

SEGUIMIENTO DEL ESTADO ECOLÓGICO DE LAS AGUAS CONTINENTALES SUPERFICIALES ESPAÑOLAS MEDIANTE IMÁGENES MERIS

J.A. Domínguez (*), C. Arancón (**), C. Alonso (*), A. Alonso (*), C. De Hoyos (*) y A. Quesada (**).

(*) *Centro de estudios Hidrográficos (CEDEX) Pº Bajo Virgen del Puerto nº 3. 28005- Madrid.*
jose.a.dominguez@cedex.es

(**) *Departamento de Biología. Universidad de Autónoma de Madrid.*

RESUMEN

La teledetección tiene como objetivo final poder proporcionar información de utilidad en el menor tiempo posible para la toma de decisiones. En esta línea se han realizando 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 (300m) 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 todos las áreas (radiometría de campo, corrección atmosférica, desarrollo de algoritmo 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.

ABSTRACT

Remote sensing has as an aim to give useful information in the least 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 tight 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.

Palabras clave: MERIS, calidad de aguas, sistema operacional, Directiva Marco del Agua.

INTRODUCCIÓN

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 comunitario en política de aguas, define la tipología de la masas de agua, así como los indicadores de calidad hidromorfológica, calidad físico-química 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 (300m), 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 no se consideró 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:

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

E_s es la irradiancia solar.

L_{sfc} es radiancia procedente del agua

L_{sky} y radiancia procedente del cielo.

Estas variables se midió 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} generadas a partir del modelo de transferencia radiativa (Mobley 1999) (Figura 1). La sonda multi-paramétrica consta de: CTD y fluorómetros de clorofila-a, materia orgánica disuelta coloreada (CDOM), ficocianina y ficoeritrina, así como un turbidímetro y un sensor 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 25mm de diámetro y 0,7µm 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. Los pigmentos analizados corresponden a diferentes grupos taxonómicos de algas (tabla 1).

b) *Desarrollo de algoritmos.* Los algoritmos que hasta el momento se han desarrollado son los correspondientes a la concentración de clorofila-a [Cla] (Figura 2) y ficocianina [PC].

Encontrar un algoritmo para la concentración de ficocianina, pigmento característico de las cianofíceas, ha sido el más

estudiado debido a que algunas de ellas son tóxicas (Peña y Domínguez 2006; Ruiz-Verdú et al.2008).

Tabla 1.- Pigmentos y grupos taxonómicos.

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

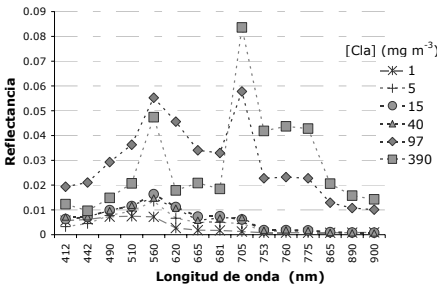


Figura 1.- Espectros de campo para diferentes valores de concentración de clorofila-a.

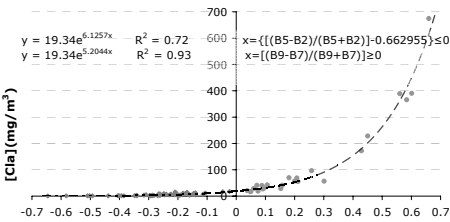


Figura 2.- Analizando los espectros de campo se observa la necesidad de encontrar una función compuesta pero continua para la concentración de clorofila-a (p<0.001, n=78).

c) *Corrección atmosférica de imágenes L1b.* Una buena corrección atmosférica supone una cartografía temática con precisión; para ello se compararon el nivel L2 de MERIS, ATCOR, SCAPE-M con espectros de campo y se observó que la mejor era SCAPE-M. Sin embargo, la banda 2 presentaba mayor error que el deseado. Para esta banda se

mejoró la corrección en el agua, denominándola (SCAPE-M_B2) (Figura 3).

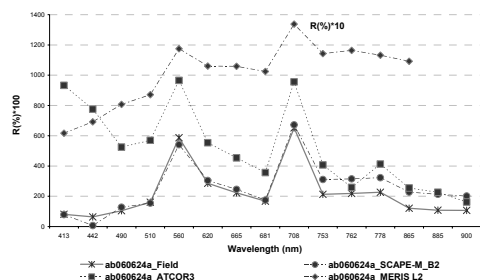


Figura 3.- Comparación de los diferentes modelos de corrección atmosférica (L2, ATCOR, SCAPE-M_B2 y datos de campo), en el punto ab060624a, correspondiente al muestreo realizado en el lago de la Albufera el 24 de junio de 2006.

d) *Validación de algoritmos en las imágenes MERIS.* La validación de los algoritmos de clorofila-a y demás pigmentos fotosintéticos se realizaron 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 los 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 y se compara con los datos de campo. Obteniendo unos errores cuadráticos medios aceptables:

$RMSE[Cl a] = 8.60 \text{ mgm}^{-3}$ 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 EOLI. Envían un cuarto de imagen y el tiempo entre la solicitud y la llegada de la imagen 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 geoméricamente se realiza un análisis del histograma de una banda del infrarrojo cercano para generar una máscara de agua. 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.

Los mapas obtenidos permiten 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.

f) *Generación de datos a multi-escala espacial: local y estatal.* La realización de los mapas temáticos es el primer paso, sin embargo para España la cantidad de información es tal que es difícil de tratar y gestionar para las personas que tiene que tomar decisiones con un dato de las masas de agua. Para ello se ha diseñado y programado en IDL un programa (estadisticasporgrupo.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, 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 otros, 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 las aguas continentales, eficaz en un tiempo que podemos considerar cuasi-real. El día 18/03/2009 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 fue tan satisfactorio como se deseaba y por lo tanto la periodicidad teórica de las imágenes MERIS de 3 días no siempre se cumple. En aquellas ocasiones en que no se cumplía, si se disponía de la imagen de toda la península de esa semana, a excepción del mes de febrero en que las condiciones meteorológicas, debido a la cubierta de nubes, fueron totalmente adversas. La metodología desarrollada también permite obtener la superficie de las masas de agua detectadas. La eficacia de nuestro sistema puede demostrarse, por ejemplo, en el seguimiento de La Albufera de Valencia desde septiembre de 2007. Durante 2006-2007 se realizó el estudio del seguimiento de la Perellonada con mayor resolución espacial, la superficie del lago de La Albufera se determinó en 2350 Ha, mediante imágenes MERIS; la superficie del lago corresponde a 2027 Ha. Durante el mes de febrero del 2008 no hubo imágenes y que los valores a primeros de marzo de 2008 eran bajos, correspondientes a la fase clara que se produce en la Albufera (Figura 8).

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. Un mayor número de muestreos para el seguimiento de la Directiva Marco del Agua (en la actualidad son dos al año) incorporaría la variable temporal.

BIBLIOGRAFÍA

CEDEX, 2007, *Seguimiento de la evolución temporal de la Perellonada y calidad de las aguas de La Albufera de Valencia*.

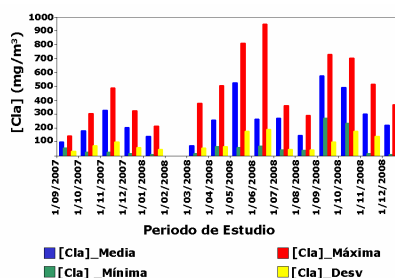


Figura 4.- Seguimiento de los valores mínimo, máximo, media y desviación típica de la concentración de clorofila-a (mg/m^3).

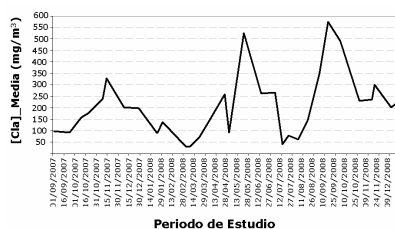


Figura 5.- Evolución temporal de concentración media de clorofila-a (mg/m^3) en el lago de La Albufera [(2/09/2007)-(22/12/2008)].

Koponen, A. Ruiz-Verdú, T. Heege, J. Heblinski, K. Sorensen, K. Kallio, T. Pyhälähti, R. Doffer, C. Brockmann and M. Peters, 2008 *Development of MERIS Lake Water Algorithms*, Ciudad, ESRIN http://www.space.tkk.fi/research/projects/water_quality_monitoring/MERIS_Lakes.html

Mobley, C. D. 1999 Estimation of remote sensing reflectance from above-surface measurements. *Applied Optics*, vol. 38, pp.7442-7455.

Peña, R. Domínguez, J.A. De Hoyos, C. & Ruiz, A. 2004. Mapping of photosynthetic pigments in Spanish reservoirs. *MERIS user WS* <http://www.esa.int/esapub/conference/toc/tocSP549.pdf>.

Peña, P. and 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

Ruiz, A. Simis, S.G.H. de Hoyos, C. Gons, H. J. and Peña, P. An evaluation of algorithms for the remote sensing of cyanobacterial biomass. *Remote Sensing of Environment*, vol.112, pp.3996-4008, 2008.