



Análisis de la clorofila-a en el agua con técnicas de teledetección en lago Titicaca (Lago Menor)

Analysis of chlorophyll-a in water with remote sensing techniques in Lake Titicaca (Lago Menor)

Daniel Callisaya Machaca

RESUMEN: El presente trabajo de investigación se desarrolló en el lago menor del Titicaca del lado Boliviano, donde sufre severos deterioros de calidad de sus aguas por ser el principal receptor de las descargas no tratadas procedentes de la agricultura (pesticidas, fertilizantes artificiales) y de ganadería, así como el origen doméstico, industriales y mineras, la consecuencia del crecimiento poblacional de los municipios de alrededor, por estas razones se presentó el Bloom¹ en el año 2015. Mediante la teledetección con sensor OLI a bordo del satélite Landsat-8, mediante firmas espectrales de la imagen y datos espectrales de campo, para medir las concentraciones de clorofila fitoplanctónica *in situ* en las columnas de agua es utilizada la sonda FLUOROPREBE BBE², las medidas de concentración de fitoplancton son tomadas el mismo día de paso de sensor OLI por la escena de estudio. Se localizaron los puntos con previo reconocimiento de área de estudio donde existe mayor y menor impacto ambiental del norte del lago menor del Titicaca. Se realizó la clasificación de concentraciones de clorofila-a en la imagen satelital mediante firmas espectrales y para el análisis de calidad de aguas se recurrió a escala de valores propuesto por Carlson 1977, la utiliza la biomasa de algas como base para clasificar el estado trófico de los cuerpos de agua, las cuales indican el estado Mesotrófico con respecto a las concentraciones de clorofila-a y Mesotrófico con respecto a las concentraciones de fósforo total excepto en el punto LM-04 que se muestra Eutrófico.

PALABRAS CLAVE: Clorofila-a, firma espectral, lago menor del Titicaca, Landsat-8, teledetección.

ABSTRACT: The present research work was carried out in the Titicaca lake on the Bolivian side, where it suffers severe deterioration of water quality due to being the main recipient of untreated discharges from agriculture (pesticides, artificial fertilizers) and livestock, as well as the domestic, industrial and mining origins, the consequence of the population growth of the surrounding municipalities, for these reasons the Bloom was presented in 2015. By remote sensing with OLI sensor on board the Landsat-8 satellite, by means of spectral signatures of the image and field spectral data, to measure the chlorophyll phytoplankton concentration *in situ* in the water columns, the FLUOROPREBE BBE probe is used, the phytoplankton concentration measurements are taken on the same day as the OLI sensor passes through the scene of the study. The points with prior recognition of the study area where there is greater and lesser environmental impact of the north of the smaller lake of Titicaca were located. Classification of chlorophyll-a concentrations in the satellite image was carried out by spectral signatures and for the water quality analysis we used the scale of values proposed by Carlson 1977, using the biomass of algae as a basis to classify the trophic status of the bodies of water, which indicate the Mesotrophic state with respect to the concentrations of chlorophyll-a and Mesotrophic with respect to the concentrations of total phosphorus except at the point LM-04 shown Eutrophic.

KEY WORDS: Chlorophyll-a, spectral signature, Lake Titicaca minor, Landsat-8, remote sensing.

AUTOR: Daniel Callisaya Machaca: Carrera Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía. Universidad Mayor de San Andrés. de3dan@gmail.com

Recibido: 1/11/2018. Aprobado: 30/11/2018.



INTRODUCCIÓN

La calidad de las aguas continentales se basa en el contenido de partículas suspendidas y estas son las que modifican las propiedades ópticas de cuerpos de agua. Las moléculas del agua absorben intensamente la radiación infrarroja y la posibilidad de reflejar en la

visible es dependiendo sustancias presentes en el agua. (Ruiz-Verdú *et al.* 2009)

El Lago Titicaca en su totalidad nunca ha sido objeto de ninguna vigilancia ambiental continua a largo plazo para predecir su evolución y predecir o al menos prever los eventos extremos indeseables, tales como los blooms (floraciones algales), la muerte de

¹ Bloom: floraciones algales o proliferación de microalgas.

² <https://www.bbe-moldaenke.de/en/products/chlorophyll/details/fluoroprobe.html>

Área de estudio

El Lago Titicaca es el lago navegable más alto del mundo, se encuentra a una altitud media de 3812 m.s.n.m. (Justiniano y Carrasco, 2001)

El Lago Menor también es llamado Huiñaimarca donde se realizó la presente investigación ubicado en sector Boliviano, comprendida entre las coordenadas Longitud: 69°1'47.56"O, Latitud: 16°9'28.68"S y Longitud: 68°33'19.88"O, Latitud: 16°36'18.96"S.

La cuenca lacustre del Titicaca situada en la región del Sud-Oeste de Bolivia, con una superficie aproximada de 154,176 km² representando el 14% del territorio nacional que comprende a los departamentos de La Paz, Oruro y Potosí.

La cuenca está conformada por las siguientes Subcuencas: Titicaca, Desaguadero, Poopó; Salares de Coipasa y Uyuni. El Lago Titicaca tiene la característica de estar conformada por una hoya mayor denominada “Lago Mayor o Chucuito”, y otra hoya menor llamada “Lago Menor o Wiñay Marca”, ambas unidas a través del umbral geológico que recibe el nombre de “Estrecho de Tiquina”, El principal afluente que actúa como transportador de importantes fuentes de contaminación, lo constituye el río Catari para el Lago Menor, el cual desde sus nacientes pasa por las ciudades del El Alto y Viacha del departamento de La Paz. Las cargas contaminantes de este afluente llegan a desembocar en la Bahía de Cohana del Lago Titicaca afectando a su ecosistema.

Lazzaro (2016), indica la falta de plantas de tratamiento de las aguas residuales, tanto en Bolivia como en Perú, hace incontrolable los aportes difusos y puntuales de nutrientes, materia orgánica y contaminantes provenientes de las descargas no tratadas procedentes de la agricultura (pesticidas, fertilizantes artificiales) y de ganadería, así como de orígenes domésticos, industriales y mineras, como consecuencia del crecimiento demográfico de las

poblaciones ribereñas y de los centros urbanos no planificados.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología consta de los siguientes pasos: procesado de imágenes satelitales, por un lado muestras de agua recogidas y llevadas al laboratorio para fósforo total, y por otro lado trabajos de mediciones in situ en campo.

Las imágenes de Landsat-8 OLI son descargadas en forma gratuita del servidor de USGS³, correspondientes al Path 001 Row 071. Para detectar la clorofila fitoplanctónica mediante firmas espectrales en los cuerpos de agua, se utilizó cuatro bandas del satélite en las regiones del visible e infrarroja cercana cuyos datos en valores de reflectancia son comparados con datos de firmas espectrales tomadas con el espectroradiómetro de campo mediante el método de Spectral Angle Mapper de ENVI. Los puntos de muestreo se observan en la tabla 1.

Tabla 1. Puntos de muestreo en el lago menor del Titicaca.

Puntos de muestreo	Coordenadas UTM	
	X	Y
LM-01	535779	8197402
LM-02	536510	8197408
LM-03	537341	8197224
LM-04	538553	8196595
LM-05	539841	8197329
LM-06	540338	8197697
LM-07	541607	8200264
LM-08	541976	8200797
LM-09	542280	8205458

Corrección atmosférica

Para la corrección atmosférica, es realizada con el FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) de ENVI 5.3 para entrar a FLAASH es necesario calibrar

³ USGS: Servicio Geológico de los Estados Unidos.

radiométricamente los números digitales ND del sensor OLI.

Kruse (2018), indica que para ello se requiere convertir los ND⁴ de cada banda a valores de radiancia (L) ($Wm^{-2} sr^{-1}\mu m^{-1}$), la radiancia que se transforma a valores de reflectividad en el techo de la atmosfera (TOA) y se obtiene mediante FLAASH la conversión a valores de reflectancia ρ ($\mu W cm^{-2}sr^{-1}nm^{-1}$).

Calibración de escales de valores

Para corregir y tener los valores de reflectancia similares a los valores q utilizan en las librerías de la USGS, es decir, en un rango de 0 a 1, se ha de utilizar la siguiente fórmula empleada para la corrección de escala. (OSINFOR, 2014)

Análisis de firmas espectrales

De los 9 puntos de muestreo, en cada punto se colectaron 5 firmas espectrales⁵ haciéndose un total de 45 firmas espectrales obtenidas. Se realizó un análisis comparativo de grafico de firmas, se tomó en cuenta los valores de reflectividad de las 45 firmas espectrales totales. Se identificaron la similitud en cada 3 de los 9 puntos de muestreo:

- LM-01, LM-04 y LM-06
- LM-07, LM-08 y LM-09
- LM-02, LM-03 y LM-05

Las firmas de cada 3 puntos de muestreo, es decir, las 15 firmas espectrales, en la expresión matemática de ENVI, es promediado, que no es más que la suma de todas las firmas de las muestras divididas entre el número de estas, al obtener una firma promedio por cada 3 puntos de muestreo, es asignada con el denominativo de “clase”, donde en la presente investigación se obtuvo la clasificación de cuerpos de agua con tres clases.

Ruidos en firmas espectrales

Para realizar la remoción de ruido en las firmas espectrales fue necesario convertir del formato ASD (Dispositivos Espectrales Analíticos), que es el formato propio del espectroradiómetro y convertirla a ASCII (American standard code for information inter change). Las firmas espectrales del espectroradiómetro tienen un rango espectral desde 325 a 1075 nm.

De las firmas espectrales tomadas en campo, presenta ruidos espectrales⁶ en las siguientes longitudes de onda (325 a 380 nm y 931 a 1075 nm), las cuales corresponden a las regiones de ultravioleta e infrarrojo cercana, estos espectros son removidas debido a no tener información necesaria. Los espectros libres de ruidos son de 381-930 nm y las utilizadas en la presente investigación son de 430 a 930 nm, las cuales corresponden a las regiones de visible e infrarroja cercana; aptas para el estudio de clorofila, las cuales son mis firmas espectrales de referencia para el análisis.

Clasificación de imágenes mediante librerías espectrales

La clasificación de cuerpos de agua, se realizó a partir de librerías espectrales obtenidas en campo que es el reconocimiento de distintos tipos de coberturas en agua, en función de sus características espectrales el cual se denomina clasificación. La construcción como claves de identificación q son las “firmas espectrales de referencia” con las cuales se la compara con los espectros multivariados de la imagen mediante el método de clasificación SAM del software ENVI.

Trabajo de campo

Se seleccionó el día 01 de abril de 2018 para la campaña, en base al calendario del paso del satélite para no tener errores entre la radiometría de campo y la radiometría orbital. En esta salida de campo se obtuvieron datos de un total de 9 puntos de muestreo.

⁴ ND: son los niveles digitales o valores numéricos.

⁵ Firma espectral: es la radiación reflejada de la superficie en función a las longitudes de onda.

⁶ Ruido espectral: ausencia de información en elementos de muestreo.

En cada punto de muestro se tomaron datos con los siguientes equipos:

- Medidas radiométricas con el espectroradiómetro de campo (firmas espectrales), el equipo que también posee GPS incorporado de alta precisión.
- Mediciones de atenuación de luz en las columnas de agua en UV⁷ y VISIBLE con espectroradiómetro C-OPS.
- Medidas de clorofila fitoplanctónica con la sonda Fluorométrica.
- Mediciones de transparencia de agua con el disco de Secchi.
- Muestras de agua recogidas en una botella Niskin y luego en frascos de 150 ml para el fósforo total.

Los frascos con muestras de agua utilizados para fósforo se conservaron refrigeradas en un cooler hasta su análisis en Laboratorio de Calidad Ambiental y dejadas antes de 24 hrs, el único parámetro es llevado al laboratorio y el resto son muestras tomadas *in situ*.

Para determinar el índice de estado trófico en el lago menor del Titicaca se aplica la fórmula propuesta por Carlson para los parámetros de transparencia de agua (*D_s*), fósforo total (*P_t*) y clorofila-a (*Chl-a*), por cualquiera de estos parámetros se podría estimar el TSI.

Cuadro 2. Fórmulas para estimar el estado trófico aplicado a los indicadores de eutrofia.

Parámetros de eutrofización	Carlson (TSI)
Disco de Secchi (<i>D_s</i>) (m)	$TSI_{D_s} = 60 - 14,41 \ln(D_s)$
Fosforo total (<i>P_t</i>) (mg/m ³)	$TSI_{P_{total}} = 14,42 \ln(P_t) + 4,15$
Clorofila-a (<i>Chl-a</i>) (mg/m ³)	$TSI_{Chl-a} = 9,81 \ln(Chl-a) + 30,6$

Fuente: Carlson 1977; 1980.

Donde:

- TSI = Índice de Estado Trófico de Carlson (Trophic state index)
- D_s = Disco de Secchi (m)
- Chl-a = Clorofila-a (mg/m³)
- P_t = Fósforo total (mg/m³)
- ln = Logaritmo natural

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de firmas espectrales, en la cual consiste en realizar la comparativa de gráfica de firmas en función de valores de reflectividad, se logró identificar por cada 3 de los nueve puntos de muestreo.

- Firma promedio de (LM-01, LM-04 y LM-06) perteneciente a la clase 1.
- Firma promedio de (LM-07, LM-08 y LM-09), perteneciente a la clase 2.

Firma promedio de (LM-02, LM-03 y LM-05) perteneciente a la clase 3.

Las clases 1, 2 y 3 donde se asignó por colores, rojo, verde y azul para identificar distribución especial en concentraciones de fitoplancton.

Las firma espectrales correspondientes a los puntos de muestreo (LM-01, LM-04 y LM-06), Presentan un comportamiento más homogéneo entre sí, los valores de reflectancia en el espectro azul entre 0,0116 - 0,0343 μW/cm²*sr*nm⁸; con desviación estándar de 0,005, en el verde las reflectancias están dadas entre 0,0348 - 0,0569 μW/cm²*sr*nm; con desviación estándar del 0,0069, los valores de reflectancia mínima en el espectro roja de 0,0101 - 0,0289 μW/cm²*sr*nm, con desviación estándar de 0,004. En el espectro infrarrojo la reflectancia es mínima entre 0,0008 - 0,0166 μW/cm²*sr*nm, con

⁷ UV: es la radiación ultravioleta, donde detecta uno de los equipos utilizados para el análisis de atenuación de luz en perfilamientos en las columnas de agua.

⁸ μW/cm²*sr*nm: unidades de medida de la radiación reflejada de la superficie en micro watts sobre centímetro al cuadrado por estereo radian por nanómetro.

desviación estándar de 0,004. Los valores de reflectancia entre los rangos azul y rojo versus verde son distantes, es decir la curva de absorción en el azul y rojo son profundas a comparación con el espectro verde. Los valores de reflectancia entre los rangos infrarrojo versus azul, verde y rojo son distantes, ya

que la mínima absorción en la infrarroja se debe a la cantidad de energía incidente absorbida por el agua y por otro lado indica el contenido de pigmento clorofílico en el fitoplancton. La firma promedio en la (figura 3), representa a poblaciones de mayor presencia de clorofila fitoplanctónica.

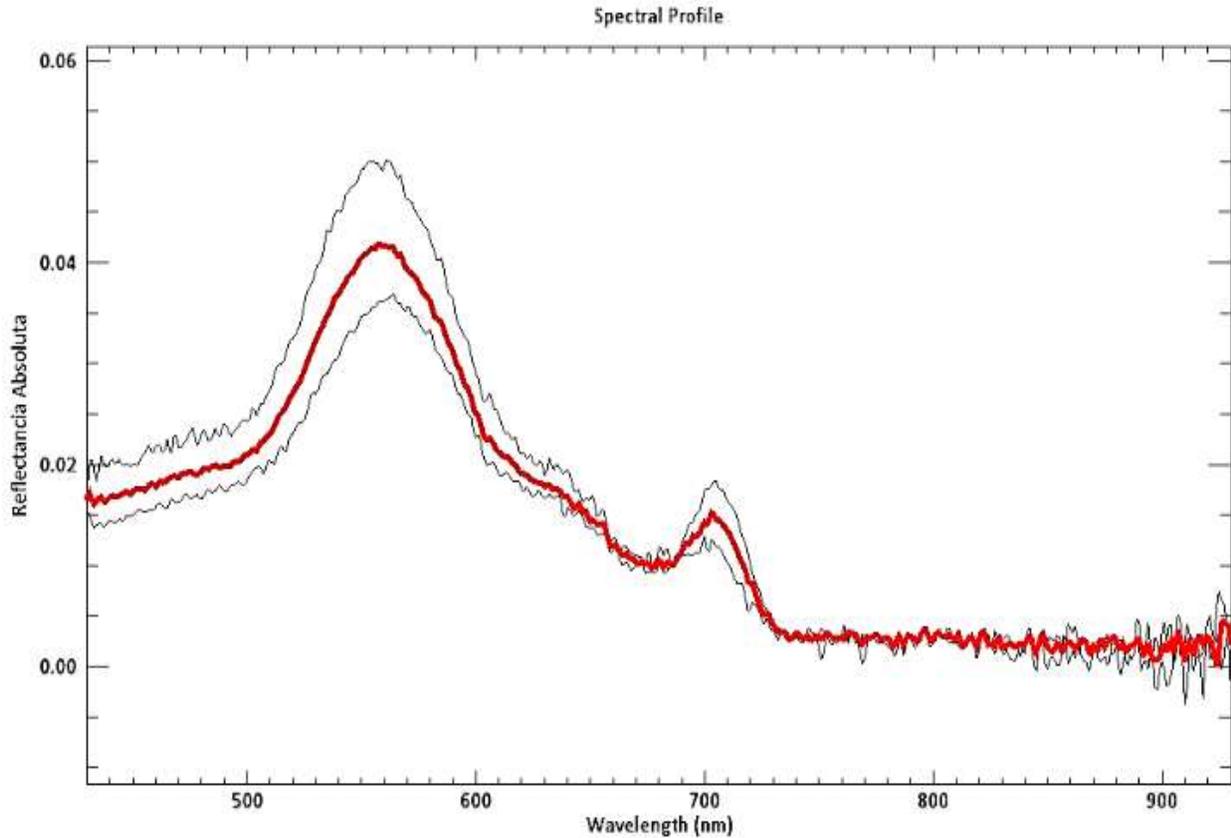


Figura 2. Firma espectral promedio de clase 1.

El conjunto de firmas espectrales dadas en los puntos de muestreo (**LM-07, LM-08 y LM-09**), se observó un comportamiento homogéneo en las respuestas de reflectancia, los valores de reflectancia en el espectro azul, fue de 0,0125 - 0,040 $\mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}$; con desviación estándar de 0,007. En el espectro verde las reflectancias están entre 0,0269 - 0,058 $\mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}$ y con desviación

estándar de 0,007. En el espectro rojo, con valores de reflectancia de 0,008 - 0,031 $\mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}$; con desviación estándar de 0,006. En las regiones del infrarrojo se muestran la absorción con los siguientes valores de reflectancia -0,0006 - 0,0159 $\mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}$; con desviación estándar de 0,004. La firma promedio en la (figura 4), representa moderadas concentraciones de población fitoplanctónica.

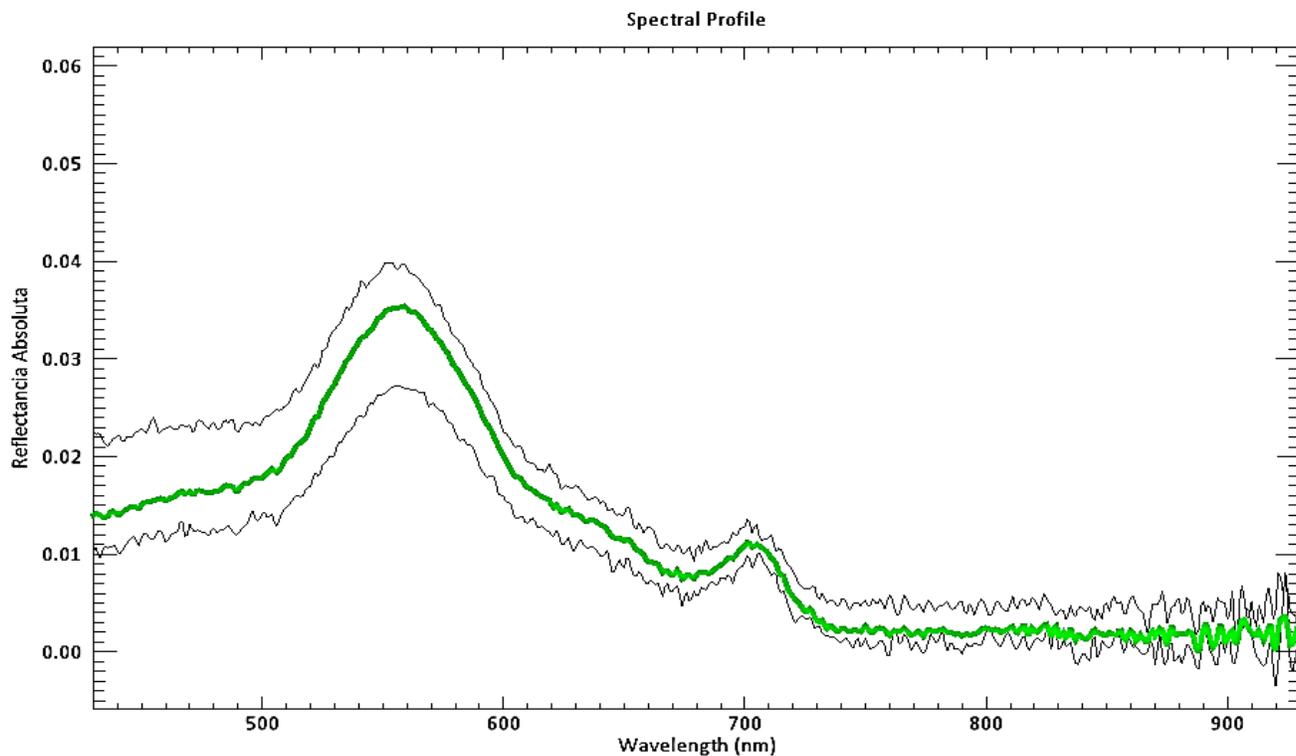


Figura 3. Firma espectral promedio de clase 2.

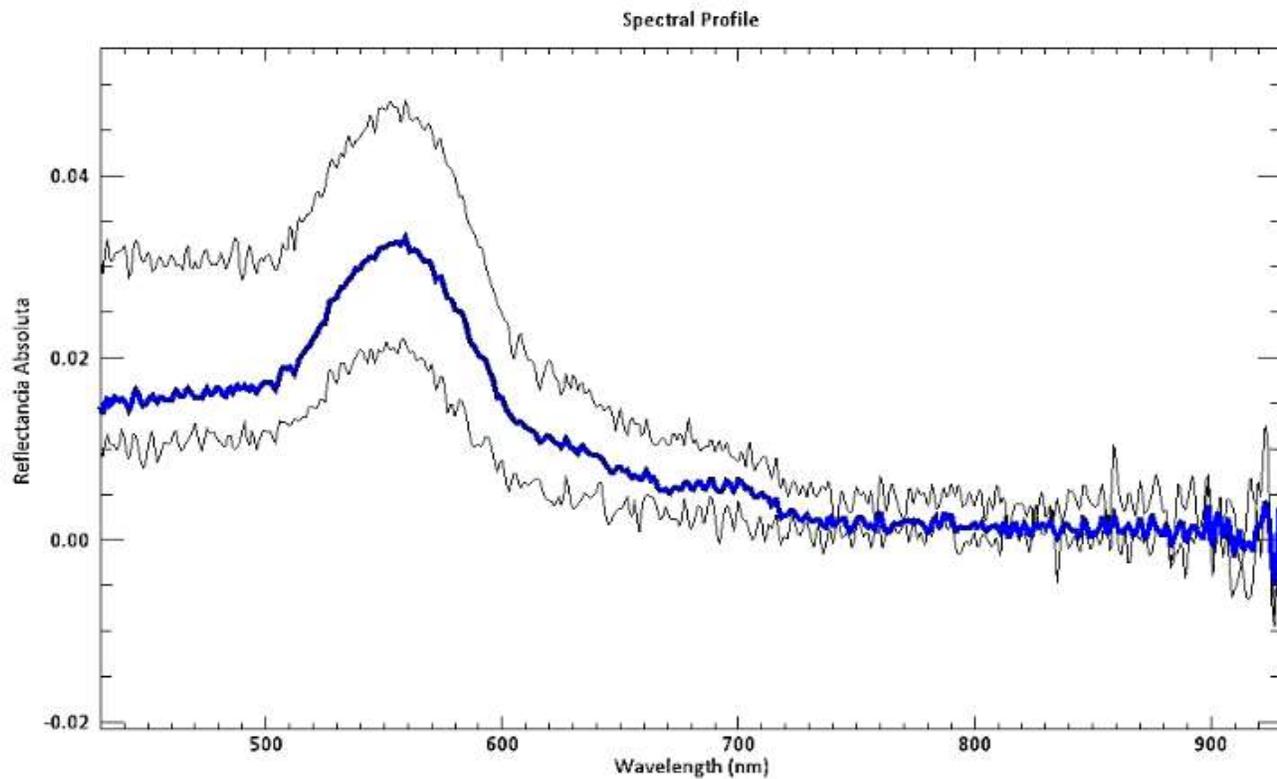


Figura 4. Firma espectral promedio de clase 3.

Para las firmas espectrales en puntos de muestreo correspondientes a (LM-02, LM-03 y LM-05), el comportamiento de valores de reflectancia en el rango del espectro azul es de 0,0094 - 0,0297 $\mu\text{W}/\text{cm}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{nm}$; con desviación estándar de 0,006. En el espectro verde las reflectancias están entre 0,0206 - 0,0496 $\mu\text{W}/\text{cm}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{nm}$; con desviación estándar de 0,012. En los valores de reflectancia mínima en el rango del espectro roja de 0,0025 - 0,0135 $\mu\text{W}/\text{cm}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{nm}$; con desviación estándar de 0,004. En el espectro infrarrojo la reflectancia es más inferior que el clúster anterior que esta entre -0,0025 - 0,0062 $\mu\text{W}/\text{cm}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{nm}$; con desviación estándar de 0,002. Los valores de reflectancia entre los rangos azul y verde versus rojo son distantes, es decir la curva de absorción en el rojo es profundas a comparación entre los rangos del espectro verde y azul con reflectancias altas y bajas en el espectro infrarrojo. La firma promedio en la (figura 5), representa menores concentraciones de clorofila fitoplanctónica.

Los datos espectrales tomadas con el espectroradiómetro en los puntos del muestreo dentro de cada clúster, se obtuvo una que corresponde al promedio de las muestras realizadas en campo. De las lecturas espectrales en campo, la similitud en relación a los valores reflectivos se encontró en los puntos (LM-01, LM-04 y LM-06), (LM-07, LM-08 y LM-09) y (LM-02, LM-03 y LM-05), en cada 3 de los 9

puntos se obtuvo una que corresponde al promedio como se muestra en la figura 5.

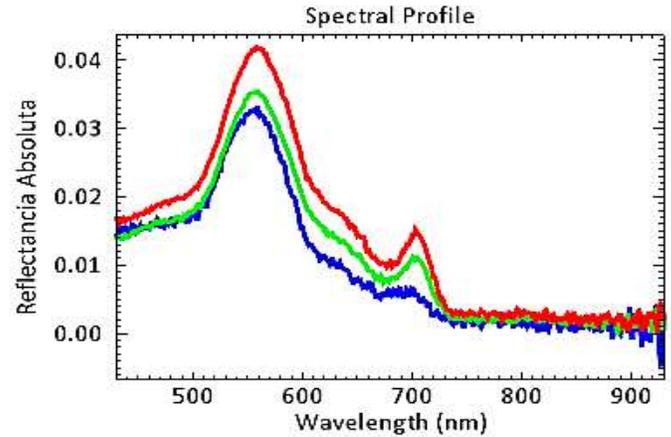


Figura 5. Comparación de firmas espectrales promedio para cada clase de estudio.

Clasificación de los cuerpos de agua a partir de las librerías espectrales.

A partir de la imagen de reflectancia se procedió a mapear las masas de agua según la concentración fitoplanctónica, se tiene como objetivo para esta clasificación supervisada a partir de las mediciones radiométricas en campo se obtuvo una librería espectral⁹ que consiste en asignar a un conjunto de píxeles en la imagen digital, con un conjunto de clases basadas en firmas espectrales predefinidas o de referencia. Para este fin se contó con 15 firmas espectrales dentro de cada clúster y promediados por las mismas para tener una sola firma espectral para cada clase de estudio.

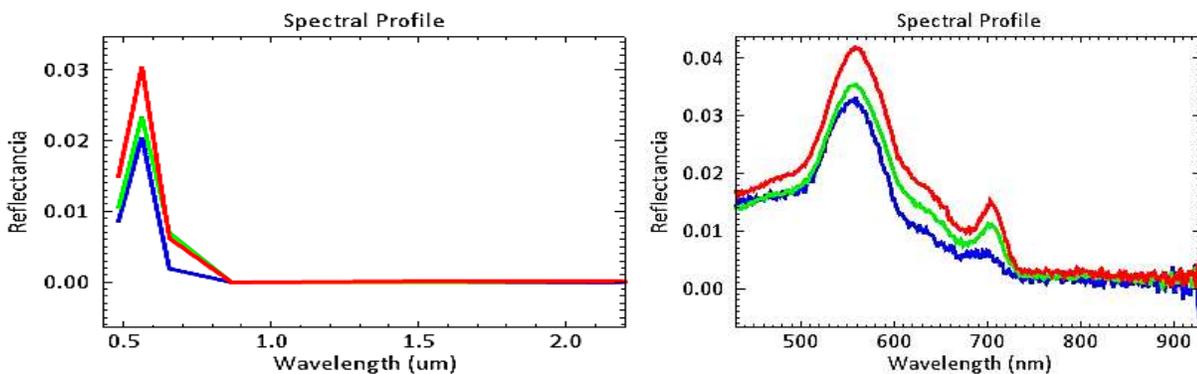


Figura 6. Librerías espectrales para las tres clases de cuerpos de agua. A) obtenida a partir de imagen Landsat-8 OLI. B) obtenida a partir de radiometría de campo.

⁹ Librería espectral: es un conjunto de firmas espectrales para identificar elementos de interés.

Tabla 3. Comparación de reflectancias en la imagen vs radiómetro para las longitudes de onda correspondientes a los centros de banda.

Band a	Centr o de banda (λ)	Firma imagen Landsat-8 (μW/cm ² *sr*nm)			Firma espectralradiómetro (μW/cm ² *sr*nm)			Δ Reflectancia (μW/cm ² *sr*nm)		
		Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 1	Clase 2	Clase 3
2	483	0,0158	0,0135	0,0119	0,0195	0,0166	0,0158	-0,0037	-0,0031	-0,0039
3	561	0,0290	0,0261	0,0228	0,0416	0,0349	0,0317	-0,0126	-0,0088	-0,0089
4	655	0,0078	0,0081	0,0034	0,0142	0,0105	0,0064	-0,0064	-0,0024	-0,0030
5	865	0,0004	0,0001	0,0000	0,0026	0,0014	0,0016	-0,0022	-0,0013	-0,0016

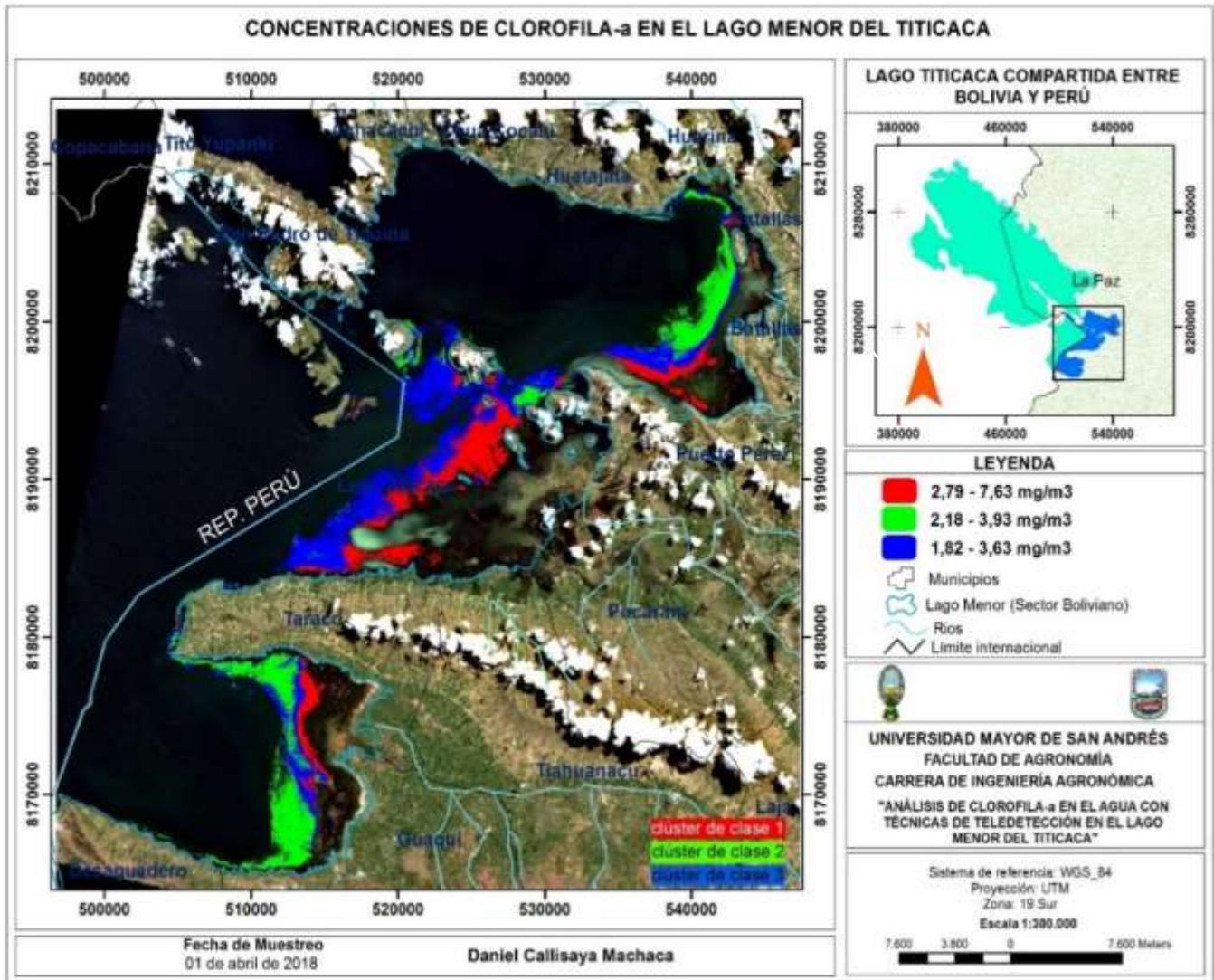


Figura 7. Clasificación de concentraciones de clorofila-a.

En la tabla 3, se observa mínima diferencia en valores de reflectancias entre la radiometría de imagen y de campo ya que la radiometría de imagen

Landsat-8, es tomada desde una altura de 705 km y las firmas espectrales con espectroradiómetro HH2¹⁰ a solo 1 m desde el espejo de agua, la variación (Δ) de reflectancia indica una buena correlación entre las firmas espectrales de ambos sensores.

Se utilizó el método de (SAM¹¹) del software ENVI 5.3 compara la similitud de la misma frecuencia radiativo entre espectros de píxeles desconocidos multivariados (imagen); con una librería de espectros de referencia (radiometría de campo).

En el mapeo espectral mediante librerías espectrales obtenidas en campo, se clasifica en 3 clases de cuerpos de agua y en cada clase se forma un grupo de píxeles de la misma frecuencia radiativo "Clúster", cada una es asignada según rango de concentración clorofila fitoplanctónica en colores: clúster de color (rojo, verde y azul)

Resultados de analisis en campo

Concentraciones de fósforo total en cada uno de los puntos de muestreo, como se muestra a continuación en la figura 8.

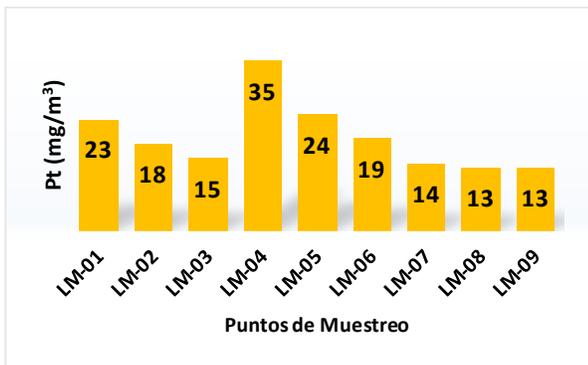


Figura 8. Concentraciones de fósforo total (Pt), en diferentes puntos de muestreo.

En la figura 8, La menor concentración de fósforo fue de 13 mg/m³ en los puntos LM-08 y 09, y la mayor concentración fue en el punto LM-04 con 35 mg/m³ de fósforo total.

Concentraciones de clorofila-a (Chl-a), en los puntos de muestreo

En la figura 9, se muestra las concentraciones en las columnas de agua en los mueve puntos, la profundidad es diferente en cada punto, donde a mayores profundidades presenta menores concentraciones de fitoplancton debido a la falta de penetrabilidad de radiacion solar para realizar la fotosíntesis.

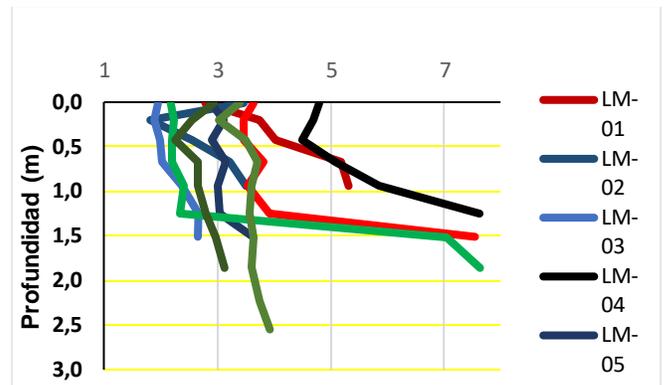


Figura 9. Concentraciones de Chl-a en las columnas de agua de cada punto (mg/m³).

Las concentraciones de clorofila fitoplanctónica en las columnas de agua son variadas, para mostrar gráficamente es promediado de cada perfil de muestreo como se observa en la figura 10.

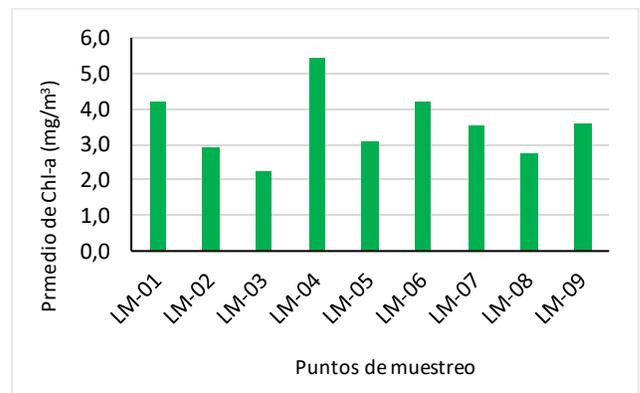


Figura 2. Concentraciones promedio de clorofila-a.

En la figura 10, la menor concentración promedio de clorofila-a en las columnas de agua

¹⁰ HH2: <https://www.malvernpanaytical.com/en/products/product-range/asd-range/fieldspec-range/handheld-2-hand-held-vnir-spectroradiometer>

¹¹ SAM: es el Mapeador de ángulo espectral del software ENVI.

presentan en el punto 3 con 2,23 mg/m³, y la mayor concentración es en el punto 4, con 5,43 mg/m³, los puntos LM-04, LM-5 y LM-6 se encuentran cercanas a la desembocadura del río Surimana en el sector de Puerto Pérez.

Los colores asignados como rojo, verde y azul, de acuerdo a los rangos de concentración en el

mapeo realizado, son el resultado de las firmas espectrales que agrupa los puntos como: Rojo LM (01, 04 y 06), Verde LM (07,08 y 09) y Azul LM (02, 03 y 05).

Atenuación de luz solar UV y PAR en las columnas de agua en cada punto de muestreo.

Tabla 4. Se muestra la atenuación de la luz solar UV-B, UV-A y PAR, en los perfilamientos de las columnas de agua en los nueve puntos de muestreo.

Atenuación de la radiación de luz solar			
Puntos de muestreo	Luz UV-B “313 nm” (m)	Luz UV-A “380 nm) (m)	PAR “400-700 nm” (m)
LM-01	0,64	1,36	3,63
LM-02	1,05	2,79	8,61
LM-03	1,58	4,26	7,89
LM-04	0,60	1,04	1,83
LM-05	1,09	3,09	11,51
LM-06	0,87	2,42	12,18
LM-07	1,96	5,39	16,27
LM-08	1,80	4,46	11,66
LM-09	1,55	4,50	4,83

De acuerdo al cuadro 4, la atenuación de la luz UV y PAR¹², se muestra de la siguiente manera: la atenuación de la luz **UV-B**, la cual es la más dañina para los seres vivos en este caso para el fitoplancton, esta luz sufre la atenuación a la profundidad mínima de 0,60 m en el punto LM-04, y la atenuación a la profundidad máxima es de 1,96 en el punto LM-07, en este punto tiene mayor penetrabilidad de la luz UV-B que está en las longitudes de onda de 313 nm.

Para la luz **UV-A** o también llamada ultravioleta cercana, esta luz se atenúa a una profundidad mínima de 1,04 m en el punto LM-04, y la atenuación a la profundidad máxima es a 5,39 m en el punto LM-07 esta luz UV-A se encuentra en la longitud de onda de 380 nm.

En la luz **VISIBLE o PAR**, donde se puede observar la transparencia de agua, esta luz se atenúa a la profundidad mínima de 1,83 m en el punto LM-04, es decir que en este punto, es uno de los nueve puntos donde la visibilidad se pierde a una menor profundidad por la presencia de clorofila fitoplanctónica en las columnas de agua, y la atenuación a la máxima profundidad es a 16,27 m en el punto LM-07, es decir, que en este punto las aguas se encuentran muy claras con mínimas partículas en suspensión y por esta razón es posible observar hasta estas profundidades.

Aplicación del criterio de eutrofización

Mediante el criterio de Carlson, que clasifica a un cuerpo de agua en base a los valores de

¹² PAR: es la radiación fotosintéticamente activa que se encuentra en las regiones de longitud de onda de 400 a 700 nm.

concentración de Clorofila-a y Fósforo total en (mg/m³).

Aplicando estos valores de concentración obtenidas en cada punto de muestreo mediante el criterio de Carlson 1977-1980, se ve en la tabla 5.

Tabla 5. Aplicación del índice de estado trófico (TSI) en el lago menor del Titicaca.

Puntos de muestreo	Clorofila-a (mg/m ³)			Fósforo total (mg/m ³)		
	Chl.a (mg/m ³)	TSI	Estado trófico	Pt (mg/m ³)	TSI	Estado trófico
LM-01	5,32	47	Mesotrófico	23	49	Mesotrófico
LM-02	3,51	43	Mesotrófico	18	46	Mesotrófico
LM-03	2,39	39	Mesotrófico	15	43	Mesotrófico
LM-04	5,85	48	Mesotrófico	35	55	Eutrófico
LM-05	3,02	41	Mesotrófico	24	50	Mesotrófico
LM-06	3,55	43	Mesotrófico	19	47	Mesotrófico
LM-07	2,40	39	Mesotrófico	14	42	Mesotrófico
LM-08	2,66	40	Mesotrófico	13	41	Mesotrófico
LM-09	3,60	43	Mesotrófico	13	41	Mesotrófico

Los resultados obtenidos de los puntos de muestreo en el lago menor del Titicaca, indican el estado Mesotrófico con respecto a las concentraciones de Clorofila-a y Fósforo total, con excepción en el punto LM-4 que indica el estado Eutrófico con relación al fósforo total.

CONCLUSIONES

Las firmas espectrales comparadas entre la radiometría orbital y la radiometría de campo, se obtuvieron con una diferencia en los valores de reflectancias menores a 1%, lo que indica una buena correlación entre ambos sensores y una confiabilidad de utilizar de los datos del satélite Landsat-8 OLI.

En el mapa de concentración de clorofila-a, se observan mayores concentraciones en las zonas litorales del Lago Menor del Titicaca y reduciéndose conforme nos alejamos de la misma. Los niveles más altos de concentración fitoplanctónica; se encuentran en sectores donde desembocan los ríos, debido al arrastre de elementos orgánicos, razones por las cuales existe aumento de actividad biológica en las zonas costeras.

En base a las concentraciones de clorofila-a, indican el estado Mesotrófico para los nueve puntos de muestreo, es decir, la presencia moderada de

nutrientes y con respecto a las concentraciones de fosforo total, indican el estado Mesotrófico para los ocho puntos de muestreo; sin embargo en el punto LM-04 indica el estado Eutrófico con relación al fosforo total, lo que nos muestra un alto nivel de nutrientes.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Javier A. Núñez Villalba, director de instituto de investigaciones geográficas (IIGEO), al Dr. Xavier Lazzaro (IRD- Francia) instituto de investigaciones para el desarrollo, en la toma de datos en campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Gregor, J; Marsálek B. (2004). Freshwater Phytoplankton Quantification by Chlorophyll a: A Comparative Study of *in vitro*, *in vivo* and *in situ* Methods. *Water Res.* Vol. 38:517-522.
- Justiniano, M; Carrasco, L. (2001). Comportamiento Hidrológico de niveles de agua en el Lago Titicaca. Simposio Internacional sobre el sistema del Lago Titicaca. La Paz, BO. Artes Gráficas Latina. 149 p.

Kruse, F.A. (2018). *Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH atmospheric corrections using low-altitude AVIRIS data of Boulder*. Recuperado de:

http://www.hgimaging.com/PDF/Kruse-JPL2004_ATM_Compare.pdf

Lazaro, X. (2016). *El observatorio Binacional del Lago Titicaca (OBLT)*. La Paz, BO, IRD/BOREA. 21 p.

Moreno D; Quintero J; López A. (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *Contactos*. 78, 25–33. (en línea). Consultado 22 nov. 2017. Recuperado de:

<http://www.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n78ne/eutrofia2.pdf>

OSINFOR (organismo de supervisión de los recursos forestales y de fauna silvestre). (2014). *Contribución en el monitoreo de la actividad minera en títulos habilitantes forestales*. Departamento de Madre de Dios, Puerto Maldonado, PE, Presidencia del Consejo de Ministros (PCM). 98 p.

Ruiz-Verdú, A; De Miguel, E; Robles-González, C; Fernández-Renau, A. (2009). *Cinclus: un instrumento para la teledetección de las aguas continentales*. Montesinos, S; Fernández, L (eds.). Madrid, ES, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). 4 p.