

Estimation of chlorophyll-a in different inland water bodies from hyperspectral images

Jesús Delegido¹, Carolina Tenjo¹, Antonio Ruiz-Verdú², Ramón Peña¹, Carlos Julio Contreras¹, Verónica Fernández¹, Neus Sabater¹, Jorge Vicent¹, José Moreno¹

¹Department of Earth Physics and Thermodynamics. Image Processing Laboratory, Universidad de Valencia. C/ Catedrático José Beltrán, 2. 46980 Paterna (Valencia), SPAIN.

²INTA (Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial), Carretera de Ajalvir, km 4. 28850 Torrejón de Ardoz (Madrid), SPAIN

Jesus.Delegido@uv.es, carolina.tenjo@gmail.com, aruiver@gmail.com,
rpenamart@yahoo.es, carconma@alumni.uv.es, verfern@alumni.uv.es,
neus.sabater.medina@gmail.com, Jorge.Vicent@uv.es, Jose.Moreno@uv.es

Abstract. The control of inland water quality is fundamental to ecology studies and to improve human life. The use of spaceborne sensors such as MERIS or the future Sentinel 3, allows the study of water pollution by remote sensing, mainly by the estimation of photosynthetic pigments concentration. The pigment most commonly used is chlorophyll-a, due to its presence in all photosynthetic organisms. Chlorophyll measurements in Rosarito reservoir, located in the central region of the Iberian Peninsula, were obtained from May to November 2004 with ASD-FR spectroradiometer data and 5 CHRIS/Proba images on dates coinciding with in situ measurements. The highest correlation of Triband model of Dall'Olmo & Gitelson was obtained at bands 670, 689 and 752 nm. Furthermore, the Area Under Reflectance curve Index (AURI), defined as the integral of the reflectance curve between 657 and 711 nm divided by the reflectance at 657 nm, is proposed. This new hyperspectral index shows a high correlation with chlorophyll a in water. Both models have been applied to different water bodies: 1) the Albufera de Valencia, lake along the east coast of the Iberian Peninsula, in which chlorophyll measurements, retrieved from 4 hyperspectral images acquired with the Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean (HICO), of Naval Research Laboratory (USA), aboard of the International Space Station, were obtained throughout 2012, and 2) lakes Miramar, San Silvestre and Juan Esteban, in Barrancabermeja (Colombia) with different eutrophication levels, where chlorophyll-a and radiometric measurements were acquired on 9 different points in January 2011.

Keywords: Water quality, AURI, chlorophyll-a, CHRIS/Proba, HICO.

1. Introducción

Los sensores remotos son una herramienta de gran importancia para el estudio de la superficie terrestre, ya que permiten su observación y análisis de una manera rápida, periódica y relativamente económica comparándolos con estudios realizados directamente en campo. Por medio del uso de sensores de gran resolución espacial y espectral, como es el caso de CHRIS/PROBA o HICO, es posible observar mejor ciertas características ópticas del agua y sus componentes.

Uno de los principales indicadores de calidad del agua en cuerpos continentales es la biomasa y la composición del fitoplancton. Las actividades antrópicas pueden contribuir a la eutrofización de las masas de agua, que consiste en el aumento de biomasa del fitoplancton a través del aumento de cargas de nitrógeno y fósforo en el agua, los cuales actúan como nutrientes de dichos organismos. Un aumento descontrolado de estos organismos, podría ocasionar un alto grado de contaminación en el agua. La biomasa del fitoplancton en el agua puede estimarse por medio de sensores remotos gracias a que éste modifica las propiedades ópticas del agua a través de dos procesos: retrodispersión y absorción de la luz incidente. La absorción de la luz es producida principalmente por los pigmentos fotosintéticos de esos organismos, de los cuales el más común es la clorofila-a (Ruiz-Verdú et al., 2005). La concentración de clorofila-a [Chl-a], se utiliza para estimar en forma indirecta la biomasa de las comunidades fitoplanctónicas, debido a que es el principal pigmento fotosintético presente

en las algas (Gregor & Maršálek, 2004). [Chl-a] también es un indicador del grado de contaminación de los ecosistemas acuáticos y un importante índice del estado fisiológico del fitoplancton (Pinto et al., 2001).

2. Métodos de teledetección para la estimación de [Chl-a] en el agua

En los últimos años, se han desarrollado distintos métodos para el estudio de la calidad del agua utilizando sensores remotos, que permiten la estimación de algunos parámetros biofísicos de interés, como es el caso de la clorofila-a. En este trabajo se van a aplicar dos métodos diferentes para el estudio de [Chl-a] por teledetección: el primero es una adaptación del modelo Tribanda de Dall'Olmo et al. (2003) al embalse de Rosarito y el segundo corresponde a la propuesta de un modelo que correlaciona la [Chl-a] con el área bajo la curva de reflectividad entre las longitudes de onda de 657 y 711 nm (Area Under Reflectance curve Index, AURI). Estos modelos fueron aplicados posteriormente a los datos medidos en Barrancabermeja (Colombia) y en La Albufera de Valencia (España).

2.1 Modelo Tribanda de Dall'Olmo et al. (2003)

En Dall'Olmo et al. (2003), se aplica el modelo propuesto por Gitelson et al. (2003) para la estimación remota de Chl-a en aguas turbias, utilizando datos de varios lagos con diferente composición y concentración de sus componentes localizados en Nebraska, obteniendo la Ecuación (1):

$$Chl - a \propto \left(\frac{1}{R_{660-670}} - \frac{1}{R_{720-730}} \right) \times R_{740-750} \quad (1)$$

Donde R_{i-j} es la reflectancia en la banda con longitudes de onda comprendidas entre i y j (en nm).

2.2 Modelo AURI

Este modelo, propuesto en esta investigación, se basa en los resultados obtenidos por Delegido et al. (2010) para vegetación, donde se correlaciona la integral sobre la curva de reflectividad normalizada por el límite superior de integración, con el contenido de clorofila en cultivos en el rango 643 – 795 nm y se define el NAOC (Normalized Area Over reflectance Curve) como:

$$NAOC = 1 - \frac{\int_{\lambda 643}^{\lambda 795} R_{rs} d\lambda}{R_{rs}(795)} \quad (2)$$

Donde λ_i es la longitud de onda i (en nm).

Tomando como referencia la experiencia obtenida en el desarrollo del NAOC, donde se demostró que el área sobre la curva está relacionada con la concentración de clorofila, y que además al calcular el cociente entre este área y la reflectividad obtenida en el límite superior de integración se disminuían los efectos de los factores fisionómicos de la planta, se planteó determinar la relación que existe entre el área bajo la curva de reflectividad con la [Chl-a] en los cuerpos de agua. Esta área debe ser normalizada en principio por la reflectividad en uno de los extremos de la integral. En la Figura 1 (a) se muestran cuatro espectros típicos de reflectividad obtenidos en el embalse de Rosarito con su correspondiente [Chl-a]. En amarillo se muestra la región de mayor absorción de la clorofila-a, mientras en la Figura 1 (b) se muestran los espectros resultantes de realizar el cociente entre los espectros de reflectividad y la reflectividad a 657 nm. Las diferencias en la reflectividad absoluta en esa región espectral se deben principalmente a la mayor o menor dispersión que producen las partículas en suspensión presentes en el agua. En la región en torno a 650 nm absorbe algo la clorofila-a y

algo menos la ficocianina, pero, en general, es un mínimo local de absorción de pigmentos fotosintéticos. De ahí que al normalizar dividiendo por la reflectividad a 657 nm, las curvas quedan ordenadas de forma que el área bajo la curva normalizada disminuye al disminuir la [Chl-a] del agua.

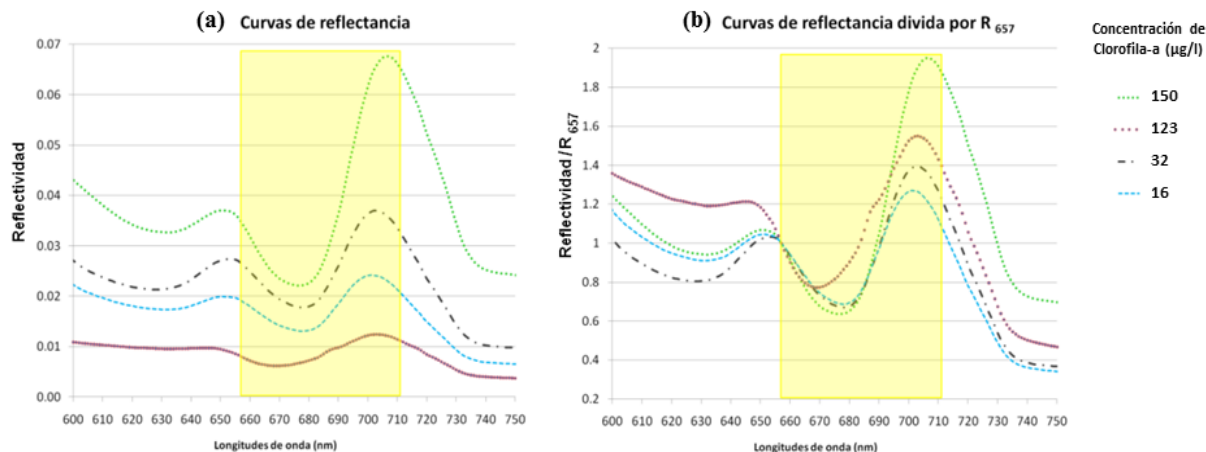


Figura 1. (a) Curvas de reflectividad para cuatro puntos en el embalse de Rosarito (en sombreado amarillo la región determinada para ajustar el modelo AURI). (b) Curvas de reflectividad divididas por la reflectividad en $\lambda = 657$ nm, para los puntos mostrados en (a).

Por tanto, se propone un nuevo índice AURI cuyo modelo matemático se establece como:

$$AURI = \frac{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} R d\lambda}{R_{\lambda_a}} \quad (3)$$

Donde R es la curva de reflectividad en la que se realiza el cálculo de la integral entre las longitudes de onda λ_a y λ_b . En este trabajo se pretende determinar cuáles son las longitudes de onda óptimas de los límites de integración que proporcionan la mejor correlación con los datos experimentales de [Chl-a].

3. Materiales

3.1 Datos de campo

Los datos utilizados para ajustar los modelos de determinación de [Chl-a] corresponden a medidas de [Chl-a] tomadas en el embalse de Rosarito (España, 40°6'0"N, 5°18'25"W), entre abril y noviembre de 2004, en el desarrollo del proyecto denominado "Use of CHRIS for Monitoring Water Quality in Selected Reservoirs" llevado a cabo por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. El embalse de Rosarito es un embalse eutrófico, dominado por cianobacterias y situado en una zona con más de 3.000 horas de sol al año, cuyo contenido promedio de [Chl-a] varía entre 10 y 100 µg/l dependiendo de la época del año. El muestreo de la campaña se planeó de tal manera que la fecha de toma de muestras coincidiera con la fecha de adquisición de las imágenes, de acuerdo con el Plan Nominal de Adquisición del programa CHRIS/PROBA.

El segundo grupo de datos corresponde a tres lagos cerca del municipio de Barrancabermeja (Colombia) obtenidos en enero de 2011: Juan Esteban (7°05'58"N, 73°49'45"W), Miramar (7°04'06"N, 73°52'17"W) y San Silvestre (7°01'35"N, 73°50'41"W), en el marco del proyecto "Creación y puesta en marcha del Centro de Estudios del Agua y del Medio Ambiente para el Magdalena Medio (CEAMAMM) de Colombia". En este caso, los tres lagos se caracterizan por poseer características biofísicas totalmente

diferentes: Miramar corresponde prácticamente a un cuerpo de agua totalmente contaminado por residuos urbanos y otros provenientes de una refinería de petróleo, cuya [Chl-a] varía entre 300 y 800 $\mu\text{g/l}$; Juan Esteban es un cuerpo de agua con una alta carga de sedimentos debido a su cercanía con el Río Magdalena, su [Chl-a] se encuentra entre 45 y 60 $\mu\text{g/l}$; y San Silvestre es un lago con agua de mayor transparencia fuente de agua potable para las poblaciones cercanas, cuya [Chl-a] está entre 9 y 25 $\mu\text{g/l}$. Para este caso no se cuenta con la imagen de CHRIS/PROBA de la fecha del muestreo, aunque se disponen de imágenes de otras fechas, por lo cual, para su validación se utilizó una imagen del 21 de mayo de 2011.

Por último disponemos de datos de [Chl-a] medidos en La Albufera (España, 39°20'10"N, 0°21'10"W), entre febrero y marzo de 2012, proporcionados por el Grupo de Ecología de la Universidad de Valencia, cuya fecha de medición corresponde con las fechas de adquisición de las imágenes HICO, de las que se obtuvieron los espectros de reflectividad. La Albufera es un antiguo golfo, que quedó aislado del mar por una barra litoral de arena, alimentado en la actualidad por las aguas dulces de barrancos, acequias y surgencias, y cuya [Chl-a] varía entre 30 y 150 $\mu\text{g/l}$, dependiendo de la época del año. Su dinámica natural está muy modificada por las necesidades de los cultivos de arroz que la circundan, que regulan su inundación mediante compuertas que comunican a la Albufera con el mar.

Las mediciones de [Chl-a] se realizaron de acuerdo a los protocolos establecidos por la norma ISO 10260 (1992). Las medidas de radiancia in situ se tomaron sólo en el embalse de Rosarito y en los 3 lagos de Barrancabermeja, de acuerdo al protocolo de Mueller et al. (2003) y se aplicó la corrección por reflexión especular (sun glint) propuesta por Mobley (1999) para obtener los valores de reflectividad.

3.2 Imágenes de satélite

Para la implementación de los modelos obtenidos en imágenes de satélite, se utilizaron dos productos: CHRIS/PROBA (Compact High Resolution Imaging Spectrometer) a bordo del satélite Proba e HICO (Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean) a bordo de la Estación Espacial Internacional. El sistema CHRIS/PROBA proporciona datos de alta resolución espacial (17-34 m) y espectral (hasta 62 bandas, 17 para el modo agua), además de información multiangular obtenida en 5 ángulos de observación diferentes a 0°, $\pm 36^\circ$ y $\pm 55^\circ$. El sensor mide en la franja del espectro correspondiente al visible y al infrarrojo cercano (VNIR) entre 400 y 1050 nm. Los productos CHRIS incluyen 5 modos de acuerdo al tipo de superficie que se requiera analizar: MODO 1 (Completo), MODO 2 (Agua), MODO 3 (Suelo) MODO 4 (Clorofila) y MODO 5 (Suelo). En este caso, las imágenes utilizadas en la zona de Rosarito y Barrancabermeja corresponden al Modo 2 tomadas el 15 de junio de 2004 y el 21 de mayo de 2011 respectivamente.

HICO es el primer sensor basado en los espectrómetros aerotransportados PHILLS diseñado para el monitoreo de la costa y el océano, capaz de registrar una imagen de 42 x 192 km con un tamaño de pixel de 90 m en un rango espectral de 380 a 960 nm con 87 bandas de 5,7 nm de ancho y una muy alta relación señal-a-ruido para resolver la complejidad del océano costero. Este sensor proporciona productos costeros como la claridad del agua, tipos de fondo, batimetría y mapas de vegetación terrestre. Para la realización del mapa de clorofila de la Albufera se utilizó una imagen HICO de la zona de la Albufera tomada el día 23 de febrero de 2012.

4. Resultados

A partir de los datos de [Chl-a] y los espectros de reflectividad de los puntos de muestreo en el embalse de Rosarito, se ajustaron los modelos Tribanda y AURI, determinando los rangos que proporcionan los mejores resultados. Posteriormente, se aplicaron estos dos modelos a los datos obtenidos en Barrancabermeja y en La Albufera.

4.1 Ajuste del Modelo Tribanda

Para el ajuste del modelo Tribanda con los datos de campo del embalse de Rosarito se siguió la metodología propuesta por Dall'Olmo et al. (2003) que consiste en encontrar las bandas λ_1 , λ_2 y λ_3 que presenten la máxima correlación entre la [Chl-a] y un parámetro T definido como:

$$T = \left(\frac{1}{R_{\lambda_1}} - \frac{1}{R_{\lambda_2}} \right) \times R_{\lambda_3} \quad (4)$$

En primer lugar se obtuvo la primera aproximación de λ_2 . Para ello se establecieron como parámetros fijos iniciales λ_1 en 672 nm, que es la zona donde la curva de reflectividad es influenciada por la absorción de la clorofila-a en mayor proporción que los demás componentes ópticamente activos del agua (OAC), y λ_3 en 755 nm, como una banda donde la absorción es causada principalmente por el agua, obteniendo la mejor correlación para $\lambda_2 = 689$ nm con $R^2 = 0.61$. Para la determinación de λ_3 , se realizó la regresión del modelo situando λ_1 en 672 nm y λ_2 en 689 nm, obteniendo $\lambda_3 = 780$ nm con $R^2 = 0.64$. Por último, se determinó λ_1 con las aproximaciones iniciales para λ_2 y λ_3 , obteniendo que la mayor correlación se encuentra en torno a los 672 nm con $R^2 = 0.61$. En la figura 2(a) se representan los valores de [Chl-a] dada en $\mu\text{g/l}$ en función de $T(\lambda_{672}, \lambda_{689}, \lambda_{780})$ calculado con los valores de reflectividad, obteniendo la siguiente relación lineal:

$$[\text{Chl-a}] = 357 \cdot T(\lambda_{672}, \lambda_{689}, \lambda_{780}) - 40,5 \quad (5)$$

cuando [Chl-a] se da en $\mu\text{g/l}$.

En la figura 2(b) se observa el mapa de [Chl-a] calculado a partir de una imagen CHRIS/PROBA del 15 de junio de 2004 del embalse de Rosarito.

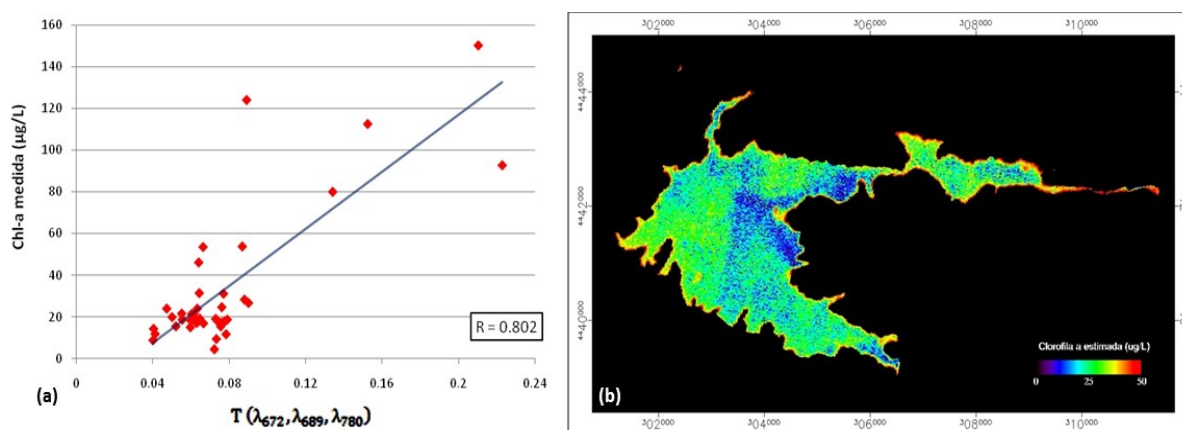


Figura 2. (a) Ajuste lineal del modelo Tribanda para los datos de Rosarito. (b) Mapa de [Chl-a] del embalse Rosarito aplicando el modelo Tribanda.

4.1.1 Aplicación del Modelo Tribanda a Barrancabermeja y La Albufera

El modelo obtenido fue aplicado para las zonas de Barrancabermeja y La Albufera con los datos obtenidos en ambos sitios. En la Figura 3 (a y b) se muestran los valores de [Chl-a] calculados con el modelo en Barrancabermeja y Albufera, respectivamente, en función de los valores de [Chl-a] medidos. Se observa que el modelo no se ajusta para los datos de La Albufera, mientras que para la zona de Barranca presenta una muy buena correlación lineal.

En la Figura 3 (c y d) se muestran los mapas de [Chl-a] en los 3 lagos de Barrancabermeja y el lago de La Albufera, respectivamente.

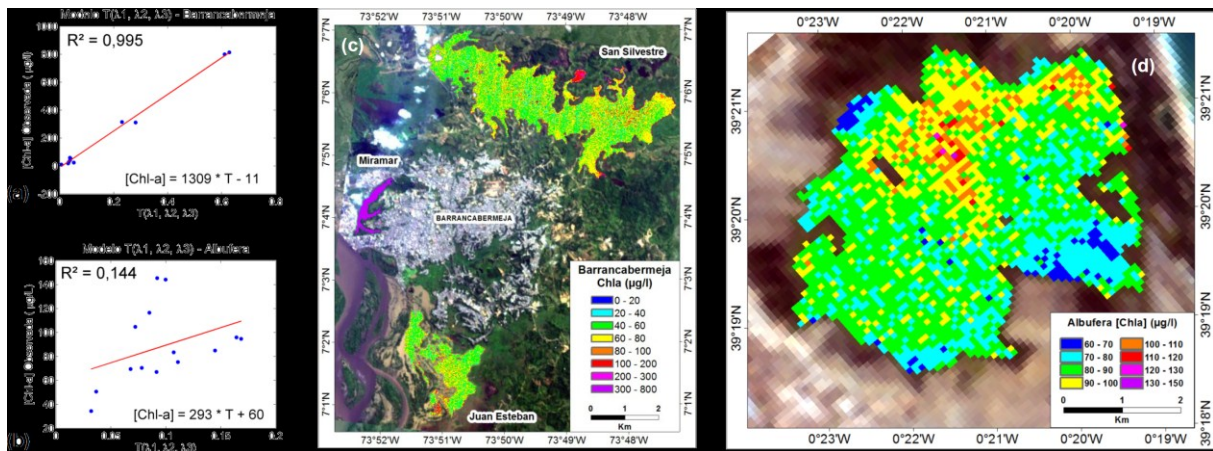


Figura 3. (a) Ajuste lineal del modelo Tribanda en función de [Chl-a] medida para los datos de Barrancabermeja y (b) La Albufera. (c) Mapa de [Chl-a] de los tres lagos de Barrancabermeja aplicando el modelo Tribanda a la imagen CHRIS/PROBA del 21/05/2011. (d) Mapa de [Chl-a] de la zona de La Albufera aplicando el modelo Tribanda a la imagen HICO del 23/02/2012.

Como se observa en la Figura 3c, aunque la fecha de la imagen no coincide con la fecha de toma de muestras en los lagos de Barrancabermeja, los valores que muestra la imagen corresponde con los rangos medidos de [Chl-a] en cada lago: en Miramar los valores están entre 200 y 800, en Juan Esteban entre 50 y 100 y en San Silvestre entre 40 y 80 $\mu g/l$. En La Albufera, los valores obtenidos son entre 40 y 130 $\mu g/l$, más bajos cerca de las orillas por el aporte de las acequias y mayor en la zona central-norte, lo que coincide con nuestros resultados de otras campañas (Fernández, 2012). Sin embargo, al comparar los valores en cada píxel con el valor correspondiente medido in situ, en algunos casos se presentan grandes discrepancias, que pueden explicarse, al menos en parte, por la gran variabilidad espacial que presenta la Albufera, que hace que la medida in situ en un punto no sea representativa de la estimada para un píxel HICO (90 x 90 m).

4.2 Ajuste del índice AURI

Con los datos de reflectividad de Rosarito y de [Chl-a] medida in situ, se obtuvo que la mejor correlación ($R^2 = 0,53$) se da cuando los límites de integración λ_1 y λ_2 son respectivamente 672 nm y 706 nm. En la figura 4(a) se representan los valores de [Chl-a] dada en $\mu g/l$ en función de AURI calculado con los valores de reflectividad, obteniendo la siguiente relación lineal:

$$[Chl-a] = 8,6 AURI - 350 \quad (6)$$

En la figura 4(b) se observa el mapa de [Chl-a] calculado a partir de una imagen CHRIS/PROBA del 15 de junio de 2004 del embalse de Rosarito. Si se compara con el mapa obtenido con el modelo Tribanda (Figura 2b) podemos ver la similitud entre los dos mapas, y comparando con los datos in situ se puede comprobar que ambos métodos proporcionan una buena estimación de la [Chl-a] en el embalse de Rosarito.

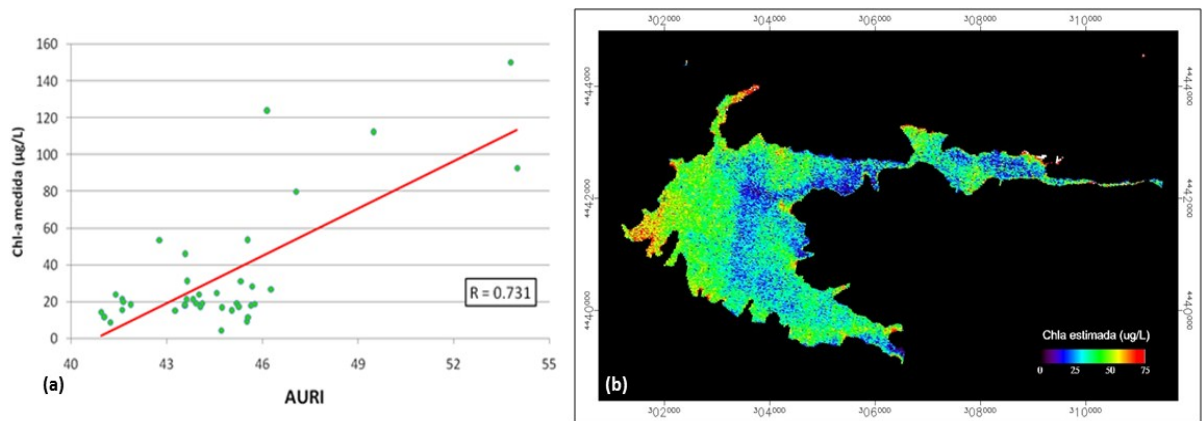


Figura 4. (a) [Chl-a] medida en función del índice AURI para los datos de Rosarito. (b) Mapa de [Chl-a] del embalse Rosarito para el día 15 de junio de 2004 aplicando el modelo AURI.

4.2.1 Aplicación del índice AURI a Barrancabermeja y La Albufera

El modelo obtenido fue aplicado para las zonas de Barrancabermeja y La Albufera con los datos descritos anteriormente, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 5.

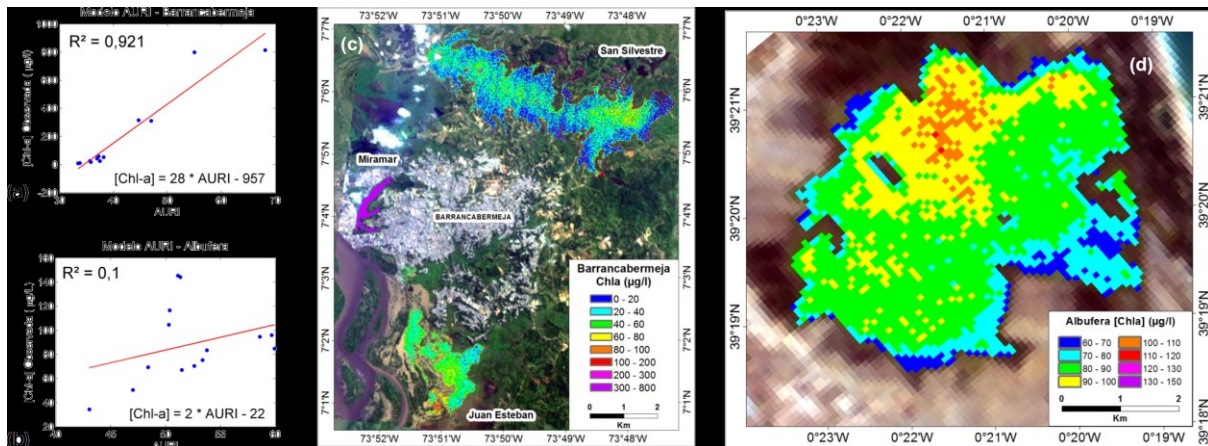


Figura 5. (a) Ajuste lineal del índice AURI en función de [Chl-a] medida para los datos de Barrancabermeja y (b) La Albufera. (c) Mapa de [Chl-a] de los tres lagos de Barrancabermeja aplicando el índice AURI. (d) Mapa de [Chl-a] de la zona de La Albufera aplicando el índice AURI

Se observa que el modelo AURI, al igual que el modelo Tribanda, no se ajusta para los datos de la Albufera, mientras que para la zona de Barranca presenta una muy buena correlación. Comparando los mapas de la Figura 5 con los de la Figura 3 observamos que el mapa de la Albufera es prácticamente igual con ambos métodos, pero los valores de [Chl-a] de los lagos de Barranca son inferiores en la Figura 5 que en la 3: en la Figura 5, los valores de Miramar están entre 200 y 800, en Juan Esteban entre 0 y 70 y en San Silvestre entre 0 y 60 µg/l.

5. Conclusiones

A partir de los datos de reflectividad y [Chl-a] de Rosarito, se observa que la mejor correlación con el Modelo Tribanda se obtiene con $\lambda_1 = 672$, $\lambda_2 = 689$ y $\lambda_3 = 780$. Con esta combinación de bandas, el método puede ser calibrado para la estimación de [Chl-a] tanto en Rosarito como en los lagos de Barrancabermeja, aunque para la Albufera no se ha obtenido una correlación tan alta, posiblemente debido al gran tamaño del pixel de HICO (90 m) que

hace que al comparar un pixel con un valor puntual se introduzca incertidumbre, sobre todo en lagos que presentan gran variación espacial como la Albufera.

Se propone un nuevo método basado en el índice AURI (Area Under Reflectance curve Index). Se ha determinado que los límites de integración idóneos para calcular el área bajo la curva de reflectancia son 672 y 706 nm y que se obtiene buena correlación con la [Chl-a] dividiendo la integral por la reflectividad obtenida en 672 nm, que además coincide con un mínimo relativo en la curva típica de reflectividad del agua continental, mientras que el límite superior de integración (711 nm) coincide con el valor a partir del cual la clorofila-a deja de absorber radiación. El método se ha calibrado con datos de los tres lagos de Barrancabermeja y se ha obtenido un mapa de [Chl-a] a partir de una imagen CHRIS/PROBA obteniendo resultados coincidentes con los rangos de cada lago. De la misma manera se calibró con espectros obtenidos de imágenes HICO y datos de campo de la Albufera, aunque en este caso la correlación fue baja, seguramente por la razón expuesta anteriormente.

Ambos métodos, debidamente calibrados con datos de campo, abren nuevas vías en el estudio de la [Chl-a] en aguas continentales por teledetección.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Dr. Eduardo Vicente, Director del Grupo de Ecología de la Universidad de Valencia, su valiosa colaboración y la cesión de los datos de la Albufera, y al CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) por la cesión de los datos del embalse de Rosarito.

Referencias

- Contreras, C. J. **Modelo para la estimación de la concentración de clorofila a en el embalse Rosarito mediante técnicas de teledetección**. (Trabajo Final de Máster en Teledetección) - Universidad de Valencia. 2010.
- Dall'Olmo, G.; Gitelson, A.; Rundquist, D. Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters. **Geophysical Research Letters**. v. 30, n. 18, 2003.
- Delegido, J.; Alonso, L.; González, G.; Moreno, J. Estimating chlorophyll content of crops from hyperspectral data using a normalized area over reflectance curve (NAOC). **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. v. 12, p. 165–174, 2010.
- Fernández, V. **Estimación de la clorofila-a en el lago de la Albufera (Valencia) a partir de imágenes hiperespectrales CASI. Aplicación a los futuros satélites Sentinel-2 y Sentinel-3**. (Trabajo Final de Máster en Teledetección) - Universidad de Valencia. 2012.
- Gitelson, A.; Gritz, Y.; Merzlyak, M. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. **Journal of Plant Physiology**. v. 160, n. 3, p. 271-282, 2003.
- Gregor, J.; Maršálek, B. Freshwater Phytoplankton Quantification by Chlorophyll a: A Comparative Study of in vitro, in vivo and in situ methods. **Water Research**, v. 38, n. 3, p. 517-522, 2004.
- ISO 10260. **Water quality - Measurement of biochemical parameters - Spectrometric determination of the chlorophyll-a concentration**. 1992.
- Mobley, C. D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. **Applied Optics**, v. 38, n. 36, p. 7442-7454, 1999.
- Mueller, J. L.; Morel, A.; Frouin, R.; Davis, C.; Arnone, R.; Carder, K.; Lee, Z.; Steward, R.; Hooker, S.; Mobley, C. D.; McLean, S.; Holben, B.; Miller, M.; Pietras, C.; Knobelspiesse, K. D.; Fargion, G.; Porter, J.; Voss, K. **Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 4, Volume III**. NASA. 2003
- Pinto, A.; Von Sperling, E.; Moreira, R. Chlorophyll-a Determination Via Continuous Measurement of Plankton Fluorescence: Methodology Development. **Water Research**, v. 36, n. 16, p. 3977-3981, 2001.
- Ruiz-Verdú, A.; Domínguez-Gómez, J. A.; Peña-Martínez, R. **Use of CHRIS for monitoring water quality in Rosarito reservoir**. Centre for Hydrographic Studies of CEDEX. 2005.