

# Seguimiento del estado ecológico de las aguas continentales superficiales españolas mediante imágenes MERIS

## *Monitoring the ecological state in Spanish inland water using MERIS images*

J. A. Domínguez<sup>1</sup>, C. Arancón<sup>2</sup>, C. Alonso<sup>1</sup>, A. Alonso<sup>1</sup>, C. de Hoyos<sup>1</sup> y A. Quesada<sup>2</sup>  
jose.a.dominguez@cedex.es jadomin@dfmf.uned.es

<sup>1</sup> Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX). P.º Bajo Virgen del Puerto, 3. 28005 Madrid

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de Madrid. Departamento de Biología

Recibido el 03 de marzo de 2010, aceptado el 20 de mayo de 2010

### RESUMEN

La teledetección tiene como uno de sus objetivos poder proporcionar información de utilidad en el menor tiempo posible para la toma de decisiones. En esta línea se han realizado multitud de estudios de teledetección en calidad de agua llegando a la conclusión de la necesidad de disponer de un sensor con bandas espectrales estrechas y centradas en las longitudes de ondas apropiadas, con una periodicidad alta y una adecuada resolución espacial. El sensor MERIS reúne casi todas estas características, siendo su resolución espacial (300 m) la más crítica. Aprovechando las facilidades que proporciona la ESA para la realización de investigaciones con imágenes de los sensores de ENVISAT, durante los últimos años se han realizado las investigaciones necesarias y colaboraciones en todas las áreas (radiometría de campo, corrección atmosférica, desarrollo de algoritmos y software) para poder proporcionar en el menor tiempo (1 hora desde la recepción de la imagen) una cartografía fiable en calidad de agua. A continuación se presenta un resumen de todas las investigaciones así como de la operatividad del sistema.

**PALABRAS CLAVE:** MERIS, cartografía de calidad de aguas, aguas continentales, estado trófico, estado ecológico, Directiva Marco del Agua.

### ABSTRACT

Remote sensing has as an aim to give useful information in the shortest possible time in order to make the taking of decisions easier. This is why so much research on water quality using remote sensing has been done, the conclusion of which implies the necessity of disposing of narrow spectral bands in the appropriate wavelengths, with a high periodicity and the right spatial resolution. MERIS has most of these characteristics, with a critical spatial resolution of 300 metres. Taking advantage of ESA convenience to supply researchers with ENVISAT sensor imagery, in the last years there has been a lot of research in every area (field radiometry, atmospheric correction, algorithm development and software) in order to produce in the shortest possible time (an hour since the reception of imagery) an accurate and trustworthy water quality cartography. A summary of this research and the working of this system are presented below.

**KEY WORDS:** MERIS, water quality cartography, inland water bodies, trophic state, ecological state, Water Framework Directive.

### INTRODUCCION

La orden ministerial ARM/2656/2008 en la cual se produce la adaptación del Reglamento de

la Planificación Hidrológica a los cambios introducidos en el texto refundido de la Ley de Aguas, transposición de la Directiva Marco del Agua 2000/60/CE que establece un marco co-

munitario en política de aguas, define la tipología de la masas de agua, así como los indicadores de calidad hidromorfológica, calidad fisicoquímica y presentación del estado ecológico de las aguas continentales superficiales. El Centro de Estudios Hidrográficos durante el siglo XXI viene realizando diversos proyectos con el fin último de disponer de un sistema operacional de seguimiento del estado ecológico de las masas de aguas continentales eficaz para la gestión de las aguas continentales españolas. Para ello era necesario disponer de un satélite con un resolución espectral, temporal, radiométrica y espacial adecuada. El único sensor que cumple la mayoría de los requerimientos necesarios para realizar este seguimiento es el sensor MERIS instalado en el satélite ENVISAT; la única deficiencia de este sensor es su resolución espacial (300 m), aunque es suficiente para poder realizar el seguimiento del 80% de las masas de agua españolas (Peña *et al.*, 2004).

## METODOLOGÍA

La idea inicial era utilizar imágenes L2, correspondientes a imágenes de reflectividad proporcionadas por la ESA, a las cuales se les aplicarían modelos desarrollados a partir de datos de campo. La diferencia existente entre los valores de reflectividad de las imágenes L2 de MERIS con los valores de reflectividad de agua, en masas de aguas continentales, era tal que se des-

carto su utilización para el seguimiento de parámetros de calidad de agua, por lo que se decidió utilizar nivel L1b de MERIS (Peña *et al.*, 2004). La metodología para implementar el sistema de seguimiento del estado ecológico de las aguas continentales podemos resumirla en:

a) Generación de librería espectral de ecosistemas acuáticos continentales. Los datos a adquirir en campo corresponderían a medidas de reflectividad, medidas de perfiles con sonda multi-paramétrica y muestras del primer espesor óptico para analizar pigmentos mediante HPLC y fitoplancton (Ruiz-Verdú *et al.*, 2008, Domínguez *et al.*, 2008). La reflectividad medida desde una embarcación a una determinada altura respecto a la superficie del agua es:

$$R_{rs} = (L_{sfc} - \rho \cdot L_{sky}) / E_s$$

donde  $E_s$  es la irradiancia solar,  $L_{sfc}$  es la radiancia procedente del agua y  $L_{sky}$  es la radiancia procedente del cielo.

Estas variables se midieron con un espectrorradiómetro ASD-FR un espectralón y con un panel de referencia lambertiano gris del 25%.

A partir de los datos de campo (velocidad del viento) y la información auxiliar (ángulos cenitales solares) se determinan los valores de  $R_{rs}$  a partir del modelo de transferencia radiativa (Mobley 1999).

La sonda multi-paramétrica consta de: CTD y fluorómetros de clorofila-a, materia orgánica disuelta coloreada (CDOM), ficocianina y ficocitrina, así como un turbidímetro y un sensor

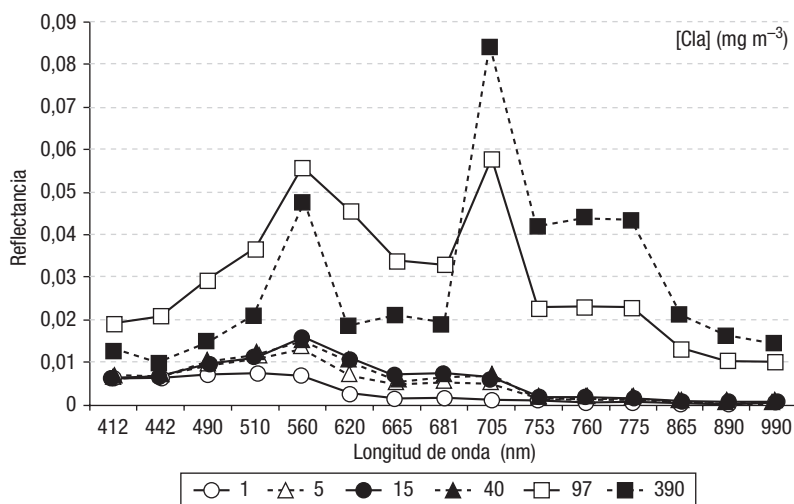


Figura 1. Espectros de campo para diferentes valores de concentración de clorofila-a.

Pigmentos	Grupos taxonómicos
Peridina	Dianoflagelados
Fucoxantina	Diatomeas (algo en dinoflagelados)
Neoxantina	Euglenofíceas (algo en clorofíceas)
Violaxantina	Clorofíceas
Alloxantina	Criptofíceas
Luteína	Clorofíceas
Zeaxantina	Cianobacterias
Clorofila-b	Clorofíceas (algo en uglonofíceas)
Clorofila-a	Todos
Feofitina-a	Todos

**Tabla 1.** Los pigmentos analizados y grupos taxonómicos de algas a los que corresponden.

PAR. El proceso de filtrado de las muestras para el análisis de pigmentos fotosintéticos se realiza mediante una bomba de vacío de baja presión que absorbe el agua de una rampa en la cual se colocan los recipientes con filtros de fibra de vidrio Whatman GF/F de 25 mm de diámetro y 0,7 µm de tamaño medio de poro. El análisis mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) consta de 2 fases, la fase de extracción y el análisis de pigmentos mediante un equipo de cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC), con muestreador automático y detector de Diodo Array, de la casa Hewlett-Packard (actual Agilent), modelo 1050.

b) Desarrollo de algoritmos. Los algoritmos que hasta el momento se han desarrollado son

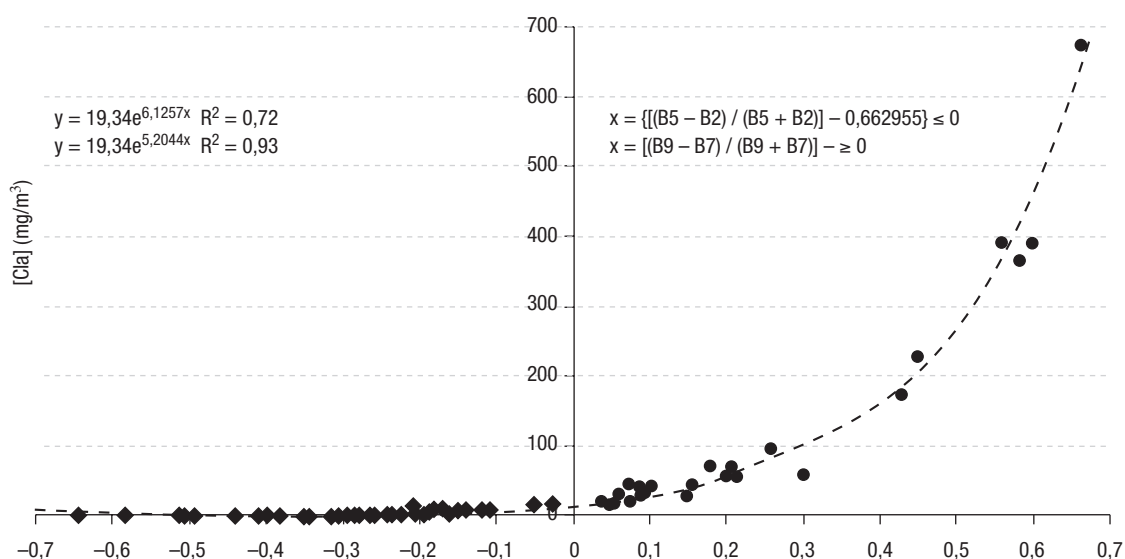
los correspondientes a la concentración de clorofila-a [Cla] y ficocianina [PC].

La concentración de clorofila-a como indicador de biomasa y la concentración de ficocianina, pigmento característico de las cianofíceas, debido a que algunas de ellas son tóxicas (Peña y Domínguez, 2006; Ruiz-Verdú *et al.*, 2008). Los algoritmos se han determinado a partir de datos de campo, en el mismo punto se han medido espectros de agua, que posteriormente se han transformado en espectros de agua correspondientes a las bandas del sensor MERIS, concentración de clorofila-a en muestras posteriormente determinadas en el laboratorio mediante HPLC y medidas «in situ» mediante fluorómetro, previamente calibrado, en el caso de la ficocianina.

El algoritmo de concentración de clorofila-a en función de las bandas MERIS (Fig. 2) corresponde a una función por partes, necesaria debido a que en los espectros de campo en todos se observa el primer mínimo de absorción de la clorofila-a, pero no en todos se observa el segundo, sólo en aquellos en la concentración de clorofila-a es elevada:

— Para valores altos de concentración de clorofila-a y en la cuales se observan con claridad los valores para la cual se utiliza la banda de absorción de la clorofila-a (banda 7) y la fluorescencia de la clorofila-a (banda 9).

— La segunda corresponde a aquellos valores de concentración de clorofila-a bajos y para



**Figura 2.** Analizando los espectros de campo se observa la necesidad de encontrar una función compuesta pero continua para la concentración de clorofila-a ( $p < 0,001$ ,  $n = 78$ ).

los cuales no hay respuesta espectral representativa para las longitudes de ondas de 680 nm y 705 nm, En este caso se utilizaron la banda correspondiente a la absorción de la clorofila-a, (banda 2) y el máximo de reflectividad del verde (banda 5).

El algoritmo utilizado para la concentración de la ficocianina [PC] en función de las bandas MERIS (Peña y Domínguez, 2006):  $[PC] = 46678 \exp\{5.1864 \cdot [(B9 - B6)/(B9 + B6)]\}$   $R^2 = 0.9211$

c) Corrección atmosférica de imágenes L1b. Una buena corrección atmosférica supone una cartografía temática con precisión; supuestamente esta correspondería al nivel L2 de MERIS, sin embargo la ESA no ha podido proporcionar el procesamiento de precisión requerido (Peña *et al.*, 2004). Esta fue la razón por la cual se analizaron los diversos tipos de corrección atmosférica existentes, comparando los espectros obtenidos en campo con los correspondientes a cada una de las correcciones atmosféricas utilizadas en el mismo punto: el nivel L2 de MERIS, ATCOR, SCAPE-M. Se observó que la mejor corrección atmosférica correspondía a la realizada por SCAPE-M. Sin embargo, la banda 2 correspondiente a 442 nm, banda de absorción de la clorofila-a que en los datos de campo corresponde con un mínimo de reflectividad, interesante para poder utilizarla en la determinación de valores bajos de concentración de clorofila-a, presentaba un error excesivo y no deseado. Pa-

ra esta banda se mejoró la corrección en el agua, denominándola (SCAPE-M\_B2), a partir de la comparación de los espectros de campo y la corrección SCAPE-M se determinó un procedimiento de doble corrección atmosférica que consiste en comparar la versión  $\beta$  de SCAPE-M y la definitiva para la banda 2 y restar este último valor menos el primero.

d) Validación de algoritmos en las imágenes MERIS. La validación de los algoritmos de clorofila-a y demás pigmentos fotosintéticos se realizó con la comparación de datos de campo correspondiente a las campañas de campo realizadas en el 2006, para el seguimiento de la evolución temporal de la Perellonada (inundación de las arrozales que circundan el lago de la Albufera) y calidad de las aguas de La Albufera de Valencia (CEDEX, 2007) y las realizadas para la campaña 2007, proyecto de un procesador de aguas continentales eutróficas a nivel europeo para MERIS (Koponen *et al.*, 2008). Los algoritmos obtenidos se aplican a las imágenes L1b de MERIS con la corrección previa atmosférica SCAPE-M-B2 y se comparan con los datos de campo, obteniendo unos errores cuadráticos medios aceptables:  $RMSE[Chl a] = 8,60 \text{ mgm}^{-3}$  y  $RMSE[PC] = 12,92 \text{ mgm}^{-3}$

e) Automatización de la cartografía temática. La distribución de imágenes L1b de MERIS para los proyectos de investigación de la ESA se realiza mediante petición de la imagen a través del programa EOLISA. Este software sólo permite adquirir cuarto de imagen total y el tiempo

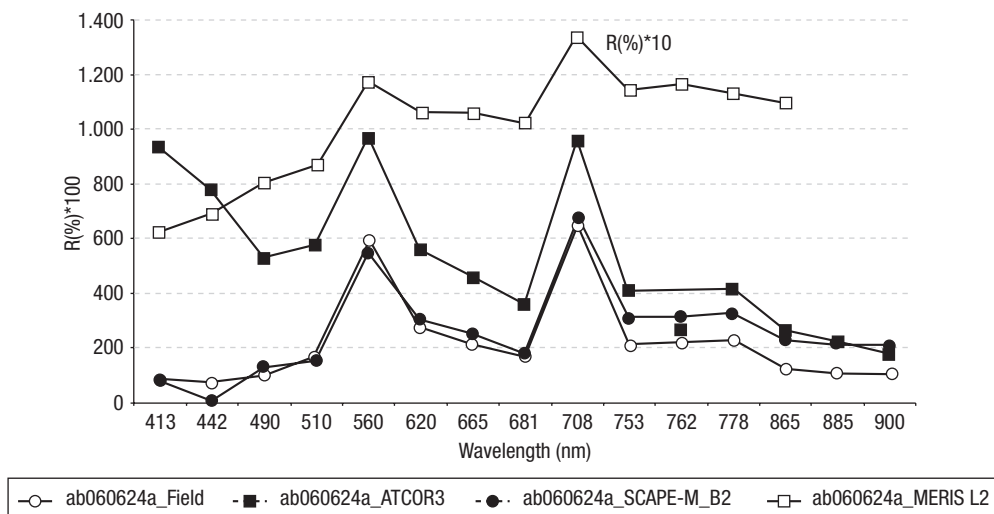


Figura 3. Comparación de los diferentes modelos de corrección atmosférica (L2, ATCOR, SCAPE-M\_B2 y datos de campo), en el punto ab060624a, correspondiente al muestreo realizado en el lago de la Albufera el 24 de junio de 2006.

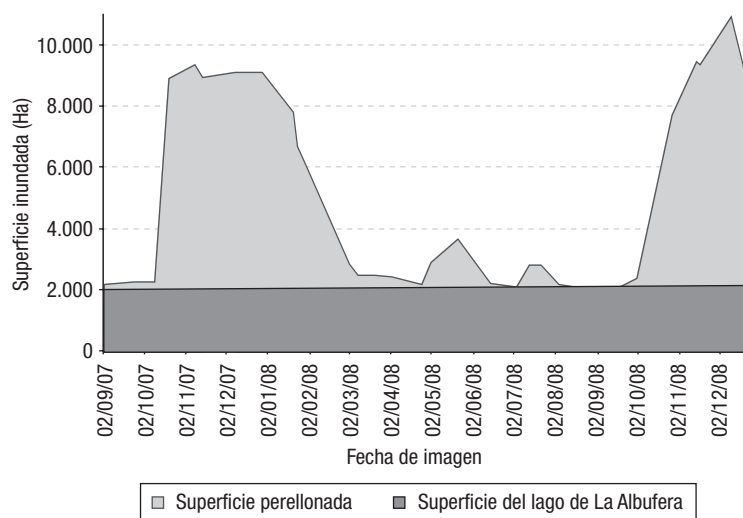
entre la solicitud y la llegada de la imagen, que corresponde al cuarto de la imagen adquirida por MERIS, suele ser de unas 4 horas. Para tener la imagen completa hay que realizar un pedido de 4 cuartos de imágenes. Los cuartos de imagen se georreferencian a partir de los datos orbitales y así se puede realizar el mosaico de la imagen. El mosaico realizado a partir de estas imágenes presenta errores de continuidad. Este problema se resuelve corrigiendo los cuartos de imagen, con puntos de control respecto a una imagen de referencia generada a partir del mosaico de las imágenes TM del satélite Landsat para toda la península. Una vez que las imágenes están corregidas atmosférica y geométricamente están preparadas para trabajar con ellas. Los algoritmos se aplican en las masas de agua y para determinar éstas se realiza el análisis del histograma de una banda del infrarrojo cercano para generar una máscara de agua. La banda del infrarrojo seleccionada es la banda 14. El análisis del histograma de la banda 14 se ha realizado para más de 60 imágenes y se ha llegado a la conclusión de considerar que se realizará una buena máscara de agua en más del 99% de las imágenes para valores inferiores al 9% de reflectividad, evitando las sombras generadas por las nubes. A las imágenes se les aplica la máscara de agua para disponer de una imagen de agua para cada fecha. La imagen de agua tiene en cada banda los valores correspondientes a reflectividad sólo en las masas de agua, a las cuales se les

aplican los algoritmos de los pigmentos y se obtiene la cartografía temática.

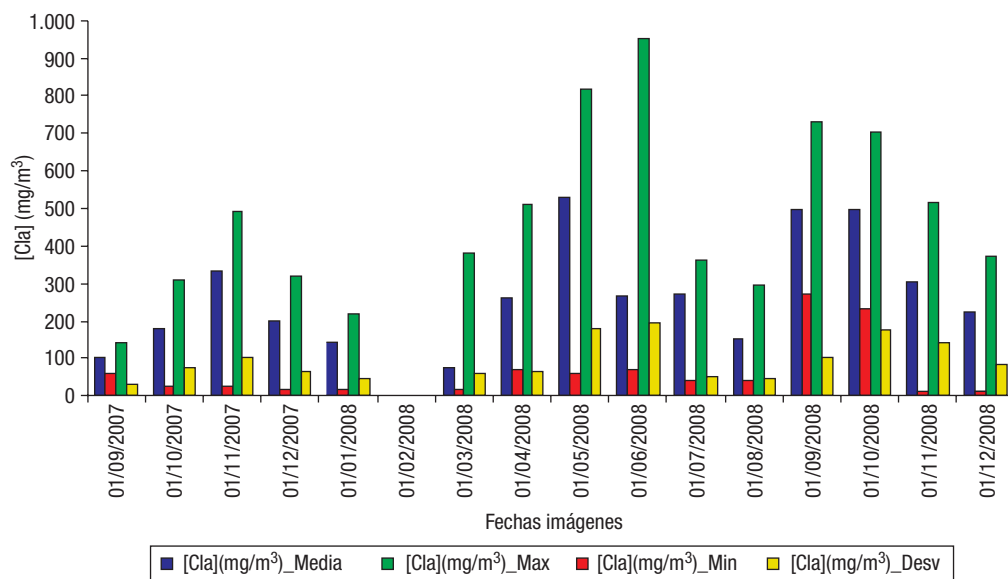
f) Generación de datos a multi-escala espacial: local y estatal. La realización de los mapas temáticos es el primer paso, sin embargo en la toma de decisiones se necesita disponer de un dato para toda la masa de agua, este valor deseado, para poder tomar una rápida decisión, se obtendrá como media de los valores correspondientes a cada masa de agua. Además es interesante conocer los valores mínimo, máximo y desviación típica de cada masas de agua para cada variable. Para ello se ha diseñado y programado en IDL un programa (estadisticaporggrupo.pro), que a partir de la imagen de cada pigmento y la imagen de agua realiza la segmentación de la imagen de agua y determina las coordenadas geográficas del centroide de cada grupo de píxeles, y calcula el mínimo, máximo, media y desviación típica, para cada grupo de píxeles correspondiente a una masa de agua.

## RESULTADOS

El trabajo desarrollado durante los últimos años nos ha permitido, entre otras cosas, conocer las características espectrales de las masas de agua continentales españolas, colaborar con otros investigadores para poder obtener una buena corrección atmosférica y desarrollar un sistema de seguimiento del estado de la calidad de



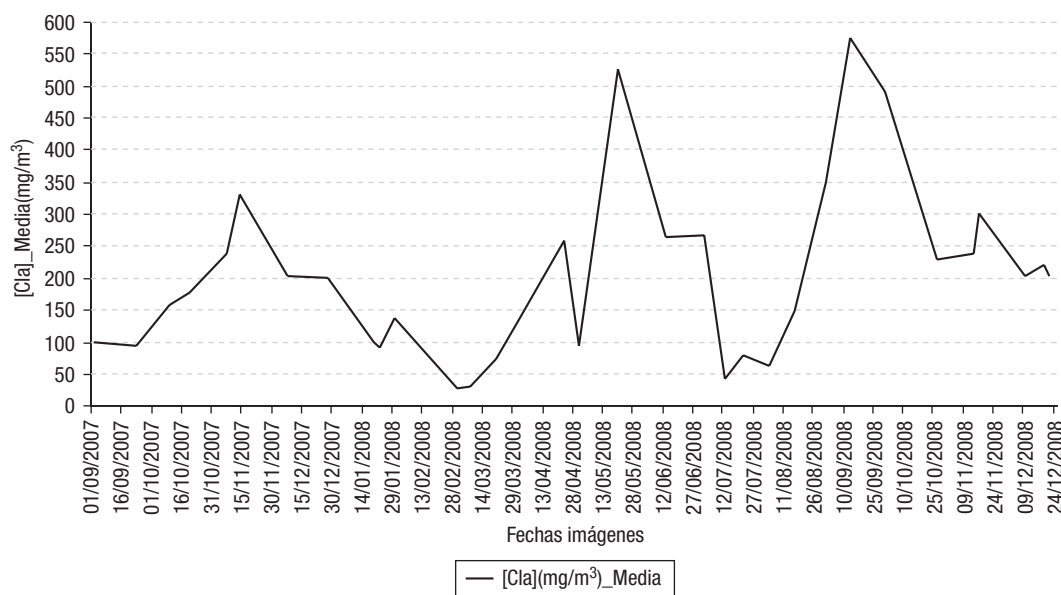
**Figura 4.** Seguimiento de la masa de agua del Parque de La Albufera desde 2/09/2007 hasta 22/12/2008.



**Figura 5.** Seguimiento de los valores mínimo, máximo, media y desviación típica de la concentración de clorofila-a ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ).

las aguas continentales, eficaz en un tiempo que podemos considerar cuasi-real. El día 18 de marzo de 2009 por la tarde se pidieron a la ESA las 4 imágenes correspondientes a dicho día. A primera hora del día 19, la ESA nos envió el correo para descargar el fichero con las imágenes; 30 minutos después teníamos las imágenes y 2 horas más tarde la cartografía temática definitiva

lista para ser difundida mediante Internet. Durante los primeros meses del 2008 se fueron resolviendo los últimos problemas del sistema de seguimiento de la calidad de las aguas continentales mediante teledetección y para ver su utilidad se empezó a solicitar imágenes a la ESA L1b de MERIS desde septiembre de 2007. El análisis de las imágenes sin nubes de la península no



**Figura 6.** Evolución temporal de concentración media de clorofila-a ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) en el lago de La Albufera entre (2/09/2007) y (22/12/2008).



fue tan satisfactorio como se deseaba y por lo tanto la periodicidad teórica de las imágenes MERIS de 3 días no siempre se cumple. La potencia de la metodología desarrollada se observa en el seguimiento del humedal de La Albufera de Valencia entre septiembre de 2007 y diciembre de 2008, una vez determinada la concentración de clorofila-a se realizó el seguimiento de la zona inundada y se determinó la superficie del lago de La Albufera en 2.350 Ha, comparado con la superficie determinada (2.027 Ha) con sensores de mayor precisión (CEDEX, 2007). La ausencia de imágenes durante el mes de febrero del 2008 debido a la cubierta nubosa no impide observar los valores bajos a primeros de marzo de 2008, correspondientes a la fase clara que se produce en la Albufera.

## CONCLUSIONES

La teledetección a través de imágenes MERIS y siguiendo la metodología expuesta en este trabajo proporciona mayor información de la masa de agua y de la cuenca, incorporando la variable temporal a la Directiva Marco del Agua.

Los mapas obtenidos permitirían obtener cartografía de utilidad en la gestión de:

- Estado Trófico de las Aguas Continentales, sencillamente delimitando los valores para cada nivel de eutrofia.

- El estado ecológico (EQR) de las masas de aguas, ya que conocemos el nivel más bajo y óptimo para cada tipología de masas de agua y por lo tanto podemos determinar EQR al dividir cada píxel por este valor.

- Un sistema de vigilancia de posible toxicidad por cianobacterias con dos niveles: el nivel-1 ( $[Cl_a] < 50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  y  $[PC] > 30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), lugares donde hay posibilidad de encontrar cianobacterias y el nivel-2 ( $[Cl_a] > 50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  y  $[PC] > 30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), a los que habría que ir a muestrear lo antes posible para analizar dichas muestras en laboratorio.

Una vez desarrollado la metodología es necesario su puesta en funcionamiento a un nivel de producción eficaz y útil para la gestión de las masas de aguas españolas. Para ello esta metodología se ha transferido al Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino con el objetivo de la puesta en marcha del sistema de producción adecuado para su eficaz utilización.

## REFERENCIAS

- CEDEX. 2007. Seguimiento de la evolución temporal de la Perellonada y calidad de las aguas de La Albufera de Valencia.
- DOMINGUEZ, J. A., ALONSO, C. & ALONSO, A. 2008. *Remote Sensing as a Basic Toolbox for Monitoring Water Quality Parameters and as a System of Surveillance of Cyanobacterial Harmful Algae Blooms (SCYANOHABS)*. 2008 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium. Boston Massachusetts, USA.
- KOPONEN, S., RUIZ-VERDÚ, A., HEEGE, T., HEBLINSKI, J., SORENSEN, K., KALLIO, K., PYHÄLAHTI, T., DOFFER, R., BROCKMANN C. & PETERS, M. 2008. *Development of MERIS Lake Water Algorithms*, Ciudad, ESRIN Contract N° 20436/06/I-LG, [http://www.space.tkk.fi/research/projects/water\\_quality\\_monitoring/MERIS\\_Lakes.html](http://www.space.tkk.fi/research/projects/water_quality_monitoring/MERIS_Lakes.html). Frascati (Italia).
- MOBLEY, C.D. 1999. Estimation of remote sensing reflectance from above-surface measurements. *Applied Optics*, 38: 7442-7455.
- PEÑA, R., DOMÍNGUEZ, J. A., DE HOYOS, C. & RUIZ, A. 2004. Mapping of photosynthetic pigments in Spanish reservoirs. Presented at MERIS user workshop <http://www.esa.int/esapub/conference/toc/tocSP549.pdf>.
- PEÑA, P., & DOMÍNGUEZ, J. A. 2006. Using remote sensing for monitoring wetlands in Spain. Presented at GlobWetland: looking at wetlands from space. [www.esa.int/esapub/conference/toc/tocSP634.pdf](http://www.esa.int/esapub/conference/toc/tocSP634.pdf)
- RUIZ, A., SIMIS, S. G. H., DE HOYOS, C., GONS, H. J. & PEÑA, P. 2008. An evaluation of algorithms for the remote sensing of cyanobacterial biomass. *Remote Sensing of Environment*, 112: 3996-4008.