

Propiedades ópticas y térmicas del lago Titicaca a partir de imágenes Landsat-8 y MODIS

Juan Carlos Jiménez-Muñoz
María Llinares Llorens
Antonio Ruiz Verdú
Carolina Tenjo Gil
Jesús Delegido Gómez
José Antonio Sobrino Rodríguez
José Moreno Méndez

Laboratorio de Procesado de Imágenes (LPI). Universidad de Valencia
C/ Catedrático José Beltrán, 2. 46980 Paterna (Valencia, SPAIN)

Juancar.Jimenez@uv.es, mallillo@alumni.uv.es, antonio.ruiz@uv.es, nancy.tenjo@uv.es,
jesus.delegido@uv.es, Jose.Sobrino@uv.es, Jose.Moreno@uv.es

Abstract. The remote sensing of limnological key variables in lakes, has been prevented by the lack of satellite missions with the adequate combination of spatial, spectral and radiometric resolution. The recently launched Landsat-8 mission (LDCM, Landsat Data Continuity Mission) has the potential for studying small-scale surface processes in lakes, with an unprecedented accuracy, despite being a mission primarily designed for land applications.

In order to evaluate the capabilities of Landsat-8 for the study of the optical and thermal properties of inland waters, Lake Titicaca was chosen as a test site, taking into account its singularity (as a high altitude big tropical lake in a moderate process of eutrophication) and its relatively understudied limnology. Previously developed algorithms were used for retrieving Chlorophyll-a concentration ([Chl-a]) and Lake Surface Temperature (LST) in a cloud-free Landsat-8 image of the lake. Lacking simultaneous in situ data, [Chl-a] and LST maps, obtained from a MODIS image of the same date, were used for a cross-validation exercise. Landsat-8 retrievals were very similar to those of MODIS, and both were coherent with the in situ data obtained in previous studies, indicating the potential of Landsat-8 for inland water quality monitoring.

For a further validation of the results, a one-year long series of MODIS images were processed and the dynamics of [Chl-a] and LST was analyzed and compared with previous knowledge on the lake's spatial-temporal patterns. The combined use of Landsat-8 and MODIS images could help to disentangle the poorly understood lake hydrodynamics and phytoplankton distribution.

Keywords: Lake Titicaca, Chlorophyll-a, Lake Surface Temperature, Landsat 8, MODIS

1. Introducción

El estudio de sistemas lacustres mediante teledetección espacial, ha estado limitado hasta ahora por la inexistencia de sensores que combinaran la resolución espacial, radiométrica y espectral necesaria para la detección de los componentes ópticamente activos de las masas de agua. El reciente lanzamiento de Landsat-8, abre nuevas posibilidades en este campo, al contar con una resolución radiométrica muy superior a los anteriores satélites de la serie Landsat, así como nuevas bandas específicas para el estudio del agua y de la atmósfera.

Con el objeto de explotar las capacidades de Landsat-8 en estudios limnológicos, se decidió probar algoritmos recientemente desarrollados para la estimación de la concentración de Clorofila-a (Tenjo et al., 2014) y de temperatura superficial (Jiménez-Muñoz et al., 2014) en un lago tropical singular, como es el Lago Titicaca. Este gran lago altoandino se escogió por su interés intrínseco y porque permitía comparar los resultados de los algoritmos de Landsat-8 con los de MODIS, que es un sensor principalmente diseñado para aplicaciones oceanográficas (o terrestres con un enfoque global) y cuyos algoritmos han sido profusamente validados.

Las dos variables escogidas (concentración de clorofila-a y temperatura superficial) son de gran importancia en el seguimiento de la calidad de las aguas continentales. La clorofila-a, por ser un indicador de la biomasa del fitoplancton y por tanto del grado de eutrofización de los lagos. Y la temperatura superficial, porque permite detectar patrones espaciales que explican gran parte de la hidrodinámica de sistemas lacustres, así como detectar tendencias asociadas a posibles cambios climáticos.

La eutrofización, o proceso de enriquecimiento de nutrientes (nitrógeno, fósforo y otros) que altera el equilibrio ecológico de una masa de agua, es acelerada notablemente por la actividad humana (vertidos de origen urbano, agrícola o industrial), así como por los posibles incrementos de la temperatura. Su seguimiento, mediante el uso combinado de teledetección de alta y baja resolución espacial, es, por ello, especialmente relevante, y el motivo final que inspira el presente trabajo.

2. Métodos

2.1. El lago Titicaca

El lago Titicaca (Figura 1) está localizado en la meseta del Collado, en los Andes Centrales. Se encuentra entre los territorios de Bolivia y Perú y abarca una superficie de 8562 km², con 15° 47' de latitud sur y 69° 22' de longitud oeste. Su profundidad máxima se estima en 283 m y su profundidad media sobre los 107 m. Está formado por dos cuerpos de agua separados por el estrecho de Tiquina. El más grande, lago Mayor, está situado al norte con una superficie de 6450 km² y es el más profundo. El pequeño, lago Menor, está situado al sur con una superficie de 2.112 km² y una profundidad máxima de 45 m. Es el lago navegable más alto del mundo (altitud de 3812 m) y ocupa el lugar 19° del mundo por superficie (Bonansea et al., 2012).

Es un lago tropical monomíctico (con un período de mezcla y otro estratificado), con la peculiaridad de su elevada altitud. Su período de estratificación se produce durante la temporada lluviosa y relativamente cálida (noviembre-abril). En este período el lago está más turbio, debido a los aportes de sólidos en suspensión procedentes de la erosión de la cuenca. Sin embargo en el período seco y más frío encontramos su período de mezcla (mayo-octubre), esto implica la desaparición del gradiente vertical de temperatura, quedando toda la columna de agua con una temperatura muy uniforme (Revollo et al., 2005).



Figura 1. Localización del lago Titica entre Bolivia y Perú. La imagen de la derecha muestra una composición RGB a partir de la imagen Landsat-8 utilizada en este estudio.

2.2. Imágenes de satélite: Landsat-8 y MODIS

Para el estudio del lago se han utilizado imágenes Landsat-8 (de 30m de resolución espacial en las bandas ópticas) y MODIS (entre 1 y 5 km de resolución espacial dependiendo del producto).

El satélite Landsat-8 (en órbita desde febrero de 2013) garantiza la continuidad de los datos de la serie Landsat, con cerca de 40 años de operación. Landsat-8 incluye dos sensores, OLI y TIRS. El sensor OLI cuenta con ocho bandas situadas en el visible y el infrarrojo cercano (VNIR), con una resolución espacial de 30 m. Y, además, con una banda pancromática, con una resolución de 15 m. El sensor TIRS cuenta con dos bandas con una resolución espacial de 100 m situadas entre los 10.60-12.51 μm . El periodo de revisita es de 16 días, obteniendo imágenes con un tamaño aproximado de 170x183 km. Las imágenes se han descargado de la aplicación Earth Explorer del USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), ya geo-referenciadas. Las imágenes en cuentas digitales se han convertido a reflectividades TOA utilizando los correspondientes coeficientes radiométricos, y se ha obtenido la reflectividad de la superficie del lago a partir de una corrección sencilla basada en el método del punto oscuro (Chávez, 1988, 1996).

Por lo que respecta a las imágenes MODIS, se ha trabajado directamente con los productos de reflectividad (MOD09) y temperatura (MOD11) de la superficie. Para la intercomparación con la imagen Landsat-8, se han utilizado los productos instantáneos a 1 km de resolución espacial, mientras que para el análisis de la serie temporal se han utilizado los productos climáticos a una resolución de 5 km.

En el caso de Landsat-8 se ha seleccionado una imagen libre de nubes del 16 de agosto de 2013, representativa del periodo invernal. Mientras que para MODIS, se han obtenido todas las imágenes disponibles del año 2013, incluyendo una imagen obtenida la misma fecha y 4 horas después que la imagen Landsat. En la serie de imágenes MODIS, se han eliminado del análisis los píxeles con reflectividades en la banda 12 superiores a 0.15, que se considera un valor muy poco probable en un sistema lacustre como el lago Titicaca. De esta forma quedan excluidos los píxeles correspondientes a nubes o a *sun glint*.

2.3. Algoritmos para la estimación de las propiedades ópticas y térmicas

Existen numerosos algoritmos para estimar propiedades ópticas de las masas de agua y variables biofísicas, como la concentración de clorofila-a ([Chl-a]), propuestos para sensores diseñados para aplicaciones oceanográficas (como SeaWifs, MODIS o MERIS). En el caso de la serie Landsat, aunque sus imágenes se han utilizado para la estimación de estas variables mediante modelos empíricos, su limitada resolución radiométrica y espectral ha impedido su uso más frecuente en aguas continentales y costeras. Sin embargo, la mayor resolución radiométrica (mayor relación señal / ruido) y espectral (nuevas bandas) de Landsat-8, abre nuevas posibilidades para estudios de calidad del agua (Pahlevan et al., 2014), que precisan la adaptación de algoritmos existentes o la creación de métodos nuevos.

En este trabajo se han utilizado los algoritmos propuestos por Tenjo et al. (2014), basados en el modelo de transferencia radiativa para agua HydroLight y validados con una extensa base de datos de espectros de reflectividad de agua junto a medidas de concentración de clorofila-a [Chl-a] in situ en diferentes lagos y embalses de la Península Ibérica. Para la estimación de [Chl-a] se propone el siguiente algoritmo (Tenjo et al., 2014):

$$[\text{Chl} - \text{a}] = 4.46 \left(\frac{R_{560}}{R_{440}} \right) - 0.55 \quad (1)$$

donde [Chl-a] se da en $\mu\text{g/L}$ y R_λ es la reflectividad en la banda de longitud de onda λ (en nm).

En el caso de MODIS, la [Chl-a] se ha calculado utilizando el algoritmo empírico OC3-M (*Ocean Chlorophyll three-band algorithm for MODIS*), que es una adaptación del

desarrollado para SeaWiFs (O'Reilly et al., 2000) y está basado en el cociente entre una banda verde (en la que la absorción de la clorofila-a es mínima) y una banda azul (en la región espectral de máxima absorción de la clorofila-a).

La concentración de clorofila-a se calcula mediante el siguiente polinomio:

$$\log[\text{Chl} - a] = a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3X^3 + a_4X^4 \quad (2)$$

Dónde:

$$X = \log \left[\frac{\max(R_{rs(443)}, R_{rs(489)})}{R_{rs(555)}} \right] \quad (3)$$

Y los coeficientes a_0 , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 utilizados, han sido, respectivamente 0.2500; 2.4752; 1.4061; 2.8233 y 0.5405.

Para la estimación de la temperatura de la superficie del lago a partir de datos Landsat-8 se ha utilizado el algoritmo monocanal desarrollado por Jiménez-Muñoz et al. (2014) aplicado a la banda 10 del sensor TIRS

$$T_s = \gamma \left[\frac{1}{\varepsilon} (\Psi_1 L_{sen} + \Psi_2) + \Psi_3 \right] + \delta \quad (4)$$

donde γ y δ son dos parámetros que dependen de la propia radiancia medida por el sensor, y las funciones atmosféricas Ψ_1 , Ψ_2 , Ψ_3 se pueden calcular a partir del contenido en vapor de agua de la atmósfera.

Para la temperatura de la superficie del lago con MODIS se ha utilizado directamente el producto MOD11.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis del contenido en clorofila-a

En la Figura 2a se muestra el mapa de [Chl-a] obtenido tras aplicar la ecuación 1 a la imagen Landsat-8 del 16 de Agosto de 2013. Podemos observar que hay mayor [Chl-a] cerca de las orillas del lago, lo cual concuerda con lo descrito en Blanco (2011). En la zona litoral es frecuente que las concentraciones de clorofila sean algo más elevadas debido a los aportes de nutrientes que llegan por los tributarios del lago. No obstante, hay que tener en cuenta que también podría haber resuspensión de sedimentos del fondo, que producirían una sobreestimación de la [Chl-a]. En la zona pelágica del lago, la [Chl-a] es menor, aunque no es uniforme, observándose un patrón que responde a las corrientes superficiales. En cuanto al Lago Pequeño, de menor profundidad, la [Chl-a] es más elevada, tal y como se ha puesto de manifiesto en trabajos previos (Blanco, 2011).

Con el objetivo de validar el método propuesto para el nuevo Landsat-8, se ha hecho el cálculo de la [Chl-a] con una imagen MODIS de la misma fecha, aplicando el algoritmo OC3-M que utiliza la NASA en los productos MODIS, ya que este producto ha sido validado con un elevado número de datos medidos in situ (O'Reilly et al., 2000). El resultado se muestra en la Figura 3b. En la Tabla 1 se muestra el valor promedio de [Chl-a] en ambos lagos obtenidos en las dos imágenes, junto a la desviación estándar. Los valores obtenidos por MODIS son inferiores a los obtenidos por Landsat-8 (aproximadamente en de 1 $\mu\text{g/L}$), aunque los patrones de distribución espacial son muy semejantes y los valores obtenidos están dentro de los rangos esperados, según el trabajo de otros autores (Blanco, 2011) (Lazzaro y Point, 2011).

3.2. Análisis de la temperatura superficial del lago

La Figura 3 muestra los mapas de temperatura obtenidos con la imagen Landsat-8 y con la imagen MODIS, ambas del 16 de agosto de 2013, aunque adquiridas a horas distintas. La

imagen Landsat fue adquirida a las 9:43, hora local, mientras que la imagen MODIS corresponde a las 13:35 hora local.

Las diferencias en las temperaturas observadas en ambas imágenes se corresponden razonablemente bien con el patrón esperado en agosto. En este mes invernal, el lago está en periodo de mezcla, aunque se observa una ligera estratificación en la zona más superficial de la columna de agua, causada por la elevada insolación, que calienta las capas más superficiales durante el día (Dejoux et al., 1991).

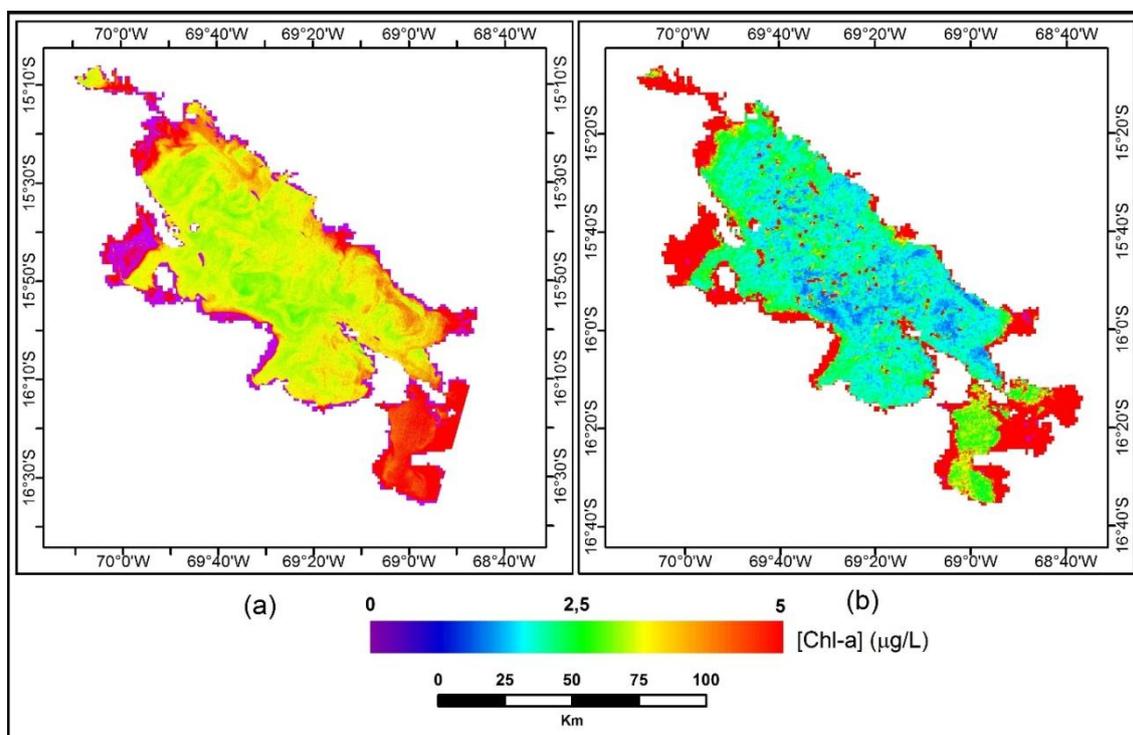


Figura 2. Mapa de clorofila obtenido a partir de la imagen Landsat-8 (a) y de MODIS (b) del 16-Agosto-2013.

Tabla 1. Concentración media y desviación estándar de clorofila-a ($\mu\text{g/L}$) obtenido de las imágenes Landsat-8 y MODIS del 16/08/2013 (Figura 1)

	Landsat-8	MODIS
Lago Grande	$3,80 \pm 0,24$	$2,48 \pm 0,36$
Lago Pequeño	$4,80 \pm 0,18$	$3,55 \pm 0,44$

En la imagen Landsat-8, adquirida por la mañana, el Lago Pequeño está todavía más frío que el Lago Grande, probablemente como consecuencia de su menor inercia térmica y el enfriamiento nocturno. Sin embargo, en la imagen MODIS, adquirida unas horas más tarde, las temperaturas de ambos lagos se igualan y se observa como en las zonas más someras se produce un calentamiento notable (de unos $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ con respecto a la zona pelágica). Ese calentamiento se observa también en una franja de menor profundidad en la zona noreste del Lago Grande.

En la zona de mayor profundidad, la temperatura superficial es más estable y oscila entre 11 y 13°C , valores muy semejantes a los reportados en trabajos previos (Dejoux et al, 1991). En un trabajo más reciente (Blanco, 2011), se midió la temperatura del agua durante un ciclo anual completo, en una estación situada en la Isla de los Uros (Bahía de Puno, Perú, ver figura

3). Tal y como se muestra en la figura 3, en fechas semejantes en el año 2011 (mediados de agosto), la temperatura del agua en dicha estación oscilaba entre 13 y 14 °C, que es un rango de variación similar al que se observa en las imágenes del 16 de agosto de 2013 en esa zona.

Aunque no se puede considerar como una validación, que requeriría de medidas *in situ* simultáneas a la adquisición de las imágenes, la semejanza entre los valores obtenidos y los datos experimentales de fechas semejantes apunta a la fiabilidad de Landsat-8 y MODIS para este tipo de estudios.

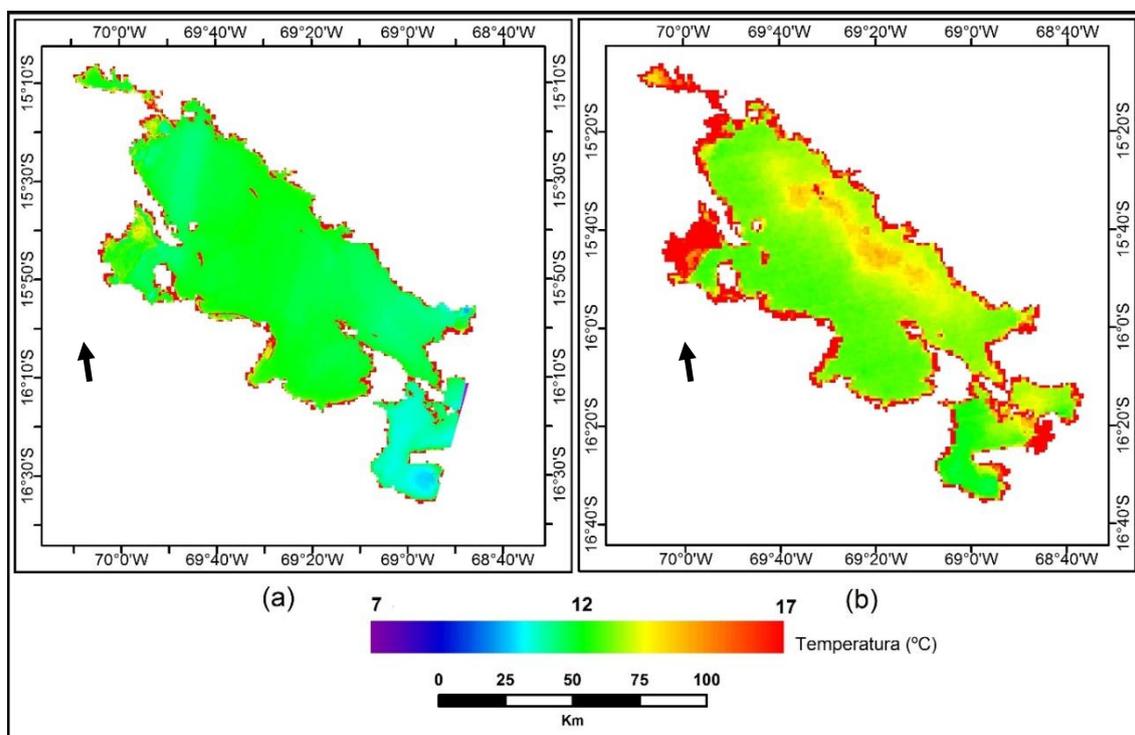


Figura 3. Mapas de temperatura superficial del lago. (a) A partir de la imagen Landsat-8/TIRS (resolución remuestreada a 30-m, 14:43 UTC) y (b) MODIS (1-km de resolución, 18:35 UTC). La flecha indica el emplazamiento de la estación de medida de la isla de los Uros (ver figura 4).

A partir de los histogramas de las imágenes de temperatura, se han obtenido los valores promedio que se muestran en la tabla 2. Las diferencias de temperatura entre las dos imágenes son explicables por el calentamiento diurno de la capa superficial (las temperaturas mínima y máxima del aire en esta época del año oscilan entre 0 °C y 15 °C, respectivamente).

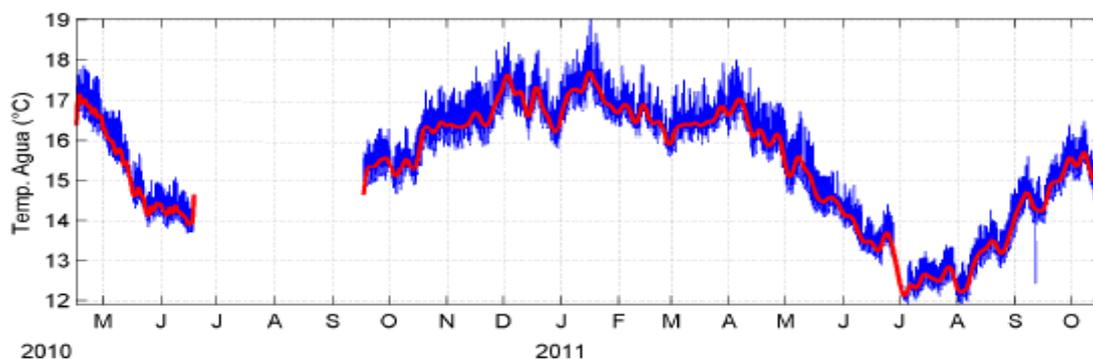


Figura 4. Evolución de la temperatura del agua en la Isla de los Uros (bahía de Puno, Lago Grande). Extraída de Blanco (2011).

Tabla 2. Temperatura superficial media y desviación estándar (°C) obtenidas de las imágenes Landsat-8 y MODIS del 16/08/2013 (Figura 2)

	Landsat-8 (9:43 local)	MODIS (13:35 local)
Lago Grande	12,4 ± 0,3	14,03 ± 0,58
Lago Pequeño	11,0 ± 0,2	12,89 ± 0,43

3.3. Análisis temporal de la temperatura superficial y del [Chl-a] del lago

Con el objetivo de analizar la variación temporal de las variables estudiadas, se han descargado todas las imágenes MODIS a lo largo del año 2013 y se han aplicado los algoritmos para la obtención de la [Chl-a] y de la temperatura superficial. En la figura 5 se resume la evolución de ambas variables en las dos regiones en las que se subdivide el Lago Titicaca.

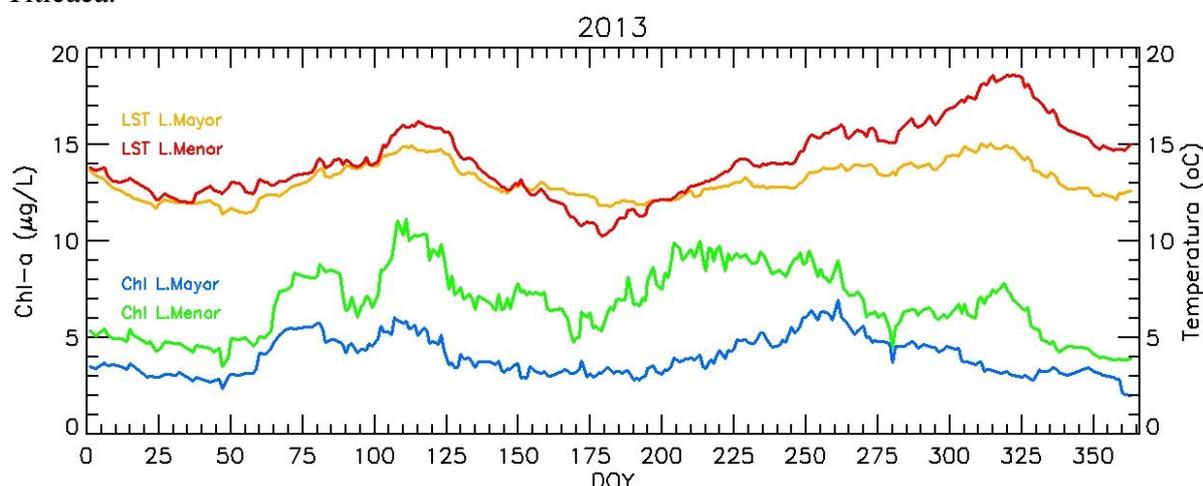


Figura 5. Evolución de la temperatura superficial (LST) y de [Chl-a] del lago Titicaca (media móvil de 15 días), a partir de datos diarios MODIS del año 2013, en función del día del año (DOY). Los valores corresponden a promedios del Lago Mayor y del Lago Menor.

En la Figura 5 se observa que la temperatura superficial del lago sigue un patrón similar al que se muestra en los datos *in situ* de la Isla de los Uros, con mínimos invernales en torno al mes de junio y ascenso paulatino hasta un máximo en octubre-noviembre. Se observan algunas discrepancias entre ambas gráficas, aunque no hay que olvidar que los datos *in situ* corresponden a un punto litoral, poco representativo de la zona pelágica, mientras que los datos de MODIS son el promedio de una región (ROI) que abarca todo el lago, excluyendo precisamente las zonas litorales para evitar píxeles de borde (en los que la señal corresponde a una mezcla tierra-agua).

En cuanto a la [Chl-a] se observa también un patrón bimodal, con dos máximos poco marcados en el Lago Grande en abril y septiembre. Aunque en la Figura 5 no se observa, al ser datos promediados espacial y temporalmente, cuando se analiza la serie de imágenes en detalle, se encuentran episodios en los que la [Chl-a] alcanza valores de 15 a 20 µg/L en la zona de desembocadura de los ríos Ramis y Huancane. Estos episodios se observan especialmente en imágenes de abril, y parecen estar relacionados con el aporte de sedimentos de estos ríos en la época de lluvias.

En el Lago Pequeño, las concentraciones son más elevadas durante todo el año y no se observa un patrón temporal tan definido. Estos valores más elevados se han observado en estudios anteriores, y se corresponden con un subsistema de menor profundidad en el que hay

un mayor aporte de nutrientes procedentes en su mayoría de vertidos urbanos del municipio de El Alto (900.000 habitantes), en el área metropolitana de La Paz (Bolivia).

4. Conclusiones

El uso combinado de imágenes MODIS y Landsat-8, presenta un gran potencial para el seguimiento de algunas variables limnológicas clave, en sistemas lacustres de moderado o gran tamaño. El estudio realizado con MODIS ha permitido analizar la variación anual de la temperatura y la concentración de clorofila-a en el Lago Titicaca, un lago singular por su tamaño y elevada altitud, sometido a una presión creciente por las actividades humanas en su cuenca.

Por otra parte, la información aportada por Landsat-8, a una resolución espacial de 30 m, puede servir para complementar los datos de MODIS, detectando patrones de variación espacial y fenómenos que ocurren a escalas locales, de gran interés en la gestión de la calidad del agua. La aplicación, retrospectiva y prospectiva, de estas técnicas de teledetección, puede servir para detectar y analizar tendencias a más largo plazo, asociadas a cambios climáticos o a presiones antropogénicas.

Los resultados obtenidos por Landsat-8 son muy prometedores e indicativos del gran potencial de este satélite para estudios limnológicos, ya que extienden el ámbito de estudio a un elevadísimo número de lagos de pequeño tamaño en todo el planeta. Aunque no se disponía de datos de validación simultáneos, la validación cruzada realizada con MODIS y la semejanza de los valores obtenidos con los reportados en trabajos previos, parecen indicar que los algoritmos propuestos para Landsat-8 dan resultados realistas y dentro del rango esperado en comparación con otros estudios, al menos en el Lago Titicaca.

5. Referencias

- Blanco, J. L. Desafíos para el modelamiento de la capacidad de carga. Simposio internacional "El estado del lago Titicaca. Desafíos para una Gestión basada en el Ecosistema". Puno- Perú. 2011.
- Bonansea, M., Ledesma, C., Rodríguez, C., Sánchez Delgado, A.R. Concentración de clorofila-a y límite de zona fótica en el embalse Río Tercero (Argentina) usando imágenes del satélite CBERS-2B. *Revista Ambiente & Agua. An interdisciplinary Journal of Applied Science*, v.7, n. 3, 2012.
- Chavez, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment* 24:459-479. 1988.
- Chavez, P. S. Image-based atmospheric corrections. Revisited and improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62.9, 1025-1036. 1996.
- Dejoux, C. and Itlis, A. (Eds.) *El lago Titicaca. Síntesis del conocimiento limnológico actual*. ORSTOM HISBOL. 1991
- Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Skoković, D., Mattar, C., Cristóbal, J. Land Surface Temperature Retrieval Methods from Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data. *IEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, VOL. 11, Nº 10, October 2014.
- Lazzaro, X., Point, D. Evolución del estado limnológico del lago Titicaca. Simposio internacional "El estado del lago Titicaca. Desafíos para una Gestión basada en el Ecosistema". Puno- Perú. 2011.
- O'Reilly, J.E., S.Maritorena, D.Siegel, M.O'Brien, D.Toole, B.Greg Mitchell, M.Kahru, F.Chavez, P.Strutton, G.Cota, S.Hooker, C.McClain, K.Carder, F.Muller-Karger, L.Harding, A.Magnuson, D.Phinney, G.Moore, J.Aiken, K.Arrigo, R.Letelier and M.Culver. Ocean color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. In: O'Reilly, J.E., and 24 Coauthors, 2000: SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3. NASA Tech. Memo. 2000-206892, Vol. 11, S.B. Hooker and E.R. Firestone, Eds., NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 9-23. 2000.
- Pahlevan, N., Lee, Z., Wei, J., Schaaf, C., Schott, J., & Berk, A. On-orbit characterization of OLI (Landsat-8) for applications in aquatic remote sensing. *Remote Sensing of Environment*. 154, 272-284. 2014
- Revollo, M. F., Cruz, M. L.; Rivero, A. L. Lake Titicaca. Experience and Lessons Learned Brief, 377-387. 2005. http://iwlearn.net/iw-projects/1665/experience-notes-and-lessons-learned/laketiticaca_2005.pdf/view
- Tenjo, C., Ruiz-Verdú, A., Delegido, J., Peña, R., Moreno, J. Determinación de componentes ópticamente activos en aguas continentales a partir de imágenes Landsat 8. Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universidad de Valencia.