada en la parte central del embalse para contar con valores de mejores condiciones tróficas (Figura 1).

Los muestreos en campo se realizaron a una profundidad entre 0 y 1.0 m, la frecuencia de muestreo, fue realizado cada 16 días de acuerdo a la revisita del satélite Landsat 8 OLI por el embalse San Jacinto, los días 19 de septiembre de 2018 y 25 de enero 2019, en temporada seca y húmeda.

Recolección de datos *in situ*

La recolección de las muestras de Chl-a se realizó en el estrato superficial, entre 0-1.0 m de profundidad, con botella Van Dorn de 3.0 litros, y los valores de clorofila-a, se obtuvieron con el equipo portátil Aqua Fluor[®], (fluorómetro). Los valores de Z_{SD} se obtuvieron *in situ*, se sumergió el disco de Secchi desde una lancha y la profundidad a la que el disco desaparece de la vista, es la lectura del Disco Secchi. La transparencia del agua es conocida como la zona fótica (Laviolette, 2005).

Pre-procesamiento de imágenes satelitales

Se utilizaron dos imágenes del satélite Landat 8 OLI, obtenidas del servidor gratuito de la USGS, <https://earthexplorer.usgs.gov/> de fecha 19 de septiembre de 2018 y 25 de enero 2019, que corresponden a los periodos seco y húmedo.

Se corrigieron mediante el método de corrección DOS1, modelo de sustracción de objetos oscuros propuesto por Chávez (2016), se realizó mediante el Software Qgis de código abierto, bajo la utilización del Plugin Semi-Automatic Classification (SCP).

En la tabla 2., se muestra las características de las bandas empleadas del satélite Landsat 8 sensor OLI, que fueron empleadas para la evaluación del estado trófico del lago San Jacinto, para la evaluación se trabajó con valores de reflectancia del espectro visible de las bandas; azul, verde, rojo e infrarrojo cercano; como bien es sabido la firma espectral del agua destaca entre 0.40 – 0.70 μm de longitud de onda, asciende desde la banda azul y desciende en el infrarrojo cercano.

Tabla 2. Características de bandas empleadas del satélite Landsat 8 sensor OLI.

Sensor	Bandas	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
(OLI)	Banda 2 (azul)	0.45 – 0.51	30
Operational	Banda 3 (verde)	0.53 – 0.59	30
Land Imager	Banda 4 (rojo)	0.64 – 0.67	30
	Banda 5 (infrarrojo cercano NIR)	0.85 – 0.88	30

La reflectividad que presenta el agua es bastante baja y con una tendencia descendente a medida que aumenta la longitud de onda, se ve afectada por factores como el contenido de clorofila, materiales en suspensión, rugosidad y profundidad (Manzano, 2004).

Modelos de regresión lineal múltiple

La estimación de la transparencia y concentración de clorofila, se realizó mediante un ajuste empírico de modelos de regresión lineal múltiple para época seca y húmeda respectivamente, se obtuvieron a través de una serie de combinaciones entre las bandas 2 azul, banda 3 verde, banda 4 rojo y banda 5 infrarrojo cercano siendo variables independientes de los modelos y los datos medidos in situ son las variables dependientes.

El modelo fue estimado en el software Statgraphics Centurion XVI, la selección de las variables fue realizada mediante el procedimiento hacia atrás (backward), empleando 70 muestras, con lo cual se obtuvieron las ecuaciones 1, 2, 3 y 4.

Formas de ecuaciones calibradas para periodo húmedo

Transparencia:

$$Z_{SD} = -\beta_0 - \beta_1(b_2)^2 + \beta_2(b_2/b_3)^2 - \beta_3(b_5/b_3)^2 + \beta_4(b_5/b_4)^2 + \beta_5(b_3/b_4)^2 - \beta_6(b_4/b_2)^2 - \beta_7(b_2/b_5)^{0.5} + \beta_8(b_4/b_5)^{0.5} + \beta_9(b_5/b_2)^{0.5} - \beta_{10}(b_5/b_4)^{0.5} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Clorofila:

$$1/(chl-a) = -\beta_0 + \beta_1 b_2/b_3 - \beta_2 b_2/b_4 - \beta_3 b_2/b_5 + \beta_4 b_3/b_4 + \beta_5 b_3/b_5 + \beta_6 b_4/b_3 + \beta_7 b_5/b_2 - \beta_8 b_5/b_3 - \beta_9(b_2)^{0.5} + \beta_{10}(b_3)^{0.5} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Formas de ecuaciones calibradas para periodo seco

Transparencia:

$$Z_{SD} = \beta_0 + \beta_1(b_3)^{0.5} - \beta_2(b_4)^{0.5} - \beta_3(b_5)^{0.5} + \beta_4(1/b_5)^2 + \beta_5(b_2/b_3)^2 - \beta_6(b_2/b_4)^2 - \beta_7(b_3/b_5)^2 + \beta_8(b_4/b_2)^2 + \beta_9(b_4/b_5)^2 + \beta_{10}(b_5/b_2)^2 - \beta_{11}(b_5/b_4)^2 - \beta_{12}(1/b_3)^{0.5} + \beta_{13}(1/b_4)^{0.5} - \beta_{14}(1/b_5)^{0.5} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Clorofila:

$$1/(chl-a) = \beta_0 + \beta_1 b_3 - \beta_2 b_4 - \beta_3 b_2/b_4 + \beta_4 b_3/b_2 + \beta_5 b_3/b_4 - \beta_6 b_4/b_3 - \beta_7 b_5/b_4 - \beta_8 1/b_2 + \beta_9(b_2)^{0.5} - \beta_{10}(b_3)^{0.5} + \beta_{11}(b_4)^{0.5} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7, \beta_8, \beta_9, \beta_{10}, \beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{13}$ y β_{14} son coeficientes resultados del proceso de obtención de la ecuación de regresión lineal múltiple, b_2, b_3, b_4 y b_5 representan los valores de reflectividad de las bandas verde, azul, rojo e infrarrojo cercano, en el rango 0.45 – 0.88 μm de longitud de onda.

Los valores límite de clorofila y profundidad Secchi para los distintos niveles tróficos en el ámbito de lagos de zonas templadas se muestran en la tabla 3., propuesto por la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OCDE, 1982).

Tabla 3. Límites Tróficos por OECD (1982).

Categoría Trófica	Chl-a ($\mu\text{g/l}$) Media (2)	Chl-a ($\mu\text{g/l}$) Máxima (3)	Z_{SD} (m) Media (4)	Máxima de Secchi (5)
Ultraoligotrófico	< 1.0	< 2.5	> 12.0	> 6.0
Oligotrófico	< 2.5	< 8.0	> 6.0	> 3.0
Mesotrófico	2.5 – 8.0	8.0 – 25.0	6.0 – 3.0	3.0 – 1.5
Eutrófico	8.0 – 25	2.5 – 75	3.0 – 1.5	1.5 – 0.7
Hipertrófico	< 25	< 75	< 1.5	< 0.7

Resultados y discusión

Información de laboratorio in situ

Se categorizó al embalse San Jacinto como hipereutrófico en el periodo húmedo y eutrófico en el periodo seco, debido a que el promedio de los valores de la Z_{SD} en la temporada húmeda fue de 0.35 m., mientras que durante la temporada seca se obtuvo un promedio de 1.94 m., categorización que se realizó sobre la base de los límites tróficos establecidos por la (OCDE, 1982).

Para los valores de la Chl-a, el valor promedio en el periodo húmedo fue de 12.65 $\mu\text{g/l}$., categorizándole al embalse como eutrófico y en la temporada seca como Ultraoligotrófico con un valor promedio de 0.83 $\mu\text{g/l}$., existiendo una variación con la clasificación mediante los valores de Z_{SD} , se deduce que la baja transparencia del agua no estaría dada por una alta concentración de fitoplancton o algas, sino por altas cantidades de materias en suspensión o sólidos en suspensión (turbidez). Este fenómeno se presenta en el embalse San Jacinto por el arrastre de sedimento que descargan en las aguas, los ríos Grande, Chico y quebrada Tablada Grande de la cuenca Tolomosa al embalse San Jacinto. El comportamiento de los parámetros de calidad de agua en el embalse San Jacinto, concuerda con el estudio realizado por Laviolette (2005). En este estudio se describe como la sedimentación influye en la productividad del embalse y además que los cambios de las propiedades físicoquímico y biológico del agua responden tanto a los periodos del año, sobre todo de temperatura, pH, Oxígeno y conductividad. Estos factores determinan la importancia del funcionamiento ecológico en la dinámica de estos ecosistemas.

El patrón de variabilidad espacial observado en el embalse San Jacinto está determinado por el movimiento originado por la circulación horizontal y vertical del agua, la morfometría de su cuenca, la salida de agua está condicionada al uso como riego o para la generación hidroeléctrica. El embalse, muestra una lenta recuperación en cuanto a los periodos estacionales (húmedo). En las Figuras 2a y 2b se observan los cambios de estado trófico del embalse.

Las alteraciones eutróficas que presenta el embalse pueden estar influenciadas por factores antrópicos, como, por ejemplo, los desechos de los restaurants que se encuentran localizados a las orillas del embalse, la descarga de nutrientes provenientes de los diversos usos del suelo (urbanos, agrícolas, forestales entre otros).

Los usos urbanos, forestales y agrícolas, han sido considerados como concluyentes en el aporte de sedimentos, en el embalse que originan la eutrofización de las aguas (Fernández, 2018).

Modelos de regresión lineal múltiple (RLM)

Los resultados y ecuaciones de los modelos RLM son presentados en la Tabla 4., para cada parámetro y temporada de estudio.

Tabla 4. Modelos de regresión lineal múltiple

Parámetro	Ecuación	R ²	R ² ajustado	Error estándar	Error absoluto medio	Estadístico Durbin-Watson	Valor-P ANOVA
Clorofila periodo húmedo (µg/lt)	$1/(chl-a) = -19.2592 + 21.4598*b2/b3 - 12.6002*b2/b4 - 0.454893*b2/b5 + 10.7952*b3/b4 + 0.290414*b3/b5 + 2.83064*b4/b3 + 1.62233*b5/b2 - 2.54055*b5/b3 - 23.6215*(b2)^{0.5} + 18.9844*(b3)^{0.5}$	80.06%	72.39%	0.0617851	0.0400247	1.60243 (P=0.0477)	< 0.05
Clorofila periodo seco (µg/lt)	$1/(chl-a) = 140.382 + 3991.03*b3 - 3228.43*b4 - 19.9251*b2/b4 + 67.0485*b3/b2 + 69.0985*b3/b4 - 110.751*b4/b3 - 0.113568*b5/b4 - 1.80905*1/b2 + 616.347*(b2)^{0.5} - 4117.17*(b3)^{0.5} + 2855.68*(b4)^{0.5}$	73.79%	61.26 %	0.245878	0.143749	1.96675 (P=0.3245)	< 0.05
Transparencia periodo húmedo (m)	$Z_{SD} = -7.68311 - 61.4025*(b2)^2 + 14.6485*(b2/b3)^2 - 1.15036*(b5/b3)^2 + 1.16009*(b5/b4)^2 + 5.03252*(b3/b4)^2 - 2.07546*(b4/b2)^2 - 14.8116*(b2/b5)^{0.5} + 12.6434*(b4/b5)^{0.5} + 28.9897*(b5/b2)^{0.5} - 34.464*(b5/b4)^{0.5}$	74.83%	65.15%	0.184411	0.111654	1.29417 (P=0.0039)	< 0.05
Transparencia periodo seca (m)	$Z_{SD} = 27.8959 + 124.256*(b3)^{0.5} - 217.03*(b4)^{0.5} - 47.4294*(b5)^{0.5} + 0.000423759*(1/b5)^2 + 41.8556*(b2/b3)^2 - 11.9471*(b2/b4)^2 - 0.0821826*(b3/b5)^2 + 12.2939*(b4/b2)^2 + 0.245155*(b4/b5)^2 + 3.87249*(b5/b2)^2 - 3.70317*(b5/b4)^2 - 20.796*(1/b3)^{0.5} + 15.1064*(1/b4)^{0.5} - 2.27322*(1/b5)^{0.5}$	74.93%	57.38 %	0.184272	0.10483	2.09034 (P=0.3760)	< 0.05

En la tabla se indica el R², R² ajustado, el error estándar del estimado, el error absoluto medio, el estadístico de Durbin-Watson (DW), la Razón-F y el Valor P. Estos valores nos permiten cuantificar el error presente en los modelos propuestos y analizar como varían en función de la media. Asimismo, son indicadores de la calidad de las medidas. Por otro lado, el estadístico de (DW), no indica autocorrelación serial en los datos puesto que el valor-P de (DW) es mayor que 0.05 con un nivel de confianza del 95.0%. Los modelos RLM para la Chl-a y Z_{SD} en ambos periodos estudiados indican que los coeficientes de regresión son aceptables.

Los modelos RLM permitieron la evaluación gráfica de las dispersiones entre los valores observados y los predichos, como se observa en las Figuras 2a, 2b y 2c, muestran la adecuación del modelo lineal y la tendencia creciente.

El R^2 de la Chl-a, es 80.06 % en la temporada húmeda y 73.79 % en el periodo seco. El R^2 de Z_{SD} es 74.83 % en la temporada húmeda y 74.93 % en el periodo seco. Los resultados muestran ecuaciones positivas que permitieron estimar los parámetros de los niveles tróficos del embalse San Jacinto.

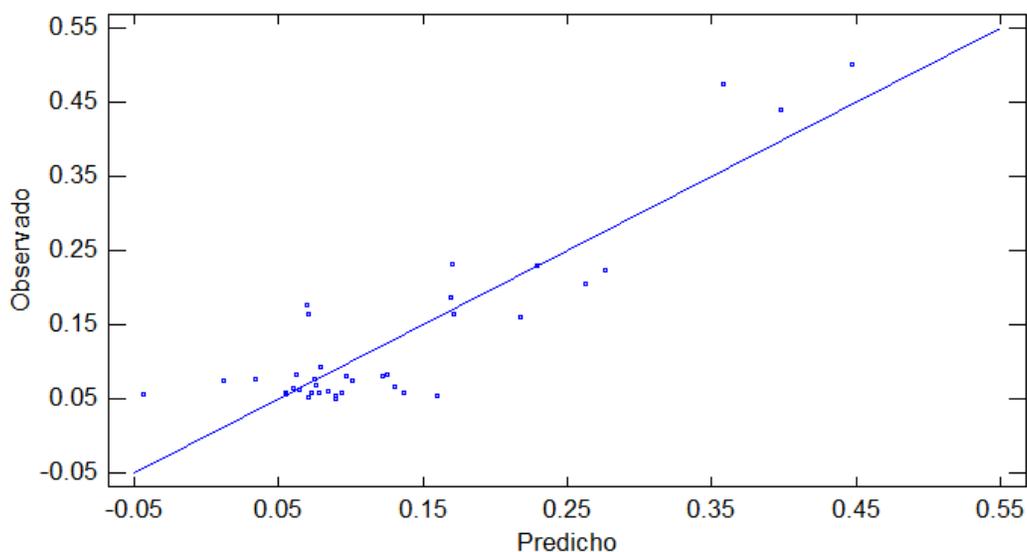


Figura 2(a) Valores observados y predichos de Chl-a periodo húmedo.

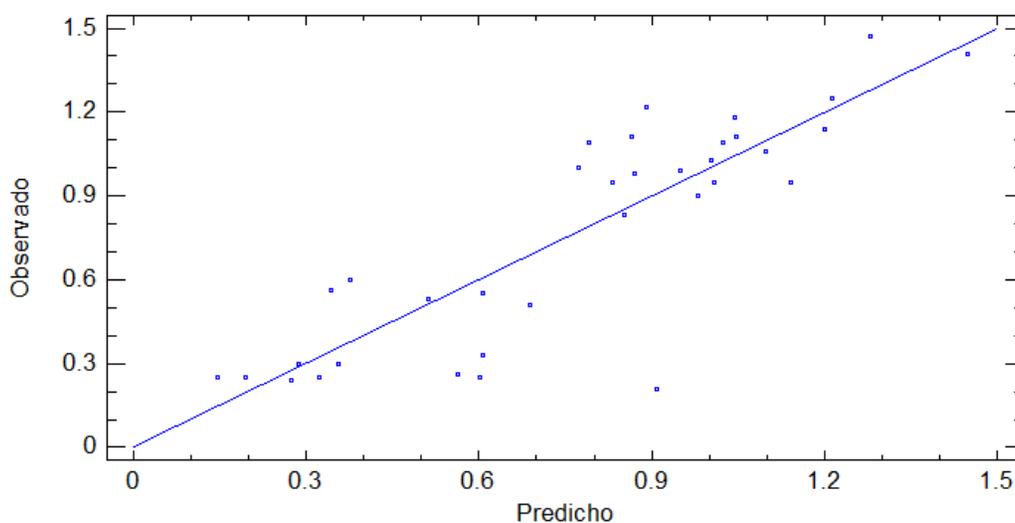


Figura 2(b) Valores observados y predichos de Chl-a periodo seco.

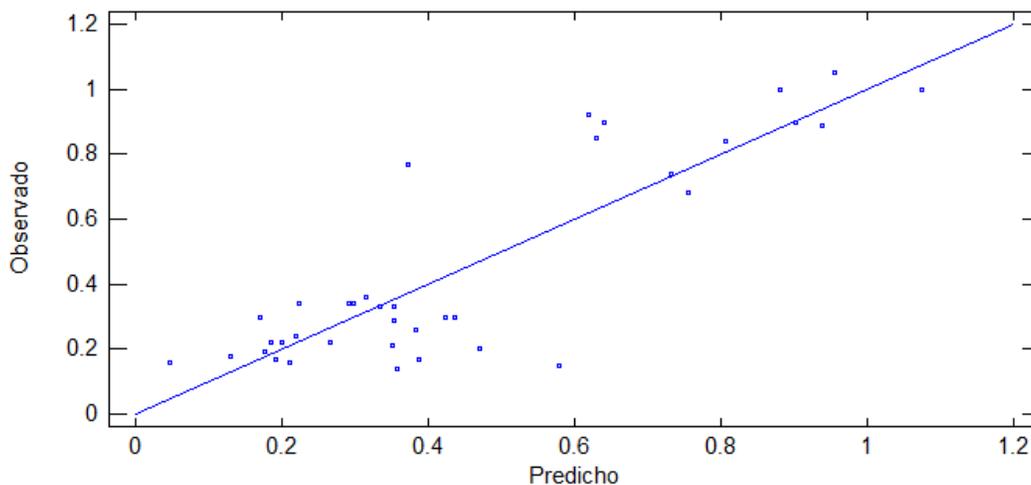


Figura 2(c) Valores observados y predichos de Z_{SD} periodo húmedo.

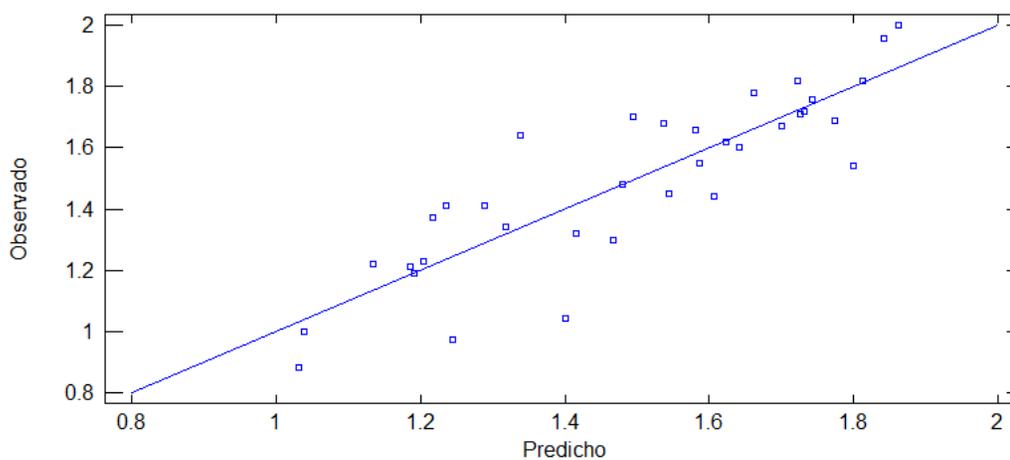


Figura 2(d) Valores observados y predichos de Z_{SD} periodo seco.

Análisis estadístico de los modelos de regresión lineal múltiple

En las Tablas 5, 6, 7 y 8., se detallan la significancia estadística de cada variable independiente, usadas para la construcción de los modelos de regresión para Chl-a y Z_{SD} , para el periodo húmedo y seco.

Tabla 5. Significancia estadística de los modelos aplicados Chl-a periodo húmedo.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
Constante	-7.68311	2.18814	-3.51125	0.0016
$(b_2)^2$	-61.4025	26.1124	-2.35147	0.0266
$(b_2/b_3)^2$	14.6485	3.39047	4.32050	0.0002
$(b_5/b_3)^2$	-1.15036	0.30320	-3.79406	0.0008
$(b_5/b_4)^2$	1.16009	0.37175	3.12060	0.0044
$(b_3/b_4)^2$	5.03252	1.29401	3.88909	0.0006
$(b_4/b_2)^2$	-2.07546	0.49908	-4.15852	0.0003
$(b_2/b_5)^{0.5}$	-14.8116	3.44449	-4.30008	0.0002
$(b_4/b_5)^{0.5}$	12.6434	2.91940	4.33082	0.0002
$(b_5/b_2)^{0.5}$	28.9897	6.54788	4.42734	0.0002
$(b_5/b_4)^{0.5}$	-34.4640	7.88125	-4.37291	0.0002

Tabla 6. Significancia estadística de los modelos aplicados Chl-a periodo seco.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
Constante	-7.68311	2.18814	-3.51125	0.0016
$(b_2)^2$	-61.4025	26.1124	-2.35147	0.0266
$(b_2/b_3)^2$	14.6485	3.39047	4.32050	0.0002
$(b_5/b_3)^2$	-1.15036	0.30320	-3.79406	0.0008
$(b_5/b_4)^2$	1.16009	0.37175	3.12060	0.0044
$(b_3/b_4)^2$	5.03252	1.29401	3.88909	0.0006
$(b_4/b_2)^2$	-2.07546	0.49908	-4.15852	0.0003
$(b_2/b_5)^{0.5}$	-14.8116	3.44449	-4.30008	0.0002
$(b_4/b_5)^{0.5}$	12.6434	2.91940	4.33082	0.0002
$(b_5/b_2)^{0.5}$	28.9897	6.54788	4.42734	0.0002
$(b_5/b_4)^{0.5}$	-34.4640	7.88125	-4.37291	0.0002

Tabla 7. Significancia estadística de los modelos aplicados Z_{SD} periodo húmedo.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
Constante	-7.68311	2.18814	-3.51125	0.0016
$(b_2)^2$	-61.4025	26.1124	-2.35147	0.0266
$(b_2/b_3)^2$	14.6485	3.39047	4.32050	0.0002
$(b_5/b_3)^2$	-1.15036	0.30320	-3.79406	0.0008
$(b_5/b_4)^2$	1.16009	0.37175	3.12060	0.0044
$(b_3/b_4)^2$	5.03252	1.29401	3.88909	0.0006
$(b_4/b_2)^2$	-2.07546	0.49908	-4.15852	0.0003
$(b_2/b_5)^{0.5}$	-14.8116	3.44449	-4.30008	0.0002
$(b_4/b_5)^{0.5}$	12.6434	2.91940	4.33082	0.0002
$(b_5/b_2)^{0.5}$	28.9897	6.54788	4.42734	0.0002
$(b_5/b_4)^{0.5}$	-34.4640	7.88125	-4.37291	0.0002

Tabla 8. Significancia estadística de los modelos aplicados Z_{SD} periodo seco.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
Constante	27.8959	5.62301	4.96102	0.0001
(b3) ^{0.5}	124.256	47.5924	2.61083	0.0167
(b4) ^{0.5}	-217.030	59.5851	-3.64235	0.0016
(b5) ^{0.5}	-47.4294	11.0508	-4.29192	0.0004
(1/b5) ²	0.000423	0.00010	4.11739	0.0005
(b2/b3) ²	41.85560	9.61861	4.35153	0.0003
(b2/b4) ²	-11.94710	2.89418	-4.12797	0.0005
(b3/b5) ²	-0.082182	0.03758	-2.18661	0.0408
(b4/b2) ²	12.29390	2.68689	4.57553	0.0002
(b4/b5) ²	0.245155	0.07547	3.24820	0.0040
(b5/b2) ²	3.87249	1.10252	3.51241	0.0022
(b5/b4) ²	-3.70317	1.05938	-3.49561	0.0023
(1/b3) ^{0.5}	-20.7960	4.35727	-4.77272	0.0001
(1/b4) ^{0.5}	15.10640	3.35082	4.508270	0.0002
(1/b5) ^{0.5}	-2.27322	0.479324	-4.74254	0.0001

Las ecuaciones expuestas en la Tabla 4., se utilizaron para estimar las concentraciones de Chl-a y Z_{SD} en las imágenes satelitales Landsat 8. El R^2 de la Chl-a en el periodo seco, se ve influenciado por la presencia de materias o sólidos en suspensión (turbidez) en el agua.

En la Figura 3., se observa el comportamiento espacial de Chl-a y en la Figura 4., la Z_{SD} , estimadas a partir del modelo de regresión lineal múltiple en los periodos estudiados. La respuesta del patrón de reflectancia espectral fue la deseada, conforme a la originada por floraciones de algas debido a un aumento en las concentraciones de Chl-a, dando lugar a una mayor respuesta en longitudes de onda verdes y menores en longitudes de onda azul y roja (Sass, G. Z., Creed, I. F., Bayley, S. E., Devito, K. J. 2008).

En el periodo húmedo, el embalse San Jacinto presenta un aumento en sus límites tróficos, lo que puede indicar porque durante este periodo se registran altas precipitaciones y temperaturas que aceleran el arrastre de sedimentos. En el periodo seco, muestra una relativa recuperación, pasando de Hipereutrófico a Eutrófico.

Al observar el comportamiento espacial de las variables medidas tanto de Chl-a y Z_{SD} , se deduce que los principales afluentes que alimenta al embalse San Jacinto (rio Chico, Grande y Quebrada Tablada Grande) afectan los patrones de calidad del agua en el embalse San Jacinto, registrándose en las entradas valores elevados en cada parámetro medido (Chl-a y Z_{SD}) en el periodo húmedo.

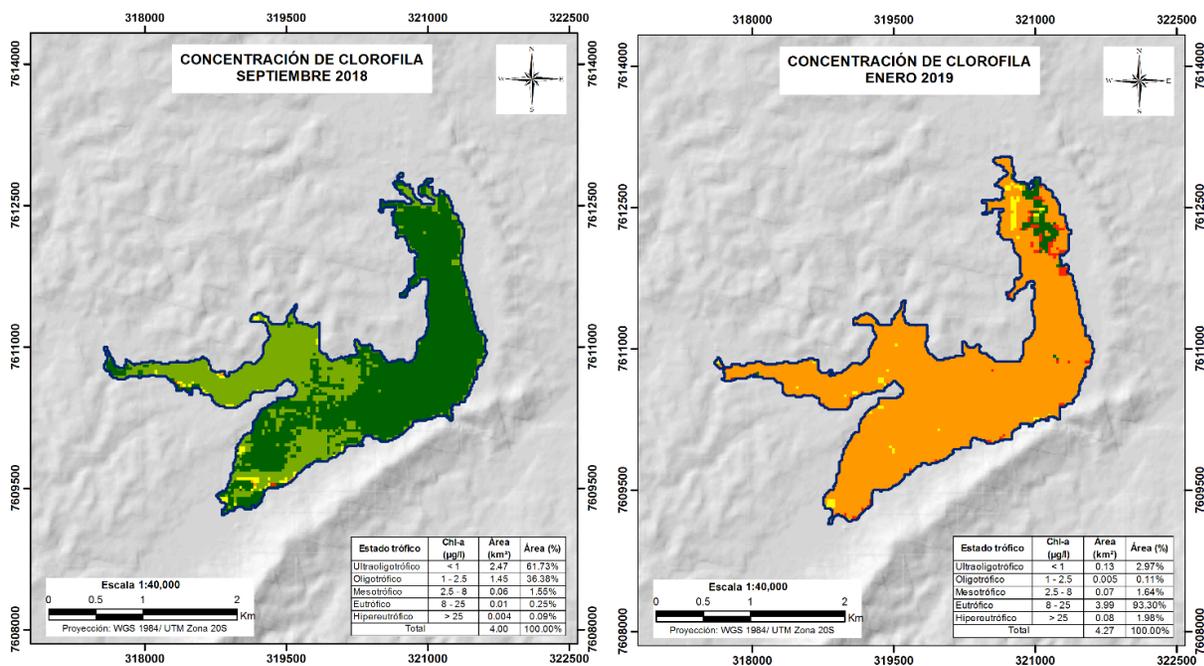


Figura 3. Concentración de Chl-a septiembre (izquierda) y Concentración de Chl-a enero estimada a partir de modelos de regresión lineal múltiple (derecha).

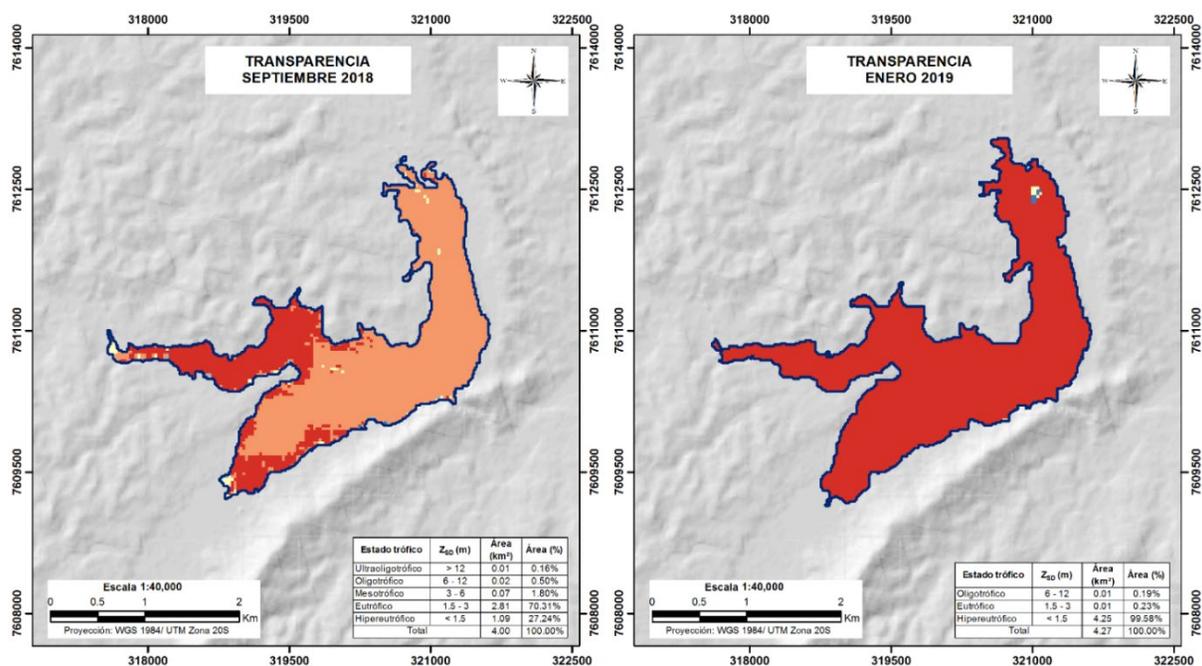


Figura 4. Concentración de Z_{SD} Septiembre (izquierda) y Concentración de Z_{SD} enero estimada a partir de modelos de regresión lineal múltiple (derecha).

Conclusiones y recomendaciones

Los resultados obtenidos a partir de las ecuaciones matemáticas estimadas para este estudio, permitieron conocer la variabilidad espacial y temporal de los parámetros del estado trófico del embalse San Jacinto medidos con los datos de imágenes satelitales, aportando un conocimiento en relación al uso de la teledetección como herramienta para determinar la concentración de Chl-a y Z_{SD} con el sensor OLI de Landsat 8.

Los resultados presentados en el presente trabajo, permiten la validación de las metodologías de detección de los parámetros del estado trófico con el uso combinado de sensores ópticos y modelos regresión lineal múltiple.

El R^2 de Z_{SD} es 74.83 % en la temporada húmeda y 74.93 % en el periodo seco. Los resultados muestran ecuaciones positivas que permitieron estimar los parámetros de los niveles tróficos del embalse San Jacinto. Se observa que este parámetro se ve influenciado por la cantidad de la radiación que traspasa el agua, así como, por las altas concentraciones de fitoplancton y materias en suspensión.

El embalse San Jacinto, se categoriza como hipereutrófico en el periodo húmedo y eutrófico en el periodo seco, debido a que el promedio de los valores de la Z_{SD} en la temporada húmeda fue de 0.35 m., mientras que durante la temporada seca se obtuvo un promedio de 1.94 m.

La baja transparencia del agua no estaría dada por una alta concentración de fitoplancton o algas, sino por altas cantidades de materias o sólidos en suspensión. Este fenómeno se presenta en el embalse San Jacinto por el arrastre de sedimento que descargan en las aguas, los ríos Grande, Chico y quebrada Tablada Grande de la cuenca Tolomosa.

Los modelos de regresión lineal múltiple, permitieron la estimación del estado trófico del embalse San Jacinto, no obstante, se recomienda incrementar el número de puntos de muestreo para obtener mejores valores de R^2 , para disminuir la incertidumbre y lograr un menor error asociado a la estimación de los parámetros del estado trófico.

Se recomienda el seguimiento continuo del estado trófico del embalse San Jacinto, con la aplicación de instrumentos que integren datos *in situ* y de teledetección. Además, es importante, considerar otras estaciones de muestreo y medición *in situ* en el embalse San Jacinto para contar con una mayor representatividad espacial de los valores obtenidos en el presente trabajo.

La determinación de los sólidos en suspensión y el caudal sólido que aporta al embalse San Jacinto a través de sus tributarios, es importante realizarlo, puesto que permitirá una interpretación integral de los resultados logrados en la investigación.

Conocer el estado trófico del embalse San Jacinto es de vital importancia para el seguimiento espacio-temporal, que permita una adecuada gestión y la toma de decisiones por parte de las instituciones públicas y privadas.

Referencias bibliográficas

- Brezonik, P., Menken, K.M., Bauer, M. (2005) Landsat-based Remote Sensing of Lake Water Quality Characteristics, Including Chlorophyll and Colored Dissolved Organic Matter (CDOM), *Lake and Reservoir Management*, **21**(4), 373-382.
- Briceño, I., Pérez, W., San Miguel, D., Ramos, R. (2018) Determinación de calidad de agua en el Lago Vichuquén, con imágenes de satélite Landsat 8, sensor OLI, 2016, *Revista de Teledetección*, **52**, 67-78. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.10126>
- Chen, H. (2016) *Monitoring tropical billabong water turbidity using Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) derived imagery*. Thesis submitted, Charles Darwin University, 3-90 pp.
- Descy & Sarmento, (2006) *Synthèse des connaissances actuelles sur le lac San Jacinto et son bassin et perspectives de mise sur pied d'un projet*, Mission financée par la FUCID, Belgium. Reporte PMSJ-008/2006, 12 pp.
- Fernández, D., (2018) Influencia de los parámetros fisicoquímicos sobre las propiedades ópticas de las aguas del Embalse San Jacinto, *SEC Ciencia*, **1**(2), 21-28.
- Giardino, C., Bresciani, M., Cazzaniga, H., Schenk, K., Rieger, P., Braga, F., Matta, R., Brando, V. E. (2014) Evaluation of multi-resolution satellite sensors for assessing water quality and bottom depth of Lake Garda, *Sensors (Switzerland)*, **14**(12), 24116- 24131.
- Gitelson, A., Garbuzov, G., Szilagyi, F., Mittenzwey, K.H., Karnieli, A., Kaiser, A. (1993) Quantitative remote sensing methods for real-time monitoring of inland waters quality, *International Journal of Remote Sensing*, **14**(7), 1269-1295.
- Gutiérrez, V., Medrano, N. (2017) Análisis de la calidad del agua y factores de contaminación en el Lago San Jacinto de Tarija. *Ventana Científica*, **8**(13), 13-19.
- Ledesma, C., Bonansea, M., Rodríguez, C., Sánchez A., R. (2013) Determinación de indicadores de eutrofización en el embalse Río Tercero, Córdoba (Argentina), *Revista Ciencia Agronómica*, **44**(3), 419-425.
- Lim, J. & Choi, M. (2015) Assessment of water quality based on Landsat 8 operational land imager associated with human activities in Korea, *Environmental Monitoring and Assessment*, **187**(6), 384.
- Matthews, M. (2011) A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters, *International Journal of Remote Sensing*, **32**(21), 6855-6899.
- Medina, I., Smolders, A., Lebrato, Coronel, F., Orozco, M., (2007) *Contaminación de la represa de San Jacinto (Tarija, Bolivia)*, *Interpretación del informe técnico de la UNAM*, Grupo TAR I+D, Universidad Autónoma Juan Misael Saracho – Universidad de Sevilla, Reporte TAR I+D-001/2007, 2-12 pp.
- OCDE. (1982) *Eutrophication of waters. monitoring, assessment and control*, Paris, Organisation for Economic Co-operation and Development; Washington, DC, 3-10 pp.
- Pérez, C. & Muñoz, A. (2006) *Teledetección, nociones y aplicaciones*, Salamanca, España, 20-55 pp.
- PMSJ, Proyecto Múltiple San Jacinto-Laviolette. (2005) *Investigaciones limnológicas y pesqueras en el embalse San Jacinto Tarija – Bolivia*, Gobernación del departamento de Tarija, Reporte PMSJ-002/2005, 50 pp.
- Proyecto Múltiple San Jacinto (2019) *Informe técnico final "Servicio de Batimetría del Embalse de la Presa de San Jacinto" (Levantamiento Hidrográfico)*, UAJMS – CIAGUA, Reporte PMSJ-005/2019, 5-20 pp.
- RAP-AL URUGUAY. (2010) *Contaminación y Eutrofización del Agua, Impactos del Modelo de Agricultura Industrial*, (2ª Ed.) Uruguay, 4-26 pp.
- Sánchez, E., Colmenarejo, M. F., Vicente, J., Rubio, A., García, M. G., Travieso, L., Borja, R. (2007) Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution, *Ecological Indicators*. **7**(2), 315-328 pp.

- Sass, G. Z., Creed, I. F., Bayley, S. E., Devito, K. J. (2008) Interannual variability in trophic status of shallow lakes on the Boreal Plain: Is there a climate signal, *Water Resources Research*, **44**(8), 1-11 pp. <https://doi:10.1029/2007WR006310>
- Wang, Y., Xia, Hao, Fu, J., She., G. (2004) Water quality change in reservoirs of Shenzhen, China: detection using LANDSAT/TM data, *Science of the Total Environment*, **328**(1-3), 195-206 pp.
- Yunus, A.P., Dou, J., Sravanthi, N. (2015) Remote sensing of chlorophyll-a as a measure of red tide in Tokyo Bay using hotspot analysis, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, **2**, 11-25 pp.
- Wetzel, R.G. (1975) *Limnología. Editorial Omega*. Barcelona, España, 96 pp.