

## Determinación de componentes ópticamente activos en aguas continentales a partir de imágenes Landsat-8

### Determination of Optically Active Constituents in Inland Waters from Landsat-8 Images

*Carolina Tenjo<sup>1</sup>, Antonio Ruiz-Verdú<sup>2</sup>, Jesús Delegido<sup>3</sup>, Ramón Peña<sup>4</sup>, José Moreno<sup>5</sup>*

**Para citar este artículo:** Tenjo, C., Ruiz-Verdú, A., Delegido, J., Peña R. & Moreno J. (2014). Determinación de componentes ópticamente activos en aguas continentales a partir de imágenes Landsat-8. *UD y la Geomática*, (9), pp 37-46

**Fecha de recepción:** 30 de septiembre de 2014

**Fecha de aceptación:** 9 de diciembre 2014.

#### RESUMEN

Para investigar las nuevas posibilidades que abre la misión Landsat-8 en los estudios calidad de las aguas, se generó, mediante el modelo de transferencia radiativa HydroLight, una extensa base de datos de reflectividades, simuladas a partir de un amplio rango de concentraciones de constituyentes ópticamente activos de los cuerpos de agua.

Con los datos simulados se calcularon índices de bandas espectrales de Landsat-8, a partir de los cuales se obtuvieron modelos de regresión para la estimación de la transparencia del agua y la concentración de clorofila-a. Para mejorar la capacidad predictiva de los modelos se realizó una clasificación previa de los espectros basada en su forma espectral.

Los modelos fueron validados utilizando datos medidos en varios lagos de España, destacando que, incluso en aguas claras con baja concentración de clorofila-a, fue posible estimar las variables consideradas con un error aceptable para la mayoría de las posibles aplicaciones de los mapas de calidad. La aplicación de estos modelos supone un avance en el estudio de la calidad de las aguas continentales, ya que la resolución espacial de Landsat-8 (<30 m) permite estudiar cuerpos de agua de poca superficie, con un tiempo de revisita mínimo de 16 días.

**Palabras clave:** aguas continentales, clorofila-a, profundidad Secchi, Landsat-8

#### ABSTRACT

In order to investigate the new possibilities of the Landsat-8 mission in inland water quality studies, we generated an extensive database of reflectances with the radiative transfer model HydroLight, using a wide range of concentrations of optically active constituents as inputs.

With the simulated data, we calculated spectral indices for Landsat-8, from which we obtained regression models for the estimation of water transparency and chlorophyll-a concentration. For improving the predictive capabilities of the models, we devise a pre-classification of the reflectance spectra, based on its spectral shape.

The models were validated using data measured in several Spanish lakes, with acceptable retrieval errors for the majority of the water quality applications, even in clear waters with low chlorophyll-a concentration. The application of those models represents and advance in the study of inland water quality, since the spatial resolution of Landsat-8 (< 30 m) allows the study of small water bodies, with a minimum revisit time of 16 days.

**Key words:** inland waters, chlorophyll-a, Secchi depth, Landsat-8

<sup>1</sup> Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universidad de Valencia. C/ Catedrático José Beltrán, 2 46980 Paterna, Valencia – España. [Nancy.tenjo@uv.es](mailto:Nancy.tenjo@uv.es)

<sup>2</sup> Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universidad de Valencia. C/ Catedrático José Beltrán, 2. 46980 Paterna, Valencia-España. [antonio.ruiz@uv.es](mailto:antonio.ruiz@uv.es)

<sup>3</sup> Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universidad de Valencia. C/ Catedrático José Beltrán, 46980 Paterna, Valencia-España. [jesus.delegido@uv.es](mailto:jesus.delegido@uv.es)

<sup>4</sup> Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universidad de Valencia. C/ Catedrático José Beltrán, 2. 46980 Paterna, Valencia-España. [rpenamart@yahoo.es](mailto:rpenamart@yahoo.es)

<sup>5</sup> Laboratorio de Procesado de Imágenes, Universidad de Valencia. C/ Catedrático José Beltrán, 2. 46980 Paterna, Valencia – España [jose.moreno@uv.es](mailto:jose.moreno@uv.es)

## 1. Introducción

Uno de los principales indicadores de calidad del agua es la biomasa y la composición del fitoplancton. El impacto de actividades antrópicas suele ocasionar un aumento en la concentración de nitratos y fosfatos en el agua, que actúan como nutrientes para el fitoplancton, produciendo un incremento notable de su biomasa. Este proceso, conocido como *eutrofización*, tiene consecuencias negativas en cuanto a la potabilidad del agua se refiere. En muchos casos, los crecimientos masivos (*blooms*) del fitoplancton, se producen por cianobacterias, las cuales producen toxinas que afectan otros organismos y limitan gravemente los usos del agua. Uno de los parámetros más utilizados para determinar el nivel de eutrofización en el agua es la concentración de clorofila-a [Chla], que es el principal pigmento fotosintético presente en las algas (Gregor & Marsálek, 2004). La profundidad del disco de Secchi (SD) es una medida de la transparencia del agua ampliamente utilizada, que es inversamente proporcional a la suma de la [Chla], de los sólidos minerales en suspensión (SMS) y de la materia orgánica coloreada disuelta (CDOM) (Ruiz-Verdú, Simis, de Hoyos, Gons & Peña-Martínez, 2008).

La concentración de los diferentes componentes ópticamente activos (OAC) de las masas de agua puede obtenerse a partir del estudio de sus propiedades ópticas *inherentes* (IOP), como los coeficientes de absorción y dispersión o la distribución angular (función de fase) de la dispersión. Por otro lado, los sensores remotos proporcionan información de las propiedades ópticas *aparentes* de una masa de agua (AOP), como la reflectividad, que dependen de las IOP, de las condiciones de iluminación (ángulos solares) y de la geometría de observación.

La relación entre las concentraciones de OAC ([Chla], SMS o CDOM) y las AOP (reflectividades del agua) puede obtenerse mediante *modelos de transferencia radiativa*, que simulan la interacción de la luz solar incidente con el medio acuático. Estas herramientas son usadas habitualmente en estudios de aguas oceánicas, pero su uso en aguas continentales ha sido hasta ahora mucho más limitado. Y no han sido aplicados nunca a sensores multiespectrales como los de la serie Landsat. Su uso en estos casos puede ser de gran utilidad en la modelización de la calidad del agua y en la evaluación de la potencialidad y limitaciones de dichos sensores.

El nuevo Landsat-8, lanzado en febrero de 2013, incorpora dos nuevos instrumentos. El primero de ellos, denominado OLI (Operational Land Imager) hereda las bandas espectrales de sus antecesores (ETM+ de Landsat-7) e incluye tres nuevas bandas: una en la franja del azul (banda 1–440 nm), diseñada especialmente para la determinación de los aerosoles, otra en la franja del infrarrojo de onda corta (banda 9–1370 nm) utilizada en la detección de cirros y otras nubes altas, y una banda de calidad (Quality Assessment–QA). El segundo instrumento es TIRS (Thermal Infrared Sensor) que proporciona dos bandas en la franja del térmico. Radiométricamente, ambos sensores mejoran

la relación señal/ruido, cuantificada en un rango dinámico de 12 bits, en comparación con los instrumentos anteriores de 8 bits. Esto es especialmente relevante en el estudio de las masas de agua, caracterizadas por reflectividades muy bajas, ya es posible medir, con una aceptable relación señal-ruido, incrementos muy pequeños de reflectividad que no era posible medir anteriormente en los sensores Landsat previos. Otras ventajas que ofrece Landsat-8, son su alta resolución espacial (15–30 m/pixel) y su corto periodo de revisita (mínimo 16 días) (USGS, 2014). Es importante resaltar, que aunque los diferentes Landsat no eran idóneos para el monitoreo de aguas, han permitido realizar estimaciones con errores aceptables mediante modelos empíricos, calibrados con datos de una o unas pocas masas de agua (Matthews, 2011; Odermatt, Gitelson, Brandon & Schaepman, 2012), aun cuando esos modelos no fueran extrapolables a otros medios acuáticos diferentes.

El principal objetivo de este trabajo es la obtención de modelos para la estimación de [Chla] y SD a partir de reflectividades simuladas a las bandas de Landsat-8, utilizando el modelo de transferencia radiativa para agua HydroLight (Mobley, 1989). Dichas simulaciones se hicieron teniendo en cuenta que las masas de agua continentales son bastante variables en su composición. Los métodos obtenidos fueron validados con datos reales de imágenes Landsat-8 y medidas in situ en diferentes lagos y embalses españoles.

## 2. Metodología y materiales

HydroLight es un modelo de transferencia radiativa que calcula la distribución de la radiancia y otras variables derivadas (irradiancias, reflectividades, etc.) en cualquier cuerpo de agua, dependiendo de sus OAC y de las condiciones de iluminación, permitiendo simular la reflectividad que mediría en la superficie del agua cualquier sensor, siempre que conozcamos su caracterización espectral.

### 2.1 Reflectividades simuladas

Para este trabajo, se realizaron simulaciones de espectros de Landsat-8, utilizando HydroLight, con un ángulo solar cenital constante (30°), [Chla] que varía de 0.05 a 200 mg/m<sup>3</sup>, SMS que varía de 0 a 100 g/m<sup>3</sup> y CDOM que varía de 0 a 5 m<sup>-1</sup>.

En la figura 1 se muestran algunos espectros típicos de agua, resultantes de la simulación con HydroLight, y su correspondencia con Landsat-8. Se observa que, aunque Landsat no reproduce los espectros continuos, algunas características de dichos espectros continuos permanecen en los espectros de Landsat-8. Esto indica que parte de la información espectral de los espectros originales está todavía contenida en los espectros de Landsat-8, siendo potencialmente factible su extracción.

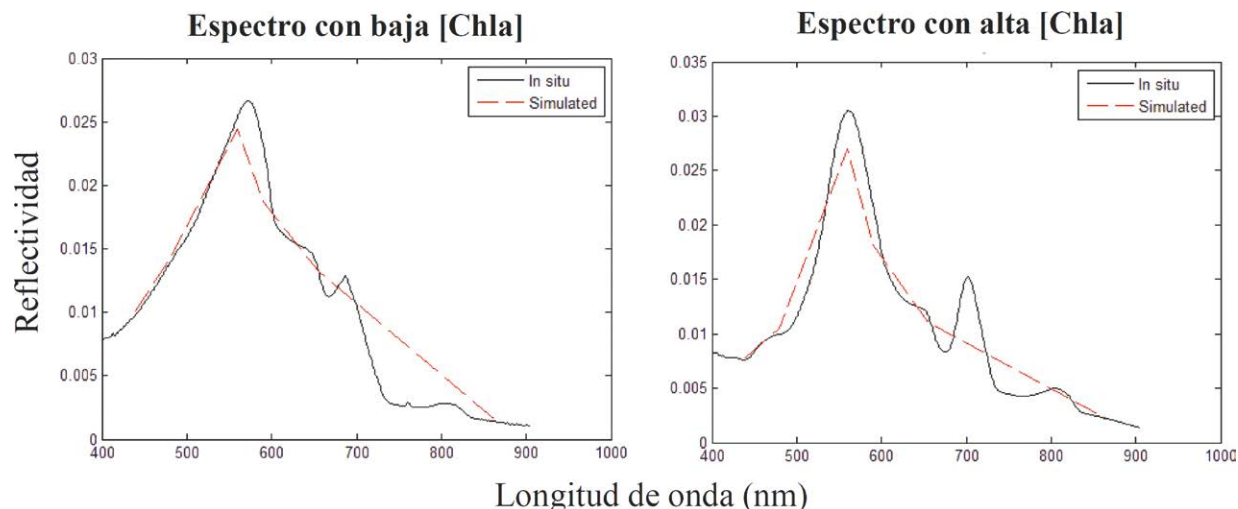


Figura 1. Espectros típicos de agua (negro) comparado con el espectro simulado con las bandas de Landsat-8

2.1.1 Datos de campo

Para validar los modelos obtenidos, se utilizaron 41 datos de [Chla] y SD medidos en 27 lagos y embalses de España a lo largo de 2013 (figura 2), con las medidas de reflectividad de dichos lagos, tomadas de imágenes Landsat-8 corregidas

atmosféricamente con el método QUAC (QUick Atmospheric Correction) (Bernstein, Sundberg, Levine, Perkins & Berk, 2005). Los valores determinados in situ y las fechas de adquisición de las imágenes Landsat-8 más cercanas a dichas medidas están reflejadas en la tabla 1.

Tabla 1. Medidas promedio de [Chla] y SD para cada lago

Lago	Fecha medida	[Chla] (µg/l)	SD (m)	Fecha Landsat	Lago	Fecha medida	[Chla] (µg/l)	SD (m)	Fecha Landsat
La Albufera	18/04/2013	149.67	-	23/04/2013	Ebro	16/07/2013	1.86	5.00	17/07/2013
		195.88	-		Escales	06/08/2013	2.57	6.80	04/08/2013
		121.49	-		Eugui	24/07/2013	2.50	6.60	26/07/2013
		185.04	-		Gallipuen	19/06/2013	4.15	4.00	17/06/2013
	01/08/2013	-	0.25	04/08/2013	Grado	16/09/2013	1.22	7.30	05/09/2013
		-	0.31		Guiamets	25/06/2013	5.68	2.05	26/06/2013
		-	0.39		Itoiz	23/07/2013	1.39	7.5	26/07/2013
		-	0.35		Lanuza	27/08/2013	1.56	4.35	20/08/2013
	15/08/2013	-	0.32	23/10/2013	Lechago	17/06/2013	1.52	3.30	24/06/2013
		-	0.35		La Loteta	28/08/2013	1.75	0.90	20/08/2013
		-	0.28		Mediano	17/09/2013	1.84	2.80	05/09/2013
		-	0.30		Mequinenza	23/08/2013	5.25	4.70	20/08/2013
	21/10/2013	-	0.27	23/10/2013	Ortigosa	17/07/2013	1.87	6.80	17/07/2013
		-	0.27		Pena	20/06/2013	2.59	2.52	26/06/2013
		-	0.27		La Peña	09/07/2013	1.96	1.2	10/07/2013
		-	0.27		Sabiñánigo	28/08/2013	0.01	2.60	05/09/2013
Alloz	23/07/2013	1.75	4.20	17/07/2013	La Sotonera	09/07/2013	1.19	3.60	10/07/2013
Baserca	24/09/2013	0.75	16.00	30/09/2013	Santolea	21/08/2013	1.34	5.85	05/09/2013
Búbal	28/08/2013	2.84	5.8	20/08/2013	Talarn	25/09/2013	4.07	3.22	07/10/2013
Canelles	05/08/2013	1.83	4.00	04/08/2013	Las Torcas	26/06/2013	2.45	3.80	03/07/2013
Cueva Foradada	27/06/2013	7.26	2.70	03/07/2013	El Val	09/09/2013	14.42	1.50	12/09/2013

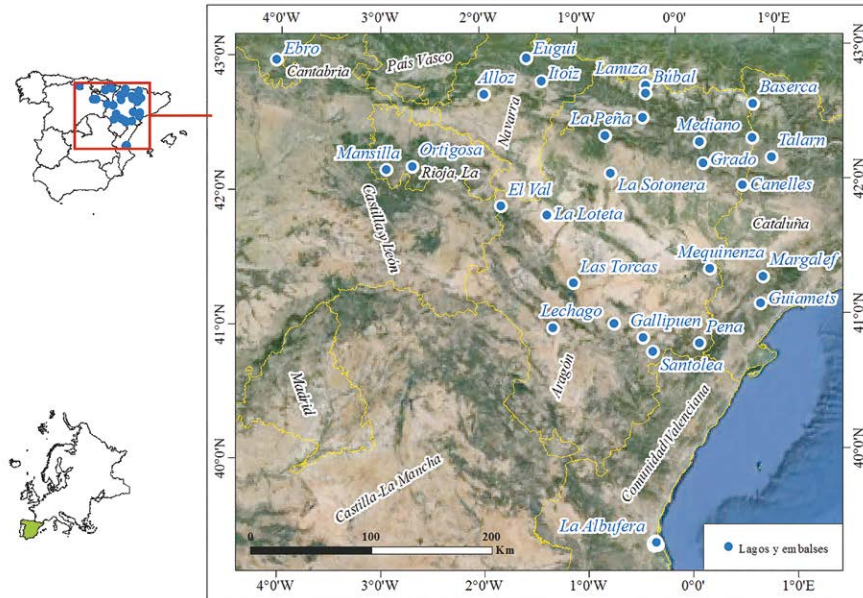


Figura 2. Localización de los lagos y embalses medidos

### 2.1.2 Determinación de modelos

La metodología empleada en este trabajo consistió en obtener cocientes de bandas de la franja del visible-infrarrojo, haciendo todas las combinaciones posibles para encontrar su mejor correlación con SD y [Chla], utilizando los datos simulados, para luego aplicar los modelos obtenidos a los datos de validación. Cabe anotar que las unidades de [Chla]  $\text{mg}/\text{m}^3$  y  $\mu\text{g}/\text{l}$  son equivalentes.

## 3. Resultados

En los espectros simulados se observó que su forma cambia de acuerdo a la concentración de los componentes del agua, pudiendo clasificarse los espectros en tres grandes grupos como se puede observar a continuación en la figura 3.

Los espectros de aguas claras corresponden a masas de agua donde el componente predominante es la clorofila, pero en muy bajas concentraciones ( $< 5 \mu\text{g}/\text{l}$ ). En el caso de los espectros con alta SMS, corresponden a cuerpos de agua donde predominan los minerales en suspensión con respecto a los otros componentes, en concentraciones muy altas ( $> 50 \text{ g}/\text{m}^3$ ). El resto de espectros, denominado *aguas variadas*, engloba una gran variedad de combinaciones de concentraciones para los 3 OAC considerados, aunque ello no se traduce en diferencias significativas en la forma espectral, para la resolución de Landsat-8.

Una vez realizada la clasificación morfológica, se obtuvieron los modelos de determinación de [Chla] y SD para cada grupo:

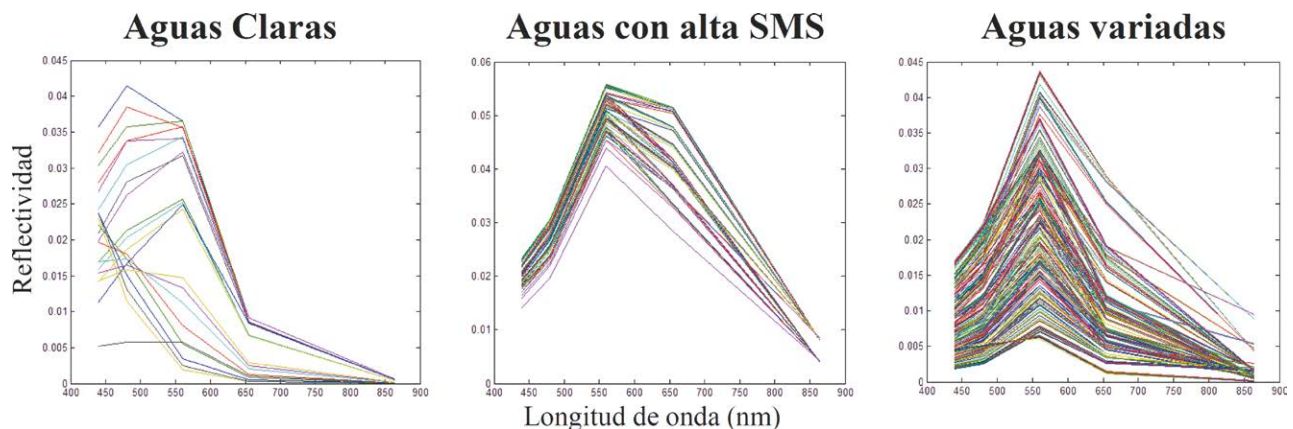


Figura 3. Clasificación de los espectros simulados de agua de Landsat-8 de acuerdo a su forma y composición

### 3.1 Grupo de aguas claras

Las mejores combinaciones de bandas obtenidas para la estimación de [Chla] y SD en aguas claras están dadas por las siguientes expresiones:

$$[Chla] = 4.46 \left( \frac{R560}{R440} \right) - 0.55 \quad (1)$$

$$SD = -22.04 \left( \frac{R560}{R440} \right) + 32.38 \quad (2)$$

En la figura 4 se muestran los resultados, con un  $R^2$  de 0.97 y un RRMSE del 17% para [Chla] y un  $R^2$  de 0.98 y un RRMSE del 6% para SD.

Los resultados estadísticos obtenidos son aceptables, teniendo en cuenta las limitaciones comentadas de Landsat-8, y a pesar de que la estimación de [Chla] es complicada en las concentraciones más bajas, Landsat-8 permitirá realizar una estimación cuantitativa con una precisión aceptable.

### 3.2 Grupo de aguas con alto contenido de SMS

La mejor combinación de bandas obtenida para la estimación de [Chla] en este grupo está dada por la siguiente expresión (figura 5):

$$[Chla] = 306.62 \left( \frac{R865}{R655} \right) - 20.38 \quad (3)$$

$$SD = -0.517 \left( \frac{R560}{R440} \right) + 1.46 \quad (4)$$

Los resultados estadísticos obtenidos son buenos para este grupo de espectros, con un  $R^2 = 0.98$  y RRMSE = 8% para [Chla] y un  $R^2 = 0.77$  y RRMSE = 14% para SD. Aunque aparentemente solo hay tres puntos en la gráfica de la [Chla] en función del índice (primera gráfica de la izquierda de la figura 5), realmente son 12 el número de puntos (segunda gráfica), pero aparecen superpuestos en la primera figura.

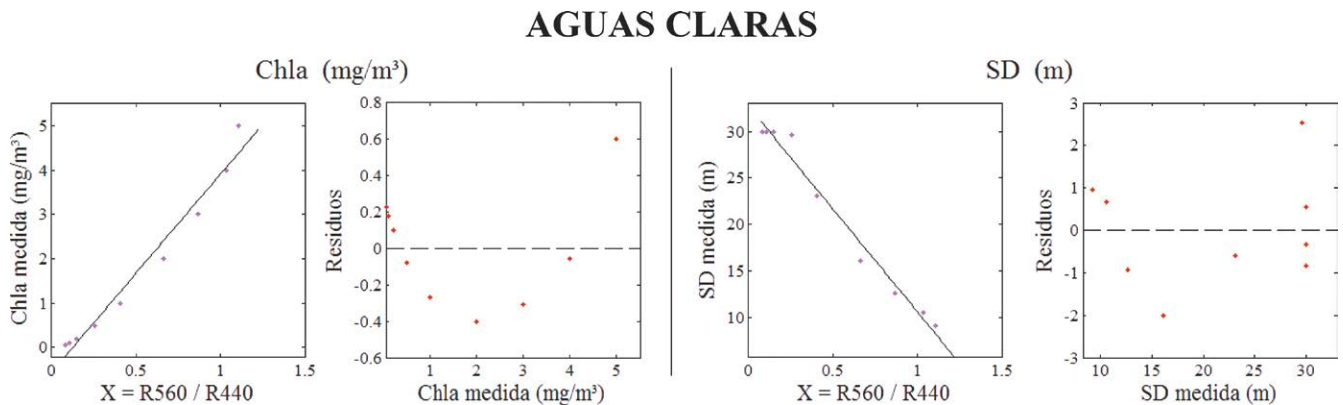


Figura 4. Modelos obtenidos para la estimación de [Chla] (izquierda) y SD (derecha) en aguas claras

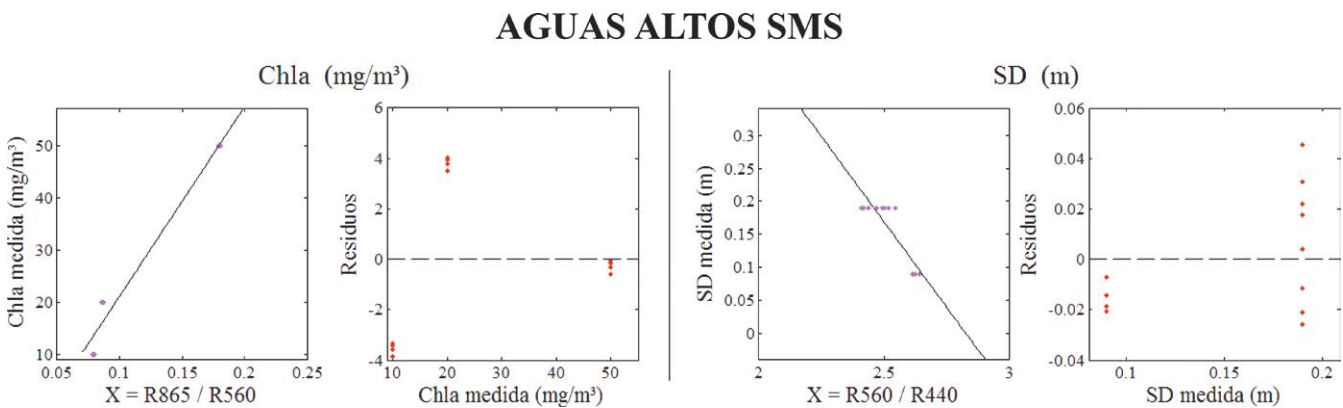


Figura 5. Modelos obtenidos para la estimación de [Chla] (izquierda) y SD (derecha) en aguas con alto contenido en SMS

3.3 Grupo de aguas con concentraciones variables de los componentes

Como se observa en la figura 6, la mejor combinación de bandas obtenida para la estimación de [Chla] y SD en este grupo está dada por las siguientes expresiones:

$$[Chla] = 431.46e^{-0.166\left(\frac{R560}{R865}\right)} \quad (5)$$

$$SD = 100.993e^{-12.93\left(\frac{R655}{R560}\right)} \quad (6)$$

Los resultados estadísticos obtenidos son aceptables para este grupo de espectros, con un  $R^2 = 0.93$  y un  $RRMSE = 38\%$  para [Chla] y un  $R^2 = 0.75$  y un  $RRMSE = 32\%$  para SD. Se observa en el caso de SD, que cuando los valores son muy bajos, la tendencia de la exponencial se invierte. Por esta razón, se realizó un ajuste, con los datos

con valores bajos, obteniendo la siguiente expresión que aparece representada a continuación en la figura 7:

$$SD = 1.4591\left(\frac{R655}{R560}\right) - 0.28805 \quad (7)$$

Para este grupo de aguas muy turbias, se obtuvo un  $R^2 = 0.91$  y un  $RRMSE = 2\%$  para SD.

3.4 Validación de resultados

De acuerdo a la tabla 1, se observa que los datos experimentales de los que disponemos se pueden dividir en dos grupos, basados en [Chla] y SD, y en su forma espectral, que se muestra en la figura 8: aguas claras y aguas de composición variable, perteneciendo a este último únicamente los datos de La Albufera. Las formas espectrales de cada grupo corresponden con las formas espectrales definidas con los datos simulados (figura 3).

AGUAS VARIABLES

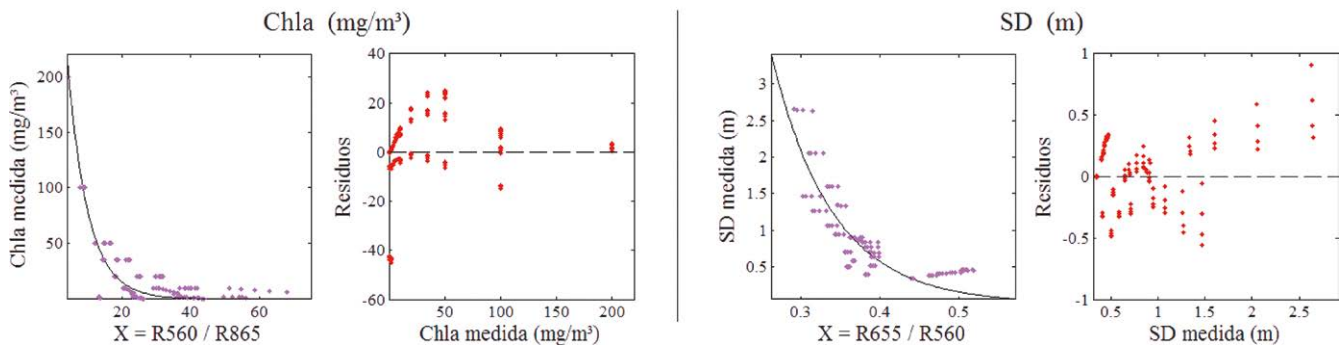


Figura 6. Modelos obtenidos para la estimación de [Chla] (izquierda) y SD (derecha) en aguas con concentraciones de componentes variables

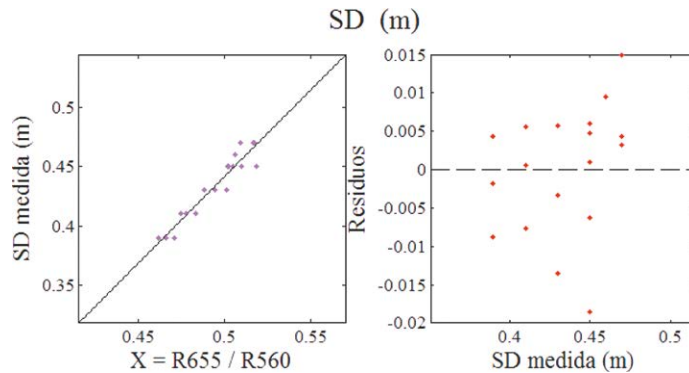


Figura 7. Modelo obtenidos para la estimación de SD en aguas muy turbias

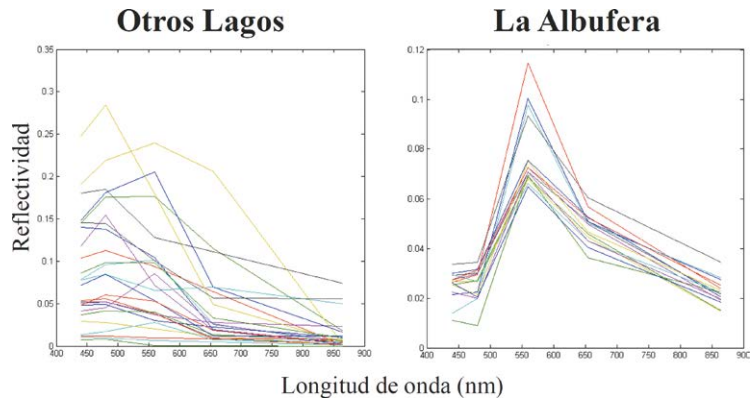


Figura 8. Morfología de los espectros de validación

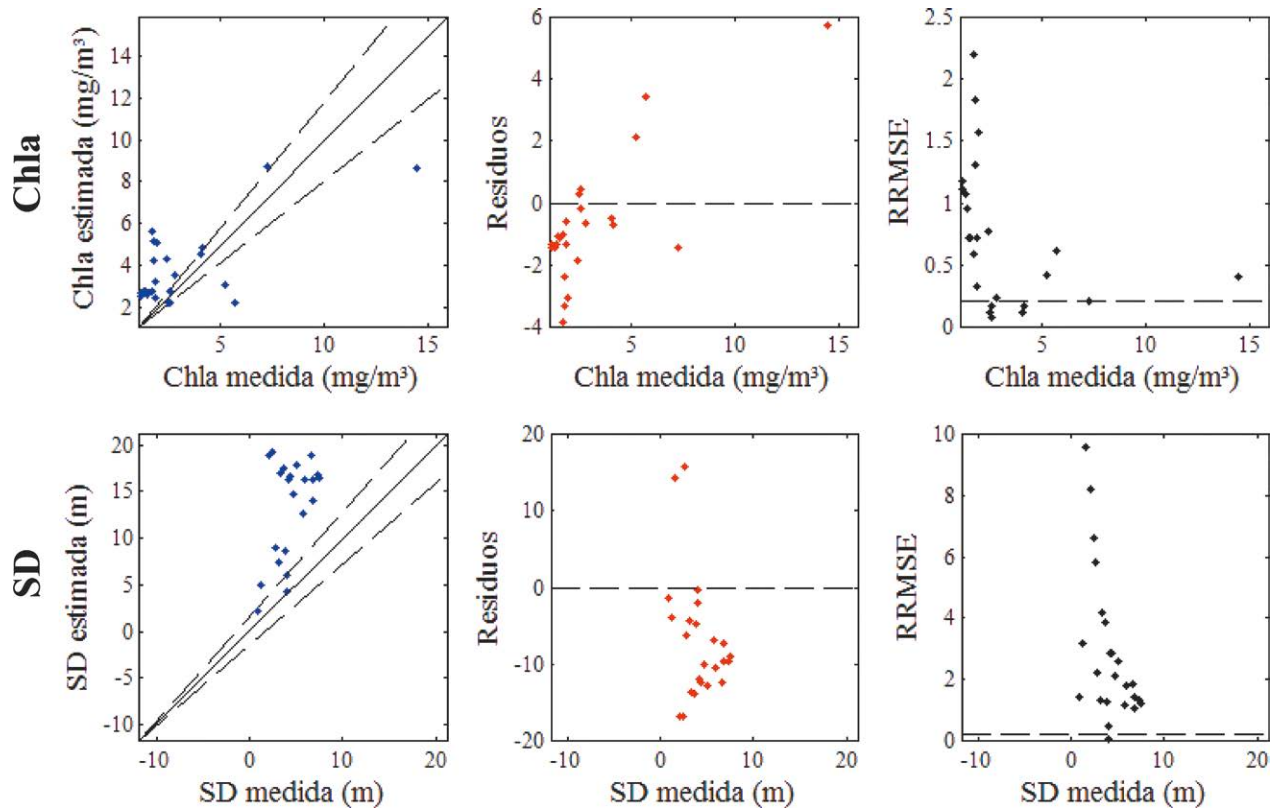


Figura 9. Resultados obtenidos para [Chla] (arriba) y SD (abajo) con el modelo de aguas claras

Los modelos para aguas con alto contenido de SMS no fueron validados, porque no se cuenta con muestras de estas características.

Los modelos obtenidos para la estimación de [Chla] y SD fueron aplicados, de acuerdo al grupo de datos, obteniendo los siguientes resultados para el grupo de lagos y embalses de aguas claras (figura 9) y el grupo de lagos de aguas con combinaciones variables (figura 10):

Los errores obtenidos al aplicar los modelos en los datos de validación de aguas claras muestran errores

relativamente altos en la estimación (un  $R^2$  de 0.47 y un RRMSE del 70% para [Chla] y un  $R^2$  de 0.28 y un RRMSE del 250% para SD). Hay que tener en cuenta, no obstante, que es muy probable que una gran proporción de estos errores no se deba a una mala formulación del modelo. Las principales fuentes de error hay que buscarlas en el proceso de las imágenes y en las diferencias entre la fecha de medida de los datos *in situ* y de adquisición de las imágenes.

Para los datos de La Albufera se obtuvo lo siguiente:

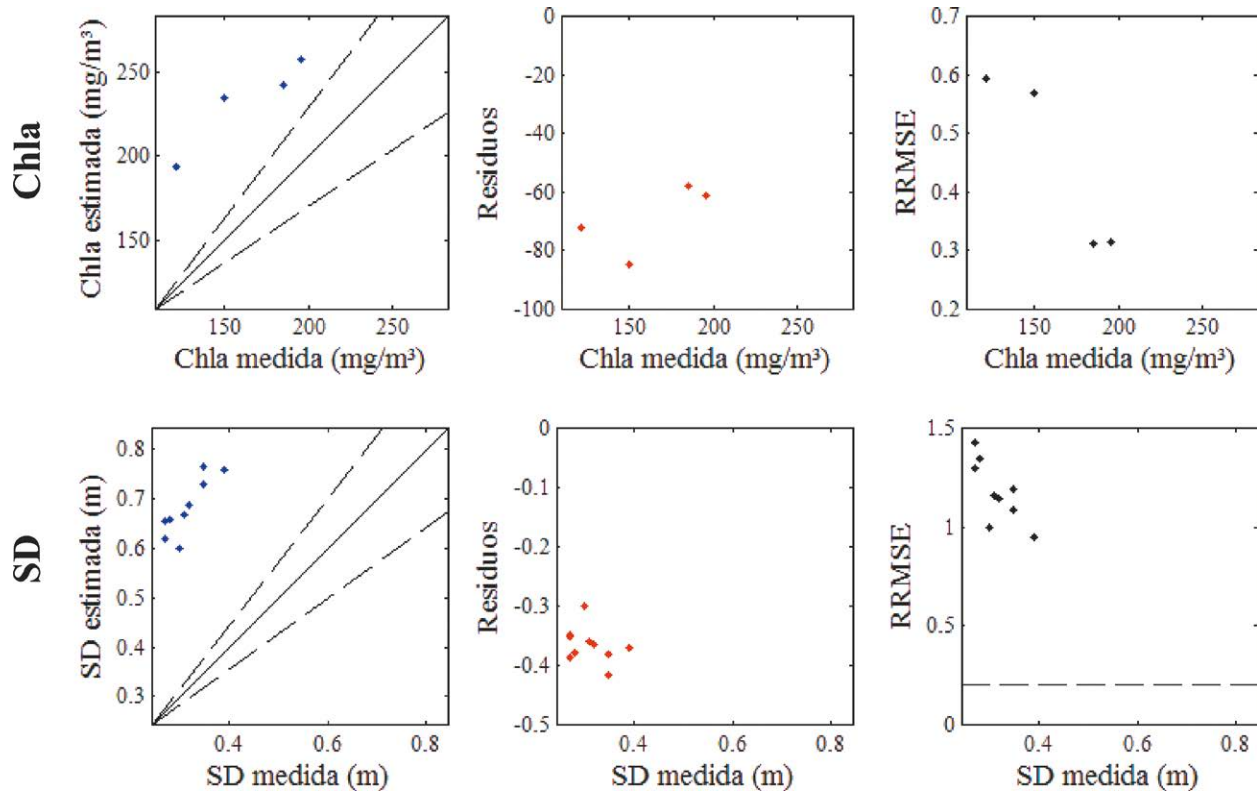


Figura 10. Resultados obtenidos para [Chla] (arriba) y sd (abajo) con el modelo de aguas con combinaciones variables

El en caso de SD, se aplicó el modelo de la ecuación 7, obteniendo un  $R^2$  de 0.88 y un RRMSE del 43% para [Chla] y un  $R^2$  de 0.76 y un RRMSE del 118% para SD. Se observa una sobreestimación de las dos variables, aunque se mantiene la linealidad en la correlación con los datos estimados. Para obtener un resultado más preciso en este lago específico, se realizó un ajuste de los coeficientes (Figura 11), obteniendo lo siguiente:

$$[Chla] = 485.44e^{-0.2947\left(\frac{R560}{R865}\right)} \quad (8)$$

$$SD = 0.9012\left(\frac{R655}{R560}\right) - 0.284; \quad (9)$$

Con dicho reajuste se obtiene un  $R^2$  de 0.9 y un RRMSE del 6% para [Chla] y un  $R^2$  de 0.77 y un RRMSE del 6% para SD:

### AJUSTE DE COEFICIENTES PARA LA ALBUFERA

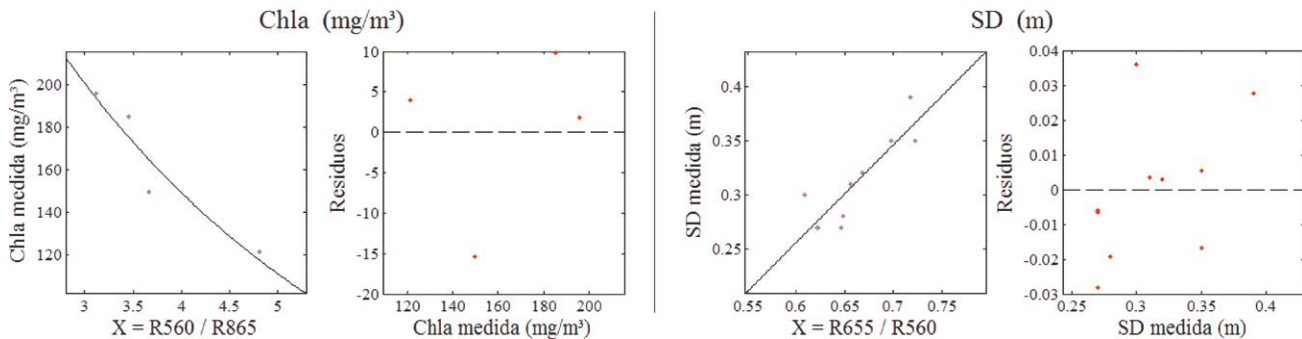


Figura 11. Ajuste de coeficientes para La Albufera de Valencia, ecuaciones (8) y (9)



#### 4. Discusión y conclusiones

En las aguas claras los modelos obtenidos se basan en la conocida relación entre la reflectividad en el azul (R440 y R480), que es la zona de máxima absorción de la clorofila-a), con la reflectividad en el verde (R560), que es una franja de mínima absorción de pigmentos. Los modelos son por tanto congruentes con los que se obtienen en aguas oceánicas para sensores de color del océano.

Hay que tener en cuenta que los relativamente elevados errores obtenidos en la validación de los modelos de aguas claras son, en parte, el producto de errores derivados del proceso de las imágenes y de las diferencias de fechas entre las medidas in situ y la adquisición de las imágenes. Respecto del proceso de las imágenes, el método de corrección atmosférica es muy simplificado y no tiene en cuenta además la posible presencia de *sun glint* (reflejos especulares de luz solar en la superficie del agua, que contaminan la señal observada). Y en cuanto a los datos de campo, de los que se desconoce su error de medida, la diferencia con la fecha de adquisición de las imágenes es en muchos casos demasiado grande como para asumir que la masa de agua no ha experimentado cambios para las variables consideradas. Por otra parte, el elevado dinamismo de las masas de agua continental hace muy difícil establecer un criterio sencillo de filtrado de las diferencias de fecha.

Teniendo en cuenta estas fuentes adicionales de error, es razonable suponer que con una mejor corrección atmosférica y con una campaña de medidas diseñada específicamente para la validación de las imágenes, los errores en la aplicación del modelo hubieran sido mucho menores. Y pese a todo, es destacable que en la validación resumida en la figura 8 se observe una cierta linealidad entre los datos medidos y estimados.

En las aguas turbias, en las que la respuesta espectral es debida sobre todo a las partículas minerales en suspensión (SMS), las reflectividades más altas son en el verde (R560) y en el rojo (R655). Este comportamiento espectral puede variar dependiendo del tipo de mineral que se encuentre en el agua. Para este caso, la estimación de [Chla] está dada por una "normalización" con respecto a la banda del verde (R655), lo cual de alguna manera "filtra" la información espectral proporcionada por el contenido de SMS. En el caso de SD, se mantiene la misma relación de bandas que en el grupo anterior. Esto se debe posiblemente, a que SD, depende más de [Chla], que de SMS.

En las aguas con combinaciones variables de los OAC, el pico máximo de reflectividad se encuentra siempre en la banda del verde, y se asocia a la zona de mínima absorción de la clorofila-a [Chla]. La reflectividad en el NIR (R865), se correlaciona con un incremento en la dispersión de partículas, por lo que tiende a aumentar cuando aumenta [Chla], ya que la biomasa del fitoplancton aumenta. No obstante los SMS también contribuyen a ese incremento en el NIR.

En cualquier caso, se observa una buena correlación entre el cociente de las bandas verde (R560) e infrarroja (865) y [Chla] para este grupo de aguas (con concentraciones no muy elevadas de SMS). En el caso de SD se obtiene una relación parecida, aunque en este caso tiene más peso la banda del rojo (R655).

Teniendo en cuenta las limitaciones espectrales de Landsat para realizar estudios de agua, los modelos obtenidos en este trabajo, permiten estimar de forma cuantitativa [Chla] y SD con errores aceptables, con mayor precisión en aguas hipertróficas. La implementación de estos modelos, permiten realizar estudios multitemporales de una o varias masas de agua de diferente composición, y así determinar un patrón de comportamiento de las mismas para su control de calidad.

Esta metodología es aplicable a otros sensores multiespectrales que por su configuración espectral proporcionarán resultados más ajustados, como es el caso de los futuros Sentinel 2 y 3.

#### Agradecimientos

Al Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial de España (INTA), que puso a nuestra disposición el software HydroLight. Y a la profesora María Rosa Miracle, de la Universidad de Valencia, que suministró la base de datos obtenida en el marco del proyecto MICINN FEDER I+D Ref.: CGL2009-12229.

#### Referencias

- Bernstein, L. S., Sundberg, R. L., Levine, R. Y., Perkins, T. C. & Berk, A. (2005). A New Method for Atmospheric Correction and Aerosol Optical Property Retrieval for VIS-SWIR Multi- and Hyperspectral Imaging Sensors : QUAC (QUick Atmospheric Correction). In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05. Proceedings. 2005 IEEE International* (Vol. 00, pp. 3549–3552).
- Gregor, J. & Marsálek, B. (2004). Freshwater phytoplankton quantification by chlorophyll a: a comparative study of in vitro, in vivo and in situ methods. *Water Research*, 38(3), 517–22. doi:10.1016/j.watres.2003.10.033
- Matthews, M. W. (2011). A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters. *International Journal of Remote Sensing*, 32(21), 6855–6899. doi:http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2010.512947
- Mobley, C. D. (1989). A numerical model for the computation of radiance distributions in natural waters with wind-roughened surfaces. *Limnology and Oceanography*, 34(8), 1473–1483. doi:10.4319/lo.1989.34.8.1473

- Odermatt, D., Gitelson, A., Brando, V. E. & Schaepman, M. (2012). Review of constituent retrieval in optically deep and complex waters from satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 118, 116–126. doi:10.1016/j.rse.2011.11.013
- Ruiz-Verdú, A., Simis, S. G. H., de Hoyos, C., Gons, H. J. & Peña-Martínez, R. (2008). An evaluation of algorithms for the remote sensing of cyanobacterial biomass. *Remote Sensing of Environment*, 112(11), 3996–4008. doi:10.1016/j.rse.2007.11.019
- USGS (2014). USG-Landsat Missions. [Proyecto de recolección de datos de sensores remotos de resolución moderada]. Recuperado de <http://landsat.usgs.gov>.

