

Seguimiento de la Calidad Ambiental del Medio Hídrico en el tramo bajo y desembocadura del río Guadalquivir (2010)

Gregoria Montoya⁽²⁾, Laura Granado⁽²⁾, Juan José Vales⁽²⁾, Isabel Pino⁽²⁾, Raquel Prieto⁽²⁾, Elena Méndez⁽²⁾, Irene Rosa Carpintero⁽²⁾, José Antonio Domínguez⁽³⁾, Fernando Giménez de Azcarate⁽²⁾, Francisco Cáceres⁽¹⁾ y José Manuel Moreira⁽¹⁾

⁽¹⁾ Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía. Avda. Manuel Siurot, 50, 41071-Sevilla, España. E-mail: francisco.caceres@juntadeandalucia.es, josem.moreira@juntadeandalucia.es

⁽²⁾ Agencia de Medio Ambiente y Agua. Junta de Andalucía. Johan G. Gutenberg, 1 (Isla de la Cartuja), 41092-Sevilla, España. E-mails: {gmontoya, lgranado, jvales, ipino, rprieto, emendez, icarpintero, [@agenciamedioambienteyagua.es](mailto:fgimenezdeazcarate)

⁽³⁾ Consultor externo. Calle Bolívar, 17 F 3º D, 28045-Madrid, España. E-mail: jadg007@gmail.com

Resumen: Las características espectrales del agua hacen que ciertas propiedades de la misma sean fácilmente identificables mediante teledetección. Cuando hay presencia de turbidez, la respuesta espectral obtenida por el sensor difiere de la del agua clara, y dependiendo del tipo de componente que la provoque, esta respuesta se verá modificada en una u otra región del espectro. Los principales parámetros indicativos de la calidad del agua y sencillos de caracterizar mediante teledetección son: turbidez, transparencia, pigmentos fotosintéticos, sólidos en suspensión y temperatura superficial. El 30 de junio de 2010 se realiza una campaña de campo, simultánea a la adquisición de una imagen Landsat-TM en el tramo bajo y desembocadura del río Guadalquivir, con dos objetivos principales; por un lado, calibrar los datos de reflectividad obtenidos con la imagen, con los datos medidos en la superficie del agua (se obtuvieron datos puntuales de reflectividad de la columna de agua in situ, de forma que fuera factible la calibración de la reflectividad obtenida de la imagen una vez aplicada la corrección atmosférica). Y por otro lado, adquirir muestras de agua, de forma que los datos medidos in situ pudieran cruzarse con la información espectral obtenida de la imagen. Se buscaron algoritmos que relacionaran las variables de calidad medidas en campo y los valores de reflectividad de la imagen, y una vez aplicados dichos algoritmos, permitieran obtener los datos correspondientes a cada uno de los parámetros de interés (turbidez (NTU), clorofila-a (mg/m^3), sólidos en suspensión (mg/l), transparencia (m)). Para dotar de robustez a estos algoritmos, se amplió el rango de datos utilizando imágenes y muestras de campo coincidentes en fecha, desde 2008 hasta 2010, de forma que quedara recogida la variabilidad en el comportamiento de la masa de agua a lo largo de un periodo de tres años.

Palabras clave: teledetección, Landsat TM, Clorofila-a, sólidos en suspensión, turbidez

Water quality monitoring in the lower Guadalquivir river and its mouth (2010)

Abstract: The spectral characteristics of water mean that certain of its properties can be easily identified by remote sensing. When turbidity is present, the spectral response obtained by the sensor differs from the clear water and depending on the type of component that causes it, this response will be modified in one or another region of the spectrum. The main parameters indicative of water quality and which characterization is easy to determinate by remote sensing are: turbidity, transparency, photosynthetic pigments, suspended solids and surface temperature. In June, the 30th 2010, a field campaign was carried out, simultaneously with the acquisition of a Landsat-TM image, in the lower Guadalquivir and its mouth with two main objectives: first, to calibrate reflectance image data with data measured in the water surface (in situ reflectance data were obtained from the water column to calibrate reflectance data from atmospherically corrected image). On the other hand, acquire samples of water to be able to cross in situ data with spectral data obtained from the image. Algorithms that related quality variables measured in situ and reflectance values of the image were searched, and once these algorithms applied, data for each of the parameters of interest (turbidity (NTU), chlorophyll-a (mg / m^3) suspended solids (mg / l), transparency (m)) were obtained. To provide robustness to these algorithms, the data period was increased, using images and field samples matching from 2008-2010. In this way, variability in the behavior of the water body is collected over a period of three years.

Keywords: remote sensing, Landsat-TM, chlorophyll-a, suspended solids, turbidity

1. INTRODUCCIÓN

Las características espectrales del agua hacen que determinadas propiedades de la misma sean fácilmente identificables mediante teledetección. De ahí que ciertos parámetros, cuya presencia es indicativa de la calidad del agua y potencialmente sencillos de caracterizar a partir de imágenes de satélite, como son turbidez, transparencia, concentración de pigmentos

fotosintéticos, sólidos en suspensión y temperatura superficial, puedan ser derivados de imágenes capturadas por sensores satelitales.

El agua absorbe o transmite la mayor parte de la radiación que recibe, comportándose de forma distinta en función de los elementos que se encuentren disueltos o en suspensión en ella. Así, el agua clara se comporta de forma distinta al agua turbia, presentando una buena transmisividad de la radiación electromagnética en la

región visible y absorbiendo en el infrarrojo. Así, la mayor reflectividad del agua clara se produce en la región del azul, reduciéndose hacia la región del infrarrojo. Cuando el agua presenta turbidez, la respuesta espectral del agua obtenida por el sensor difiere de la del agua clara, viéndose modificada en una u otra región del espectro, en función del tipo de componente que ocasiona esa turbidez.

Además, la utilización de la teledetección como fuente de información, ofrece como aportación fundamental el carácter continuo y sincrónico en espacios de gran extensión y dinamismo, lo que la hace óptima para el estudio de la evolución temporal de ciertos parámetros físico-químicos en el medio hídrico.

En esta línea, la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio cuenta con el programa de seguimiento de aguas costeras y transición de la Comunidad Autónoma de Andalucía (Programa de Control de Vigilancia), basado en la presencia de 94 masas de agua, definidas en función de sus características geo e hidromorfológicas y entre las que se incluyen, entre otras, 16 masas en el Guadalquivir (3 costeras y 12 transición), donde se analizan una serie de indicadores fisicoquímicos y biológicos, con una periodicidad determinada, utilizando 20 puntos de muestreo.

Entre los parámetros analizados, encontramos algunos sencillos de determinar mediante teledetección, como son: clorofila a, medida con periodicidad mensual y sólidos en suspensión y turbidez medidos trimestralmente.

Tanto la naturaleza de dichos elementos como su periodicidad de muestreo, han permitido incorporar la teledetección al seguimiento de la calidad del medio hídrico, dotando a la caracterización de la masa de agua del carácter continuo y sincrónico antes mencionado. De esta forma, se ha convertido en el objetivo de este estudio disponer de una metodología que, utilizando como fuente base de información datos procedentes de satélite, permita el seguimiento de determinados parámetros físico-químicos en el cauce bajo del Río Guadalquivir, desde la presa de Alcalá hasta su desembocadura en el Atlántico.

Una vez valoradas la disponibilidad y características de las imágenes disponibles en la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM), se ha optado por las imágenes Landsat5-TM como las más adecuadas para el tipo de estudio y la escala de trabajo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

La consecución del objetivo propuesto se puede dividir en cuatro fases bien diferenciadas, que atienden al siguiente orden:

1. Planificación
2. Campaña de muestreos físico-químicos
3. Análisis de los datos muestreados

4. Corrección de las imágenes y búsqueda de correlaciones con los parámetros medidos.

2.1. Planificación

Previo a la realización de la campaña de campo y para poder decidir la densidad y óptima localización de los puntos de muestreo, se realiza una primera caracterización del Bajo Guadalquivir en base a su turbidez. Para ello, se cruzan imágenes de satélite de archivo y datos analíticos de años anteriores (a partir de 2008), recogiendo la heterogeneidad del río.

Debido a la distancia que se ha de recorrer en el barco y a que el tiempo de muestreo no debe superar las 3 horas coincidiendo el paso del satélite con la mitad del muestreo (Lathrop et al., 1991) se hace necesaria la existencia de dos equipos de trabajo. Uno que muestree el curso medio con puerto base en Sevilla y el otro en el tramo más bajo y la desembocadura en Sanlúcar de Barrameda.

2.2. Campaña de muestreos físico-químicos

Se realiza la campaña de campo el 30 de junio de 2010, coincidiendo con la pasada del satélite Landsat5.

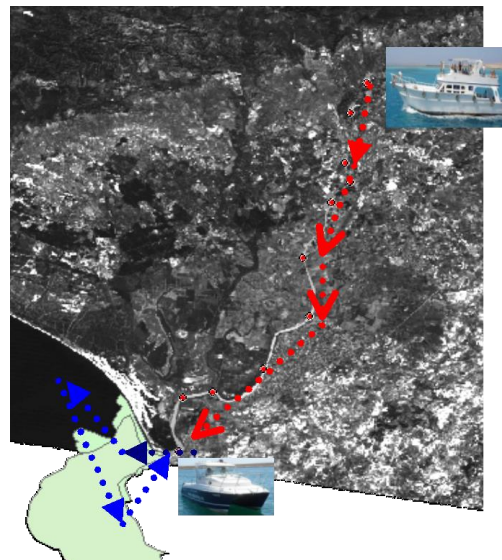


Figura 1. Ámbito muestreado: Bajo Guadalquivir y desembocadura.

Para la medición de la reflectancia de la superficie del agua se utiliza un espectroradiómetro (Miniature Fiber Optic Spectrometer) USB 4000 de Ocean Optics, La metodología seguida se ha fundamentado en la diferente respuesta espectral del agua en función de sus componentes, por lo que se genera una librería espectral adquiriendo espectros en todos los puntos muestreados. Así, una vez caracterizada in situ la zona de aguas turbias correspondiente al río Guadalquivir y la de aguas marinas próximas a la desembocadura, se obtienen las siguientes respuestas espectrales:

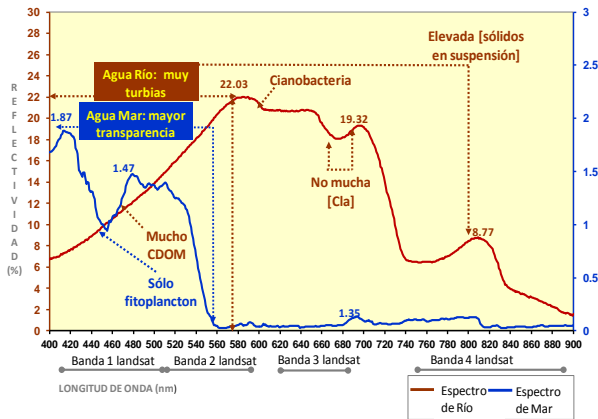


Figura 2. Firma espectral del agua del río Guadalquivir en marrón. Firma espectral del agua de mar en azul.

La firma espectral correspondiente al agua del Guadalquivir muestra un elevado valor de reflectividad, indicativo de aguas muy turbias, con una elevada concentración de sólidos en suspensión, con valores no muy altos de concentración de clorofila-a, posible existencia de cianobacterias y mucha materia orgánica. Por otro lado, en las medidas realizadas en mar abierto, se obtiene una firma espectral distinta. Las aguas presentan mayor transparencia, con valores muchos más bajos de reflectividad (el máximo de reflectividad registrado es en torno a 10 veces menor que el máximo registrado para el agua más turbia del Guadalquivir), los valores más elevados de reflectividad se encuentra entre 400-560 nm, lo que indica prácticamente sólo aportación de fitoplancton.

2.3. Análisis de parámetros muestreados

En cada uno de los puntos tiene lugar la recogida de muestras de agua para su posterior análisis físico-químico en laboratorio, donde se miden los siguientes parámetros, que serán utilizados como indicadores de la calidad del agua del Guadalquivir: turbidez, clorofila-a y sólidos en suspensión.

Además, se registra in situ la transparencia del agua, a través de la medida obtenida mediante disco de Secchi.

2.4. Corrección de las imágenes y búsqueda de correlaciones (datos in situ/imágenes)

Se adquieren dos imágenes del sensor Thematic Mapper (TM) a bordo del satélite Landsat 5, para cubrir el ámbito de interés (escenas 034-202 y 035-202).

El primer paso que se realiza es el mosaicado de ambas escenas para comprobar que no hay ningún problema radiométrico ni de georreferenciación entre las mismas.

A continuación, se procede con la corrección atmosférica (Gilbert et al, 1994) de las imágenes. Se ajusta la reflectividad de las imágenes obtenidas tras corrección del efecto atmosférico a los valores de reflectividad calculados a partir de la radiometría medida in situ el día de adquisición de las imágenes. Para ello, antes se remuestra la reflectividad de los puntos medidos en campo a la resolución espectral de

las bandas TM1, TM2, TM3 y TM4 de la imagen Landsat-TM. La transformación del espectro continuo al discreto de las bandas Landsat-TM se realiza siguiendo la metodología de la NASA (Fargion, G.S. y Mueller, J.L, 2000).

Las bandas correspondientes a diferentes sensores en el mismo rango espectral presentan diferente forma y, en consecuencia, tienen diferente calibración radiométrica. En el presente estudio, la variable de interés es la reflectividad de las masas de agua; por lo tanto, para convertir los espectros de reflectividad en valores de reflectividad en las bandas correspondientes, se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Ra\lambda(b,s) = \frac{\int RSR(b,\lambda) Ra\lambda(s,\lambda) d\lambda}{\int RSR(b,\lambda) d\lambda}$$

$RSR(b,\lambda)$ es la respuesta espectral relativa de la banda b calculada para cada longitud de onda.

$Ra\lambda(b,s)$ es la reflectividad del agua medida para cada nivel digital.

Por último, se realiza el enmascarado de la zona de tierra utilizando la banda 5 localizada en el infrarrojo cercano.

Se buscan correlaciones entre los valores de los parámetros medidos de las muestras de agua y los valores de reflectividad interpolados a las bandas Landsat-TM, generándose ecuaciones que relacionan los parámetros de calidad medidos en campo y los valores obtenidos de las imágenes.

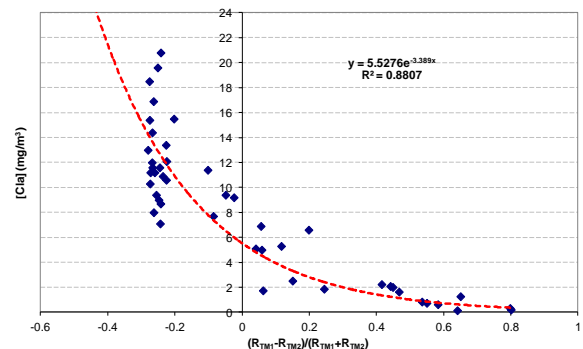


Figura 3. Relación entre los valores de reflectividad de las bandas Landsat-TM y la concentración de Clorofila

3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Las relaciones entre la reflectividad de las bandas Landsat, las ecuaciones de regresión y R^2 obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 1. Algoritmos y R^2 obtenidos por parámetro.

	Combinación bandas Landsat	Ecuaciones regresión	R^2
Clorofila-a	(RTM1-RTM2)/ (RTM1+RTM2)	$y = 5,5276e-3,389x$	0,8807
Turbidez	(RTM2-RTM1)/ (RTM2+RTM1)	$y = 11,723e9,8665x$	0,8089
S.S. (>100mg/l)	(RTM1-RTM3)/ (RTM1+RTM3)	$y = 12,675e-10,98x$	0,6692
S.S. (<100mg/l)	RTM4	$y = 20,68x$	0,6726
Transparencia	(RTM1-RTM3)/ (RTM3-RTM1)	$y = 0,4072e5,5647x$	0,8375

Por último, los datos de sólidos en suspensión, turbidez, transparencia y clorofila-a, resultado de aplicar las ecuaciones obtenidas a las imágenes, se validan con datos de estos mismos parámetros medidos en campo y que no han intervenido en las regresiones, determinándose el error cuadrático medio por parámetro.

A continuación se presentan el error cuadrático medio, obtenido por parámetro, al comparar los datos de campo con el valor de la imagen para un píxel de 30m*30m:

- Transparencia del agua: 0.13m
- Concentración de clorofila: 6,14mg/m³
- Concentración de sólidos en suspensión: 24mg/l. Se considera elevado pero aceptable debido a los elevados valores registrados.
- Turbidez: 50,5 NTU cuando existe una elevada turbidez. Si el rango de comparación se limita a valores de turbidez inferiores a 125NTU, el error cuadrático medio es de 10,5NTU.

Mediante esta metodología se ha conseguido cartografiar el comportamiento de cada uno de los parámetros de calidad del agua susceptibles de ser estudiados mediante teledetección, para una fecha dada. De esta forma ha quedado caracterizado de forma continua el curso bajo y desembocadura del río Guadalquivir durante algo más de 150 km, posibilitando a su vez, la delimitación de diferentes masas de agua en función de sus propiedades.

Por otro lado, comentar que los datos de campo han permitido encontrar relaciones entre los parámetros de calidad de agua, quedando patente que la turbidez del río Guadalquivir se debe principalmente a los sólidos en suspensión existentes en él y no al fitoplancton, ya que la correlación entre los sólidos en suspensión y turbidez es lineal.

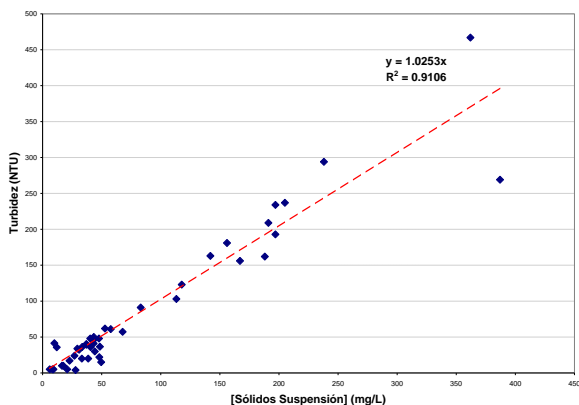


Figura4. Relación entre los valores de turbidez y sólidos en suspensión medidos in situ.

Los resultados obtenidos han sido alentadores como para permitir realizar el seguimiento de la concentración de clorofila-a, sólidos en suspensión, turbidez y transparencia del agua, a partir de las imágenes Landsat-TM, aunque se necesitaría aumentar la serie de datos en el tiempo para darle robustez a los algoritmos hallados. De hecho, esta metodología cuenta con la ventaja de poder ampliar en el tiempo, la caracterización realizada, tanto a fechas pasadas como a futuro, pues la Consejería

cuenta, por un lado con una vasta biblioteca de imágenes de satélite con las que continuar el estudio realizado y por otro con una serie histórica de datos de medida, in situ, de la mayoría de los parámetros estudiados. Las correlaciones entre datos de campo y datos obtenidos de las imágenes, se han enriquecido hasta el momento, ampliando la serie de datos procedentes de ambas fuentes desde 2008. Los resultados han sido divulgados en la web de la REDIAM(<http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/rediam/bajoguadalquivir>), generándose servicios OGC de mapas (WMS) que muestran datos de concentración de clorofila-a (mg/m³), sólidos en suspensión (mg/l), transparencia (m) y turbidez (NTU) del agua, en el curso bajo del río Guadalquivir a partir de los datos obtenidos mediante imágenes de satélite Landsat-TM.

Para concluir, comentar que se podrían mejorar los errores en la estimación de parámetros, si los muestreos in situ que se realizan, se hicieran coincidir con el día del paso del satélite. La comparación con un mayor número de puntos de verificación permitirá obtener algoritmos de ajuste que, aplicados a los ya obtenidos, disminuyeran el error con los datos de verdad-agua.

4. BIBLIOGRAFÍA

Ameztoy, I. Bustamante, J. Díaz-Delgado, R y Aragonés, D. 2009. *Análisis histórico de los patrones superficiales de turbidez del curso bajo del Río Guadalquivir desde 1984 a 2008*. XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Calatayud, 23-23 Septiembre de 2009, pp. 153-156.

Baban, S.M.J. 1993. *Detecting water quality parameters in the Norfolk Broads U.K., using Landsat imagery*. International Journal of Remote Sensing, vol.14, nº7, pp.1245-1246.

Frette, Ø. Svein, R., Stamnes, J. y Stamnes, K. 2001. *Optical remote sensing of waters with vertical structure*. Applied Optics, vo.40, nº9, pp. 1478-1487.

Fargion, G.S. y Mueller, J.L. 2000. *Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 2*. NASA, Goddard Space Flight Center Greenbelt, Maryland.

Gilabert, M.A., Conese, C. y Maselli, F. 1994. *An atmospheric correction method for the automatic retrieval of surface reflectances from TM images*. Int. J. Remote Sensing, Vol. 15, No. 10, 2065-2086.

Lathrop, R.G., Lillesand, T.M. y Yandell, B.S. 1991. *Testing the utility of simple multi-date Thematic Mapper calibration algorithms for monitoring turbid inland waters*. International Journal of Remote Sensing, vol.12, nº10, pp. 2045-2064.