

# Mapeo de la dinámica regional de la transparencia en aguas continentales usando productos de reflectancia MOD09GA\*

**Ricardo Javier Moncayo-Eraso**

Ingeniero de Sistemas, Doctor en Ciencias Cartográficas, Docente- investigador tiempo completo, programa de Ingeniería en la Institución Universitaria María Goretti IU-CESMAG San Juan de Pasto - Colombia, adscrito al Grupo de Investigación Categoría C RAMPA.  
rjmoncayo@iucsmag.edu.co  <https://orcid.org/0000-0002-5550-6012>

## RESUMEN

La transparencia del agua es un indicador de la calidad de este recurso, y ha sido demostrado que es posible estimar en imágenes generadas por plataformas orbitales la profundidad medida con el Disco de Secchi, con el uso de algoritmos empíricos. Los modelos empíricos correlacionan la intensidad del píxel capturado por la imagen en la banda centrada en los 645nm y el Disco de Secchi. Este trabajo investigativo se desarrolló en el embalse de Porto Primavera, localizado en la frontera que divide los estados de São Paulo, Matto Grosso do Sul e Paraná. Para calibrar y validar el modelo de correlación (reflectancia de superficie Vs Mediciones del Disco de Secchi) se realizaron dos campañas de campo (octubre de 2014 y abril de 2015). El modelo de calibración encontrado muestra que existe un coeficiente de determinación que puede ser considerado como adecuado para la estimación del DS ( $R^2 = 0.8$ ) y los errores asociados con las observaciones también son bajos (RMSE = 0,47m). La dinámica espacial del Disco de Secchi muestra que el embalse de Porto Primavera presenta los menores valores para esta variable en la margen situada en el estado de Matto Grosso do Sul, y en la temporada de otoño del hemisferio austral esta condición puede extenderse hasta la parte norte del lago.

## PALABRAS CLAVE

Teledetección, dinámica espacial, algoritmos empíricos, embalse de Porto Primavera, monitoreo, calidad del agua.

## Mapping of regional transparency dynamics on inland waters using reflectance products MOD09GA

## ABSTRACT

The water transparency is an indicator of the quality of this resource, and it has been demonstrated that it is possible to estimate the depth measured with the Secchi Disk in generated images by orbital platforms with the use of empirical algorithms. Empirical models correlate the intensity of the pixel captured by the image in the 645nm band and Secchi Disk measurements. This investigative work was carried out in the Porto Primavera reservoir located on the border that divides São Paulo, Matto Grosso do Sul and Paraná states. In order to calibrate and validate the correlation model (surface reflectance Vs Secchi Disk measurements) two field sampling campaigns were carried out (October 2014 and April 2015). The calibration model found shows that there is a coefficient of determination that can be considered adequate for the estimation of Secchi Disk ( $R^2 = 0.8$ ), the errors associated with these observations were also low (RMSE = 0.47m). The spatial dynamics of the Secchi Disk show that the Porto Primavera reservoir presents the lowest values for this variable in the margin located in the state of Matto Grosso do Sul and in the autumn season of the southern hemisphere this condition can extend to the northern part of the lake.

## KEYWORDS

Remote sensing, spatial dynamic, empirical algorithms, Porto Primavera Reservoir; monitoring, water quality.

Recibido: 02/05/2017 Aceptado: 28/06/2017

\* <http://dx.doi.org/10.18041/entramado.2017v13n2.26233> Este es un artículo Open Access bajo la licencia BY-NC-SA (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

Cómo citar este artículo: MONCAYO-ERASO, Ricardo Javier. Mapeo de la dinámica regional de la transparencia en aguas continentales usando productos de reflectancia MOD09GA. *En*: Entramado. Julio - Diciembre, 2017. vol. 13, no. 2, p. 270-276. <http://dx.doi.org/10.18041/entramado.2017v13n2.26233>



## Mapeamento da dinâmica regional de transparência nas águas interiores utilizando produtos de reflectância MOD09GA

### R E S U M O

A transparência da água é um indicador da qualidade deste recurso, e foi demonstrado que é possível estimar a profundidade medida com o Disco Secchi em imagens geradas por plataformas orbitais, com o uso de algoritmos empíricos. Os modelos empíricos correlacionam a intensidade do pixel capturado pela imagem na banda centrada nos 645nm e o Disco Secchi. Este trabalho de pesquisa foi realizado no reservatório Porto Primavera, localizado na raia divisória dos estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná. Para calibrar e validar o modelo de correlação (reflectância superficial Vs Secchi Disk Measurements), foram realizados dois trabalhos de campo (outubro de 2014 e abril de 2015). O modelo de calibração encontrado mostra que existe um coeficiente de determinação que pode ser considerado adequado para a estimativa do DS ( $R^2 = 0,8$ ) e os erros associados às observações também são baixos (RMSE = 0,47 m). A dinâmica espacial do Disco de Secchi mostra que o reservatório do Porto Primavera apresenta os valores mais baixos desta variável na margem localizada no estado de Mato Grosso do Sul e, na época de outono do hemisfério sul, esta condição pode ser estendida à ao norte do lago.

### PALAVRAS-CHAVE

Sensoriamento remoto, dinâmica espacial, algoritmos empíricos, reservatório Porto Primavera, monitoramento, qualidade da água.

### Introducción

Los cuerpos de agua continentales se consideran ecosistemas estratégicos ya que estos han permitido el desarrollo de las actividades que aseguran la supervivencia humana y de la fauna terrestre en general (Zhu, Wang, Zhou, Yan, & Zhou, 2004) (Haacka & Ryersonb, 2016). En ese contexto se ha hecho necesario impulsar, desde las entidades gubernamentales y no gubernamentales programas de vigilancia y restauración de estos ecosistemas (Zhang, y otros, 2011) (Chipman & Schlos, 2009).

Generalmente la metodología más empleada para evaluar la calidad del agua es el muestreo *in situ*. Sin embargo, este tipo de técnicas no permite realizar una evaluación de la dinámica regional que pueden presentar las variables ópticamente activas dentro del lago (Alikas & Kratzer, 2017) (Bohna *et al.*, 2017) (Isenstein & Park, 2014). Con el fin de mejorar esa falencia, autores como Lee, y otros (2015), (Fuller, Jodoin, & Minnerick, 2011), (Tyler, Svab, Preston, Présing, & Kovács, 2006) (Dörnhöfer & Oppelt, 2016) indican que una metodología que puede ser implementada para mejorar el dominio espacial es la teledetección. Esta técnica se ha visto favorecida por la mejora continua en la resolución espacial, temporal y espectral de los sensores remotos orbitales, los cuales son capaces de generar productos que registran las leves variaciones en la intensidad del pixel y asociar este valor con los valores de los parámetros ópticamente activos registrados en campo (Bohna, y otros, 2017) (Guo, Zou, Jiang, Tang, & Zhang, 2017) (Toth & Józsków, 2016).

Según Wu, De Leeuw, Skidmore, Prins, & Liu (2008), (Knight & Voth, 2012), (Chipman, 2009) uno de los sensores más

adecuados para realizar estudios en ecosistemas acuáticos de grandes dimensiones es el sensor MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Su alta resolución temporal (diaria) y espectral (36 bandas espectrales) permiten crear algoritmos con los que es posible derivar valores de parámetros limnológicos que determinan la calidad del agua como es el Disco de Secchi (DS) (McCullough, Loftin, & Sader, 2012), de la misma forma, la generación diaria de los productos permite crear una línea base para el monitoreo temporal de la dinámica trófica del lago. Adicionalmente, su resolución espacial media (250m, 500m, 1000m) es adecuada para la observación en una sola escena de cuerpos de agua de grandes dimensiones para lograr analizar la variación espacial y las zonas heterogéneas que existen dentro del lago (Novo, Barbosa, Melack, De Freitas, & Shimabukuro, 2007) (Luo *et al.*, 2016).

El propósito de este trabajo fue el desarrollo de un algoritmo a partir de la banda espectral centrada en los 645nm y detectar los cambios en la profundidad medida con el DS en el embalse de Porto Primavera (Brasil). Para encontrar los mejores modelos de estimación fue utilizada la regresión lineal y cuadrática. Y los resultados muestran que las imágenes MODIS son adecuadas para el monitoreo y análisis de la dinámica espacial que se presenta en el lago.

### I. Área de estudio

El embalse de Porto Primavera se localiza en la frontera entre los estados de São Paulo (SP), Mato Grosso do Sul (MS) y Paraná (PA) (Dias, 2003). El lago fue concebido con el fin de mejorar la producción y distribución eléctrica en el sudeste brasileiro, sin embargo, la producción eléctrica

apenas alcanza los 1.814 MW, lo que resulta en una relación de 0,8MW/km<sup>2</sup> (Dias, 2003). El espejo de agua resultante después de la inundación del área abarca 2.500km<sup>2</sup>, y se extiende por 250km a través de la planicie del Río Paraná (desde las bases de la Hidroeléctrica de Jupia (MS) hasta la ciudad de Primavera, localizada en el sudeste del estado de SP) (Souza Filho, Zanetti, Pinese, & França, 2010). (Ver Figura 1).

## 2. Materiales y métodos

Para este paper en particular se utilizaron datos de dos campañas de campo en las que fueron realizadas mediciones del DS y los píxeles de la banda centrada en los 645nm generada por el sensor MODIS. Para generar los mapas de dinámica espacial de DS fueron realizados los pasos siguientes:

1. Se hace *download* del producto MOD09GA, las imágenes descargadas coinciden con los intervalos de tiempo en las que fueron realizados los trabajos de campo (octubre 2014 y abril 2015).
2. Las imágenes son pre-procesadas con la herramienta MODIS Reprojection Tool, en este punto se incluye el recorte espacial y espectral de las imágenes.

3. Son utilizadas rutinas computacionales creadas en los lenguajes *Python* y *R* para extraer el cuerpo de agua de las imágenes MODIS, utilizando una máscara previamente creada en el formato Geotiff.
4. Para depurar y certificar que las imágenes cuentan con píxeles válidos y que es posible con estos realizar la estimación de la variable DS son empleadas las bandas de control de calidad del producto MOD09GA (*State\_1km\_1*, *QC\_500m\_1*) con las que se depuran las imágenes.
5. Son seleccionadas las dos imágenes con menores pérdidas lago. Y utilizando el método definido por Rudorff, Shimabukuro, & Ceballos (2007), se convierten los valores digitales de los píxeles de las imágenes a reflectancia.
6. Se extraen de estas los píxeles coincidentes con las estaciones de muestreo. Con los datos resultantes son creados los modelos de calibración y validación de la variable DS.
7. El modelo de estimación es extrapolado en las imágenes MODIS, coincidentes con los trabajos de campo.
8. Se generan los mapas que indican la distribución espacial de la variable DS.

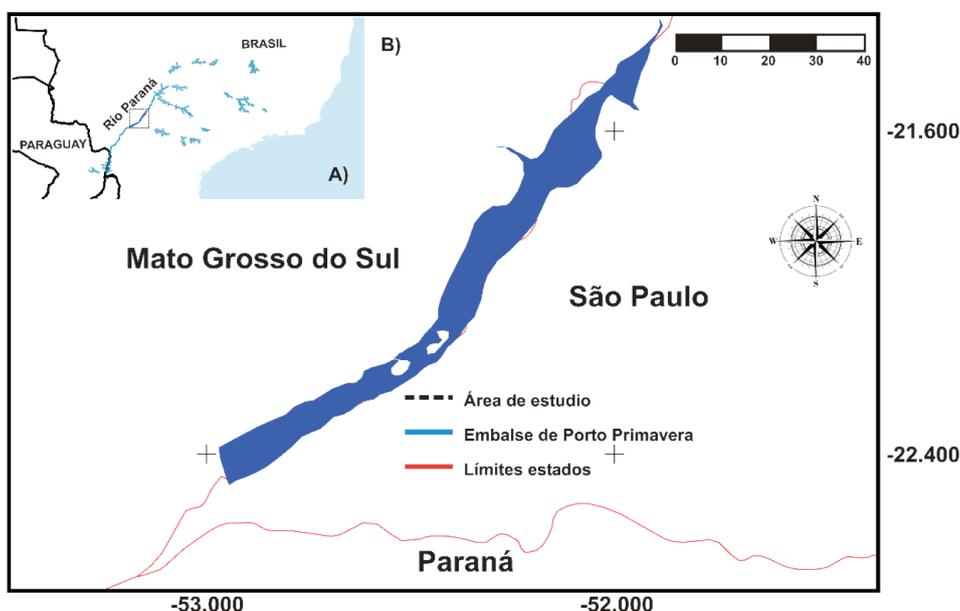


Figura 1. (A) Localización del lago de Porto Primavera, la figura muestra la cuenca hidrográfica del lugar de estudio. B) el lago resultante después de la última inundación (2003).

Fuente: El autor.

### 4. Resultados

#### 4.1. Modelo de calibración

Utilizando el grupo de datos recolectados entre el 6 al 10 de octubre de 2014, se crea el modelo de calibración. Este modelo es generado utilizando las mediciones realizadas en campo del DS y la reflectancia leída por el sensor MODIS en la banda centrada en los 645nm (“ecuación 1”):

$$DS(m) = -459,4 * (R1(645))^2 + 9,005*(R1(645)) + 2,45 \tag{1}$$

El modelo indica que se tiene un coeficiente de determinación adecuado para realizar la estimación del parámetro DS ( $R^2 = 0,8$ ;  $p\text{-value} < 0.001$ ) y que los errores asociados a las observaciones son bajos ( $RMSE = 0,47m$ ). Para esta etapa fue utilizado un conjunto de datos de 21 muestras ( $n = 21$ ). (Ver Figura 2).

#### 4.2. Modelo de validación

La comparación de las estimaciones entre lo medido y los valores previstos de la variable DS muestra que los valores para las zonas donde se presentan los mayores errores medios cuadráticos se localiza en las desembocaduras del Río Pardo y do Peixe (1,4m promedio). También se puede verificar que el algoritmo sobreestima las mediciones de DS en promedio en 0,6m los valores en las zonas donde se tiene mayor transparencia, y los subestima en 1m en las áreas próximas a las desembocaduras de los principales tributarios (Río Pardo, Río do Peixe).

Para poder generar el modelo de validación fueron eliminados valores atípicos usando la metodología de cuartiles definida por Whitley & Ball (2002). Teniendo para este análisis final un conjunto de datos de 21 observaciones ( $n = 21$ ). Como resultados del modelo de validación se tiene que el coeficiente de determinación fue menor hallado en el proceso de calibración ( $R^2 = 0,46$  y  $p\text{-value} < 0.001$ ), y el error asociado para las observaciones de este conjunto de datos también se incrementa (0,73m), sin embargo, según Knight & Voth (2012), el modelo y los errores encontrados para este estudio aún pueden ser considerados como adecuados para lograr estimar los valores del DS en las imágenes MODIS. (Ver Figura 3)

#### 4.3. Análisis de la dinámica espacial de la variable Disco de Secchi en el embalse de Porto Primavera

El análisis espacial de la variable DS indica que el área con menor transparencia se localiza en la margen sur matogrossense; lo anterior se debe a la misma conformación geológica de la región, las zonas localizadas en el área colindante con el estado de São Paulo tienen zonas más escarpadas que favorecen la erosión, y las áreas localizadas en el estado de Mato Grosso do Sul favorecen la deposición debido a que estas regiones son mucho más bajas y hacían parte de la llanura aluvial del Río Paraná. Las regiones que aparecen durante las dos campañas de muestreo con valores de DS menores a 1m son las ubicadas en la desembocadura del Río Pardo y su influencia sobre las zonas próximas puede ser mayor o menor según de la pluviosidad que se tenga en esta región. (Ver Figura 4 y 5)

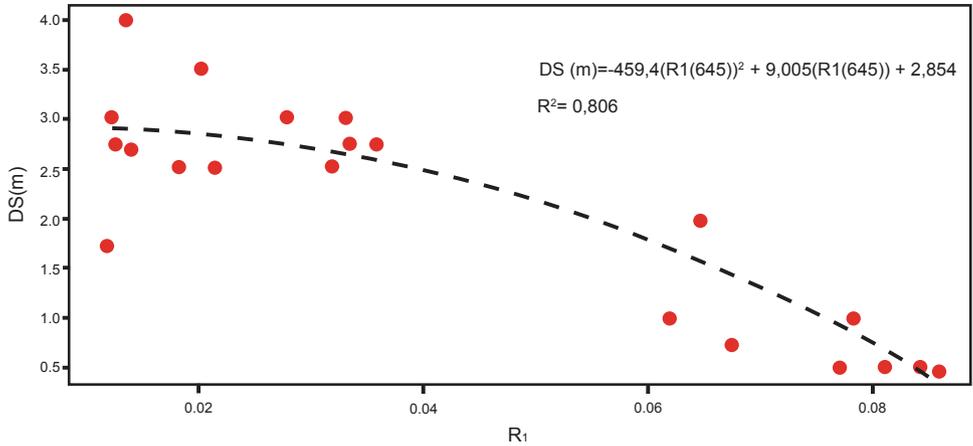


Figura 2. Relación entre la reflectancia de los píxeles extraídos de la imagen MODIS (coincidentes con las estaciones de muestreo) y la profundidad medida con el Disco de Secchi.

Fuente: El autor.

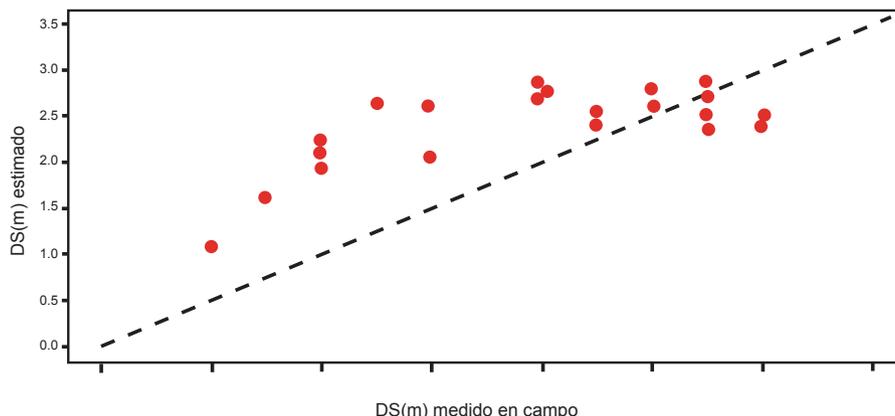


Figura 3. Comparación entre los datos estimados de DS a partir de los píxeles extraídos de la imagen MODIS y las mediciones *in situ* de la misma variable.

Fuente: El autor.

También se puede observar cómo, en la imagen tomada en el mes de abril de 2015 gran parte del lago presenta una profundidad medida con el DS menor a 1,5m. Lo anterior fue demostrado por Moncayo & Trindade Galo (2017) y Moncayo (2015), como un incremento en la producción primaria que se ve favorecida por una mayor penetración de la luz en la columna de agua y una temperatura mayor a los 20° en el otoño austral.

El estudio también permitió determinar que el lago cuenta con áreas homogéneas en donde las mediciones de DS pueden ser mayores a los 2m, estas áreas principalmente se localizan en la zona media del embalse y en la región próxima a la barrera.

### 5. Conclusiones

El estudio permitió demostrar que la banda centrada en los 645nm es útil para derivar los valores de DS y el coeficiente de determinación asociado con su modelo de calibración alcanzó el 0,8, la disminución significativa en este coeficiente y el incremento en el error asociado en el modelo de validación está asociada a dos factores principalmente: el primero asociado con las condiciones meteorológicas cambiantes que se tuvieron durante la campaña de campo del mes de abril de 2015 y la segunda que la contaminación por nubes y los errores propios del sensor MODIS no permitieron que se tenga una imagen coincidente con el trabajo de campo. La imagen con la que se hizo la validación del modelo fue adquirida el día 17 de abril, un día después de

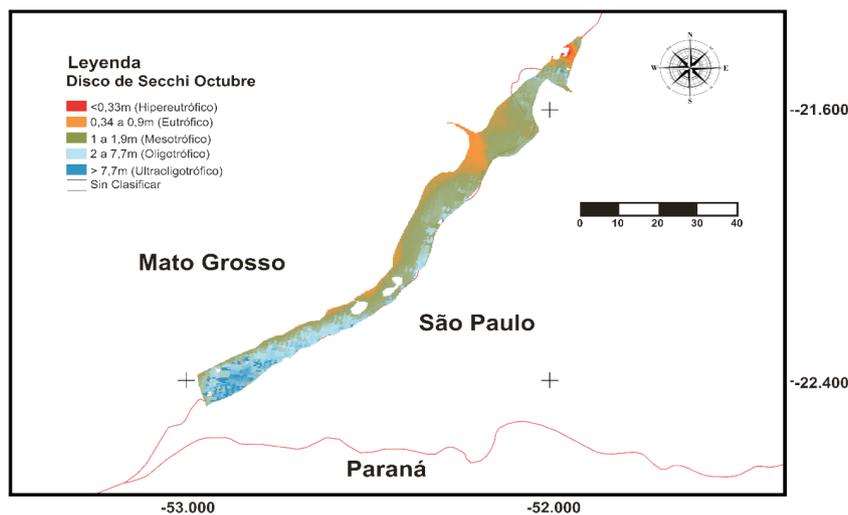


Figura 4. Distribución espacial de la variable DS (estimada en metros) en el lago de Porto Primavera, en la imagen MODIS tomada el 8 de octubre de 2014.

Fuente: El autor.

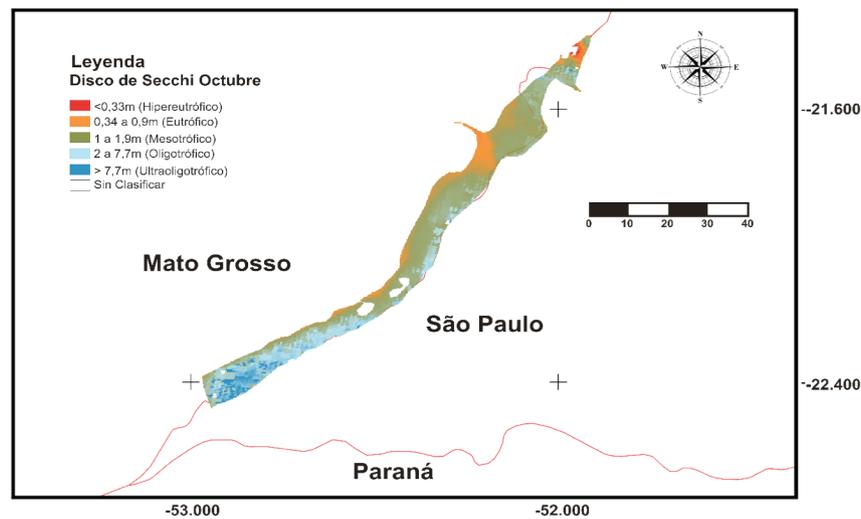


Figura 5. Distribución espacial de la variable DS (estimada en metros) en el lago de Porto Primavera, en la imagen MODIS tomada el 17 de abril de 2015.

Fuente: El autor.

terminar la campaña de muestreo.

El producto de reflectancia de superficie MOD09GA mostró su eficiencia para lograr clasificar las áreas del embalse con mayor y menor variabilidad, corroborando de esta forma los muestreos realizados *in situ*.

Finalmente, se demuestra que las técnicas de teledetección utilizadas para determinar las variaciones espaciales de la variable DS permitieron obtener información con la que fue posible crear una visión sinóptica sobre la dinámica regional que presenta esta variable, logrando realizar un análisis cuantitativo de las áreas con mayor y menor profundidad medidas con el DS.

### Agradecimientos

El autor agradece al programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas y al departamento de Cartografía de la UNESP – Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho, por haber patrocinado con recursos financieros, infraestructura e instrumentos que permitieron el desarrollo de este proyecto. Al proyecto MODIS por proporcionar el producto MOD09GA a la FEPAP por el apoyo financiero en los levantamientos de campo. El primer autor agradece a la UNESP y a la AIUP por la beca de Doctorado, a la IUCESMAG por brindar los medios necesarios para la correcta presentación de este documento y a la profesora Susana Herrera Martínez, por su colaboración en la redacción y puesta a punto del documento final.

### Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

### Referencias bibliográficas

- ALIKAS, K., & KRATZER, S. Improved retrieval of Secchi depth for optically-complex waters using remote sensing data. *In: Ecological Indicators*, 2017, vol. 77, p. 218-227.
- BOHNA, V., CARMONA, F., RIVAS, R., LAGOMARSINO, L., DIOVISALVIE, N., & ZAGARESEE, H. Development of an empirical model for chlorophyll-a and Secchi Disk Depth estimation for a Pampean shallow lake (Argentina). *In: The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2017, p. 1-9.
- CHIPMAN, J. Satellite remote sensing III: Regional-to global-scale systems. *In: J. CHIPMAN, L. OLMANSON, & A. GITELSON, Remote Sensing Methods for Lake management*. ed I. Minnesota. United States Environmental Protection Agency. 2009, p. 132.
- CHIPMAN, J., & SCHLOS, A. Future developments in remote sensing for lake management. *In: J. CHIPMAN, L. OLMANSON, & A. GITELSON, Remote Sensing Methods for Lake*. ed I. Minnesota. United States Environmental Protection Agency. 2009, p. 132.
- DIAS, J. A construção da paisagem na raia divisória São Paulo-Paraná-Mato Grosso do sul: Um estudo por teledeteção. Tese Doutorado em Geografia. Presidente Prudente, São Paulo, Universidade Estadual Paulista UNESP. Departamento de Geografia, 2003. 274p
- DÖRNHÖFER, K., & OPPELT, N. Remote sensing for lake research and monitoring – Recent advances. *In: Ecological Indicators*, Mayo, 2016, vol. 64, p. 105-122.
- FENG, L., HU, C., HAN, X., CHEN, X., & QI, L. Long-Term Distribution Patterns of Chlorophyll-a Concentration in China's Largest Freshwater Lake: MERIS Full-Resolution Observations with a Practical Approach. *In: remote sensing*, 2015, vol. 7, n. 1, p. 275-299.

8. FULLER, L., JODOIN, R., & MINNERICK, R. Predicting Lake Trophic State by Relating Secchi-Disk Transparency Measurements to Landsat-Satellite Imagery for Michigan Inland Lakes, 2003–05 and 2007–08. Michigan: U.S. Geological Survey, 2011.
9. GITELSON, A., STARK, R., ORON, G., DOR, I. Monitoring of Polluted Water Bodies by Remote Sensing. *In: Natural Resources*, vol. 242, p. 181-188.
10. GUO, K., ZOU, T., JIANG, D., TANG, C., & ZHANG, H. Variability of Yellow River turbid plume detected with satellite remote sensing during water-sediment regulation. *En: Continental Shelf Research*, Marzo, 2017, vol. 135, n. 1, p. 74-85.
11. HAACKA, B., & RYERSON, R. Improving remote sensing research and education in developing countries: Approaches and recommendations. *In: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, vol. 45, p. 77-83.
12. ISENSTEIN, E., & PARK, M. Assessment of nutrient distributions in Lake Champlain using satellite remote sensing. *In: Journal of Environmental Sciences*, Septiembre, 2014, vol. 26, n. 9, p. 1831-1836.
13. KNIGHT, J., & VOTH, M. Application of MODIS imagery for intra-annual water clarity assessment of Minnesota Lakes. *In: Journal of remote sensing of environment*, 2012, vol. 4, p. 2181-2198.
14. LEE, Z., SHANG, S., HU, C., DUD, K., WEIDEMANNE, A., HOUE, W., LIN, G. Secchi disk depth: A new theory and mechanistic model for underwater visibility. *In: Remote Sensing of Environment*, Noviembre de 2015, vol. 169, p. 139-149.
15. LUOA, J., LI, X., MAA, R., LI, F., QINA, B., & HUANG, W. Applying remote sensing techniques to monitoring seasonal and interannual changes of aquatic vegetation in Taihu Lake, China. *In: Ecological Indicators*, Enero 2016, vol. 60, p. 503-513.
16. MATTHEWS, M. V. A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters. *In: International Journal of Remote Sensing*, Agosto 2011, vol. 32, n. 21, p. 6855-6899.
17. McCULLOUGH, I., LOFTIN, C., & SADER, S. High-frequency remote monitoring of large lakes with MODIS 500 m imagery. *In: Journal of Remote sensing of environment*, Septiembre 2012, vol. 124, p. 234-241.
18. MONCAYO, R. Estudo do nível trófico do reservatório de porto primavera por meio de sensoriamento remoto e visualização de séries temporais. Presidente prudente, São Paulo, Universidade Estadual Paulista UNESP. Departamento de Cartografia. 2015, p. 153.
19. MONCAYO, R., & TRINDADE GALO, M. Evaluación espacio temporal del estado trófico de un lago de grandes dimensiones usando imágenes MODIS. *En: Revista de Ciencia e Ingeniería NEOGRANADINA*, 2017, vol. 25, n. 1, p. 27-42.
20. NOVO, E., BARBOSA, C., MELACK, J., DE FREITAS, R., & SHIMABUKURO, Y. Comparação de Imagens MODIS e ETM+ para Estudo de Águas Interiores: Imposições da Resolução Espacial. *Em: Revista Brasileira de Cartografia*, 2007, p. 109-118.
21. RUDORFF, B., SHIMABUKURO, Y., & CEBALLOS, J. O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil. Ed. I. São José dos Campos: INPE. 2007. 448p. ISBN 8560507000.
22. SOUZA FILHO, E., ZANETTI, K., PINESE, J., & FRANÇA, V. (2010). A hidroquímica do rio Paraná após a barragem de Porto Primavera. *En: Bol. geogr., Maringá*. 2010. v. 28, n. 2, p. 101-112.
23. TOTH, C., & JÓZKÓW, G. Remote sensing platforms and sensors: A survey. *In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Mayo 2016, vol. 115, p. 22-36.
24. TYLER, A., SVAB, E., PRESTON, T., PRÉSING, M., & KOVÁCS, W. Remote sensing of the water quality of shallow lakes: A mixture modelling approach to quantifying phytoplankton in water characterized by high-suspended sediment. *In: International Journal of Remote Sensing*, Febrero 2007, vol. 27, n. 8, p. 1521-1537.
25. WHITLEY, E., & BALL, J. Statistics review 1: Presenting and summarising data. *In: Critical Care*, Febrero 2002, vol. 6, n. 1, p. 66-71.
26. WU, G., DE LEEUW, J., SKIDMORE, A., PRINS, H., & LIU, Y. Comparison of MODIS and landsat TM5 images for mapping tempo-spatial dynamics of Secchi disk depths in Poyang Lake National Nature Reserve, China. *In: International Journal of Remote Sensing*, Marzo 2008, vol. 29, n. 8, p. 2183-2198.
27. ZHANG, Y., LIN, S., QIAN, X., WANG, Q., QIAN, Y., LIU, J., & GE, Y. Temporal and spatial variability of chlorophyll a concentration in Lake Taihu using MODIS time-series data. *In: Hydrobiologia*, Febrero 2011, vol. 661, n. 1, p. 235-250.
28. ZHU, L., WANG, S., ZHOU, Y., YAN, F., & ZHOU, W. Water Quality Monitoring in Taihu Lake Using MODIS Image Data. *In: IEEE Journal*, 2004, p. 2314-2317.