Aplicaciones ambientales de la Teledetección espacial: cartografía de valoración del estado trófico de los embalses de la cuenca del Ebro

José Ángel LOSADA GARCÍA *
José Antonio ÁLVAREZ ROBLES **

* Oficina de Planificación Hidrológica. Confederación Hidrográfica del Ebro. Pº de Sagasta, n.º 24-28. E-50071 Zaragoza. España. C/e: jlosada@chebro.es
** Grupo de Sistemas de Información Avanzados-IAAA. Universidad de Zaragoza. C/ María de Luna, n.º 1. E-50018 Zaragoza. España. C/e: jantonio@unizar.es

Teledetección: definicición y método. Aplicaciones en la C.H.E.

La Teledetección es la disciplina o técnica que se ocupa de la observación remota de la superficie terrestre. Este nuevo punto de vista en el estudio del territorio y sus paisajes, inédito hasta fechas relativamente recientes, aporta una rica fuente de información geográfica de gran trascendencia en estudios de medio ambiente y recursos naturales (inventarios, seguimiento de la cubierta vegetal, cambios y evolución en los usos del suelo, estudio del cambio climático...). Es por todo ello que su conocimiento y aplicación resulta de indudable interés para diversos especialistas en Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente.

En una primera etapa (década de los años 60 del s. XX), la Teledetección *–remote sensing* en inglés– designaba cualquier forma de observación remota (mediante aviones, radar aerotransportado, etcétera); en la actualidad, existe un cierto consenso al referirse a esta disciplina como el conjunto de procesos de captura, tratamiento e interpretación de imágenes terrestres captadas desde sensores instalados a bordo de satélites artificiales que orbitan en el espacio.

Se puede hablar ya de toda una historia de los sistemas aeronáuticos y espaciales de teledetección, cuyo eje cronológico abarcaría desde las primeras fotografías aéreas captadas por cámaras instaladas a bordo de globos aerostáticos (hacia 1860) hasta los modernos programas de satélites artificiales (como Landsat, SPOT, NOAA o QuickBird) y estaciones orbitales (figs. 1, 2a y 2b). En síntesis, a una primera etapa de análisis y elaboración cartográfica basada en fotointerpretación sobre documentos en papel ha seguido otra de obtención de imágenes digitales multiespectrales (es decir, capaces de registrar información procedente de diversas regiones del espectro electromagnético) en gigantesco número y con muy elevadas posibilidades de interpretación y análisis mediante el empleo de las Nuevas Tecnologías de la Información Geográfica.

Actualmente, y al socaire del desarrollo de internet, asistimos a una cierta popularización de las imágenes obtenidas a través de la Teledetección, que con frecuencia se transmiten y difunden ampliamente a través de los medios de comunicación convencionales (prensa y televisión).

Tele-. La palabra griega «tele», lejos, usada en forma prefija.

Detectar (ingl.) «*detect*», lat. «detectus», de «detégere» de «egeré»,

cubrir; V. «TECHO».).*Acusar un aparato la presencia de cierta cosa. Descubrir la presencia de cierta cosa con un aparato. (Usado en lenguaje técnico. No figura en el D.R.A.E.).

(MOLINER, M. 1966. *Diccionario de uso del español*.)

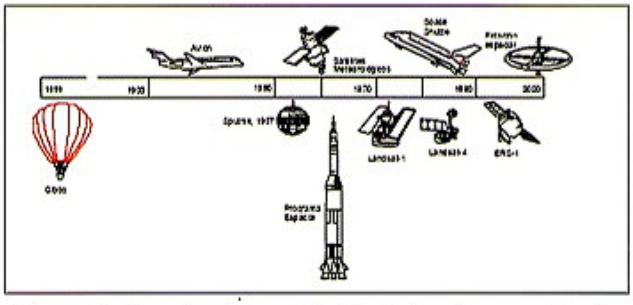

Figura 1. Cronología y evolución de los sistemas de teledetección. (Según CHUVIECO, 1996.)

Así, aún se mantienen frescas en la memoria colectiva imágenes tan impactantes como las de la manzana de la «zona cero» en Nueva York tras los atentados del 11-S, la evolución de la marea negra procedente del petrolero *Prestige* o la dinámica de los incendios forestales en Galicia durante el verano de 2006, todas ellas captadas desde satélite; como también son imágenes de satélite los mosaicos de fondo que todos podemos ver en los ya universales programas *Google Earth* y *Google Maps* (http://maps.google.com y http://earth.google.es/).

La sola enumeración de los recursos sobre Teledetección disponibles en la web desbordaría, con mucho, los propósitos de este trabajo. Baste mencionar, y por citar tan sólo algunas referencias generales de las principales misiones de observación terrestre, las páginas web de los programas Landsat (http://landsat.usgs.gov/index.php) y SPOT (http://www.spotimage.fr/html/_253_.php). Un magnífico ejemplo reciente de utilización de la Teledetección, a escala global, en la creación de documentos cartográficos que ilustran la problemática ambiental del mundo contemporáneo es el proyecto *One planet many people. Atlas of Our Changing Environment*, producido en 2005 por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente y que, a través de 80 casos representativos repartidos por todo el globo, ilustra de manera espectacular los cambios en los usos del suelo acaecidos a lo largo de las últimas décadas (http://na.unep.net/OnePlanetManyPeople/index.php) (figs. 3a y 3b).

Todo sistema de teledetección incluye los siguientes elementos, que interaccionan entre sí: una fuente de energía (generalmente el Sol), la cubierta terrestre, una plataforma espacial (el satélite) y el sensor o sensores instalados a bordo, un sistema de recepción-distribución de imágenes y el intérprete o analista de los datos recogidos (fig. 4).

Siguiendo a CHUVIECO (1996), podemos cifrar las siguientes ventajas de la observación espacial remota (que complementa, más que supera, a la tradicional fotografía aérea y al –muchas veces insustituible– trabajo de campo):

- Aportar una cobertura global y periódica de la superficie terrestre.
- Ofrecer una visión panorámica del territorio.
- Captar información sobre regiones no visibles del espectro electromagnético (por ejemplo, la región del infrarrojo).
- Integrar la información terrestre en un formato digital.

La aplicación de distintas técnicas de teledetección espacial sobre diversas áreas temáticas de interés cuenta ya con una tradición de más de una década en los trabajos que lleva a cabo la Oficina de Planificación Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Ebro (C.H.E.). En líneas generales, esta tecnología se ha venido aplicando, en orden cronológico, sobre las siguientes cuestiones territoriales relacionadas con la gestión de los recursos hídricos:

Figura 2a. Perspectiva de un paisaje alemán captado desde una cámara instalada en un cohete lanzado desde tierra por Alfred Maul (1904).

Figura 2b. Moderno cohete espacial Delta 4 (Boeing), que puso un satélite en órbita en junio de 2006, desde su base de lanzamiento en California (USA).

- La identificación de las superficies regadas y su evolución temporal, que resulta de gran utilidad para una evaluación preliminar de las demandas de agua en la cuenca. Se trata de una de las aplicaciones clásicas de la Teledetección. A principios de la década de 1990 se contrataron los primeros trabajos que, mediante la interpretación digital y visual de imágenes Landsat, perseguían la cuantificación de las superficies de regadío en la cuenca del Ebro (fig. 5).
- La obtención de coberturas territoriales de base que, integradas en el Sistema de Información Geográfica *GIS-Ebro*, posibiliten un adecuado reconocimiento del espacio geográfico de la cuenca del Ebro, así como una precisa «georreferenciación» de los múltiples temas y variables que intervienen en los trabajos de planificación hidrológica. Es hacia mediados de la década de 1990 cuando se obtiene una primera cobertura para todo el ámbito territorial de

Figuras 3a y 3b. Evolución y cambios en el paisaje de la comarca del Campo de Dalías (Almería, España) entre enero de 1974 (arriba) y julio de 2004 (abajo) a partir del análisis de imágenes Landsat. Obsérvese la progresión del área ocupada por cultivos forzados bajo plástico.
(Procedencia: http://na.unep.net/OnePlanetManyPeople/index.php)

la cuenca del Ebro, definida por un mosaico de ortoimágenes SPOT adquiridas en el verano de 1995 (fig. 6).

- Realización de estudios sobre ámbitos territoriales concretos que, a partir de análisis específicos (por ejemplo, detección multitemporal de la lámina de agua y del estado de humedad del suelo), posibiliten un mejor conocimiento y gestión de nuestros principales humedales (estudios del régimen hídrico y balances de agua). Es una línea de trabajo que se ensayó sobre la cuenca endorreica de la laguna de Gallocanta (C.H.E., 2004). Dentro de esta misma categoría tendrían cabida, además, otro tipo de aplicaciones, como pueda ser el seguimiento de episodios de avenida, probado con éxito, mediante el empleo de imágenes Landsat 7 y SPOT 2 y 5 (fig. 7), en la crecida del río Ebro en febrero de 2003 (LOSADA *et al.*, 2004).

Finalmente, a lo largo de 2005 se realizó el trabajo cuyos principales contenidos se comentan en este artículo, consistente en la aplicación de la Teledetección al estudio de la valoración del estado trófico (eutrofización: crecimiento de algas y otros productores primarios en una corriente fluvial o lago) de los principales embalses de la cuenca del Ebro (C.H.E., 2005).

Antecedentes y objetivos. La información de partida

Las primeras aplicaciones de la Teledetección al estudio de la calidad de las aguas continentales (principalmente lagos) data de los años 70 del pasado siglo, cuando diversos investigadores muestran el potencial analítico de la primera generación del Escáner Multiespectral Landsat (MSS) para este propósito. Después llegaron aplicaciones sobre imágenes SPOT y Landsat TM, ya en los años ochenta. Con todo, el uso de estas técnicas no se ha extendido ampliamente, posiblemente, y entre otras múltiples razones, a causa del alto coste de adquisición de series temporales de imágenes de satélite o la falta de infraestructura general y de tradición en la ejecución de este tipo de trabajos.

En España, los estudios realizados en aguas epicontinentales aplicando técnicas de teledetección son bastante escasos. A escala de cuenca hidrográfica hay que destacar los trabajos reali-

zados en la cuenca del Tajo (PEÑA *et al.*, 1994; PEÑA *et al.*, 1999) y en la propia cuenca del Ebro (CEDEX, 1993). A nivel nacional, RUIZ-VERDÚ *et al.* (2003) han analizado la calidad de 34 embalses y dos humedales en la península Ibérica utilizando el sensor MERIS.

En los últimos tiempos, y con la nueva política del agua adoptada a nivel europeo (Directiva Marco del Agua 2000/60/CE), se ha establecido como objetivo prioritario la evaluación y el seguimiento de la calidad de las aguas continentales, incluidas las masas de agua modificadas (como es el caso de los embalses). Teniendo en cuenta que se trata de la aplicación de unas medidas de manera continuada en el tiempo y a una escala geográfica muy amplia (Unión Europea), la Directiva Marco del Agua contempla la Teledetección como una herramienta válida para alcanzar dichos objetivos.

El propósito principal del estudio que resumimos en el presente artículo es analizar y tratar digitalmente un conjunto de ocho imágenes que, adquiridas por el satélite Landsat 5 TM en diferentes fechas de julio y agosto de 2004, permiten, por su resolución espacial y radiométrica, un análisis a escala de demarcación hidrográfica orientado al ensayo de su utilización en el seguimiento y valoración del estado trófico de los principales embalses de la cuenca del Ebro.

Para el análisis del estado trófico de los embalses se contaba, a priori, con una serie de datos y observaciones de campo facilitados por el Área de Calidad de la C.H.E. (datos de calidad en embalses, campaña 2004-2005), que incluyen los parámetros de transparencia del disco de Secchi (SDT) y la clorofila a (Chl-a) obtenidos en julio y agosto de 2004. Para el cálculo de la eutrofización se utilizó el índice de estado trófico o TSI (CARLSON, 1977), que relaciona ambos parámetros.

La hipótesis de partida es considerar que la transparencia a partir del disco de Secchi (claridad del agua) está fuertemente relacionada con observaciones radiométrico-espectrales (es decir, con la información que aporta el satélite). Para aquellas masas de agua en las que su transparencia esté fuertemente relacionada con la abundancia de fitoplacton, el nivel de clorofila estará también muy correlacionado con los datos de satélite.

Los datos de campo, por su parte, deben ser tomados tan próximos a la fecha de paso del satélite como sea posible. Estudios anteriores han demostrado que las mejores correlaciones con Landsat TM y la transparencia de las aguas se dan en intervalos de ±7 días respecto al día de paso del satélite (KLOIBER *et al.*, 2002), aunque pueden ser aceptables desfases de hasta 15 días. Debido a que el nivel clorofila en las aguas tiene una variabilidad temporal más

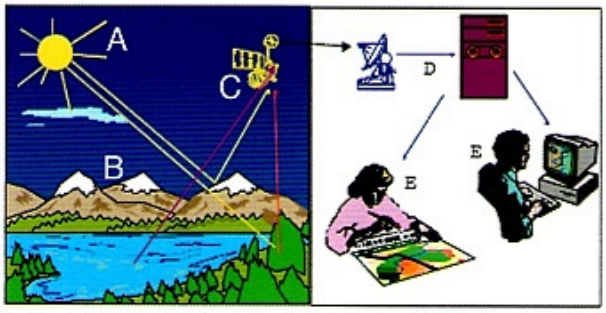

Figura 4. Esquema general de los componentes de un sistema de teledetección espacial. A: Fuente de energía (comúnmente, el Sol); B: superficie terrestre; C: sensor instalado a bordo de una plataforma espacial; D: estaciones y dispositivos de procesamiento de las imágenes obtenidas; E: analistas e intérpretes de la información. (Según CHUVIECO, 1996.)

corta que la transparencia (STADELMANN *et al.*, 2001), la toma de muestra necesita ser tomada en un intervalo temporal mas corto (± 1-2 días).

En el caso que se nos plantea, las tomas de muestra tienen un desfase de 12,8 días con las imágenes de satélite Landsat correspondientes, con una desviación estándar de ±9,6 días. Esta desviación hace prever deficiencias en las regresiones obtenidas, no ajustándose de manera adecuada a los resultados esperados, muy especialmente en el caso de la clorofila.

Figura 5. GIS-Ebro*: utilización de una imagen Landsat 5 TM (verano de 2004) en la identificación de las superficies regadas en el entorno de la ciudad de Zaragoza. Se trata de una composición en falso color («infrarrojo color») en la que las áreas con vegetación sana (regadas o con aportación hídrica importante) aparecen con color rojo intenso.*

En cuanto a las imágenes, se dispuso de una colección de ocho escenas del satélite Landsat 5 TM, que cubren el ámbito territorial de la cuenca hidrográfica del Ebro y fueron capturadas por el satélite en el periodo comprendido entre el 17/07/2004 y el 20/08/2004, el más adecuado para la realización de estudios de teledetección aplicados a masas de agua continentales (KLOIBER *et al.*, 2002; STADELMANN *et al.*, 2001), debido, principalmente, a que en esta época la claridad de las aguas tiene una estacionalidad mínima y a que es en este periodo cuando los valores de turbidez son menores.

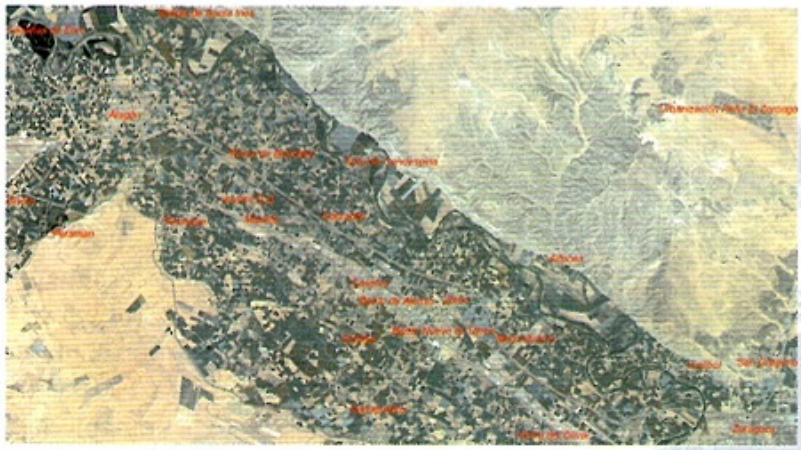

Figura 6. GIS-Ebro*: utilización de una imagen SPOT Pancromático (verano de 1995) como apoyo cartográfico en las tareas de planificación hidrológica en el entorno de la ciudad de Zaragoza. Se trata de una composición en falso color natural en la que las diferentes ocupaciones del suelo aparecen en gamas cromáticas similares a las reales.*

Análisis y resultados

Las diferentes imágenes Landsat fueron corregidas tanto espacial como radiométricamente antes de proceder a su posterior tratamiento digital. A partir de una clasificación no supervisada (técnica de tratamiento digital de una imagen consistente en la obtención de clases o categorías espectrales homogéneas), se extrajeron los distintos píxeles correspondientes a la lámina de agua de los embalses muestreados así como el valor de la signatura espectral (energía emitida, reflejada o transmitida, a diferentes longitudes de onda, por cada una de las tipologías de cubierta terrestre) correspondiente al punto en que se obtuvo la información de campo. Con estos datos se realizaron diferentes análisis estadísticos que, basados especialmente en el cálculo de la regresión lineal múltiple, posibilitaron relacionar la información obtenida en campo con la deducida en las distintas imágenes Landsat. Esta relación ha sido la utilizada para estimar los valores de calidad en la superficie completa del embalse, e interpretar así el estado trófico de los diferentes embalses objeto de estudio.

El mejor modelo obtenido para los valores de transparencia (disco de Secchi) a partir del análisis de regresión múltiple estaba explicado por los valores de reflectividad de las bandas 1 y 2 (dominio óptico del espectro electromagnético) del sensor Landsat 5 TM. Con el fin de determinar la bondad de este modelo, se aplicó la fórmula obtenida en el análisis de regresión múltiple sobre un conjunto de embalses utilizados como grupo de validación; esta prueba concluyó con un resultado satisfactorio.

Una vez validado el modelo, se procedió a la extrapolación de resultados sobre la superficie de los distintos embalses, lo que, desde el punto de vista cartográfico, significa la obtención de una malla o *grid* en la que el valor de cada uno de los píxeles representa el valor de TSI estimado. Las imágenes *raster* así obtenidas se «discretizaron» en intervalos, con el fin de valorar visualmente, de manera sencilla, la calidad de las distintas masas de agua (figs. 8, 9 y 10). El rango de colores com-

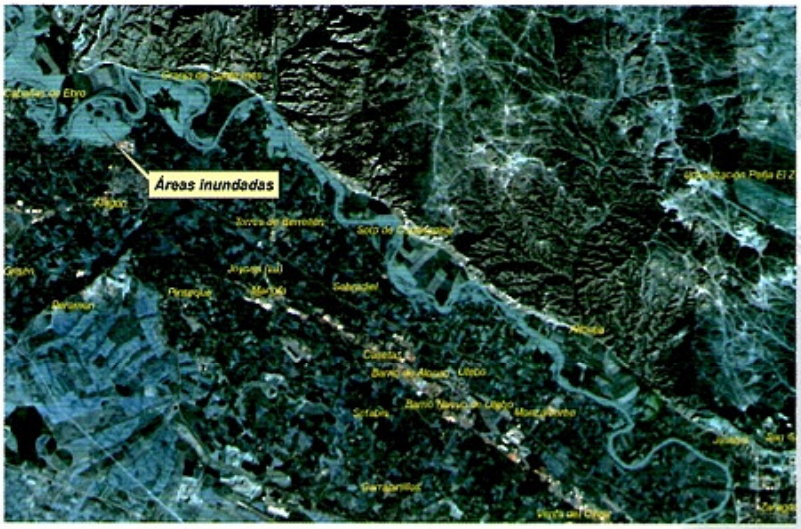

Figura 7. GIS-Ebro*: utilización de una imagen Landsat 7 ETM (6 de febrero de 2003) para la estimación de las superficies inundadas durante el episodio de crecida del Ebro en febrero de 2003 en la comarca de la Ribera Alta del Ebro (Zaragoza). Se trata de una composición en falso color, a partir de la combinación de distintas bandas de interés que resaltan (en color azul claro) las áreas anegadas.*

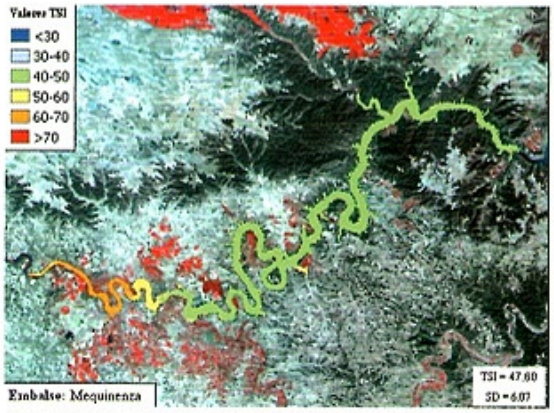

Figura 8. Cartografía de valoración del estado trófico en el embalse de Mequinenza (Zaragoza).

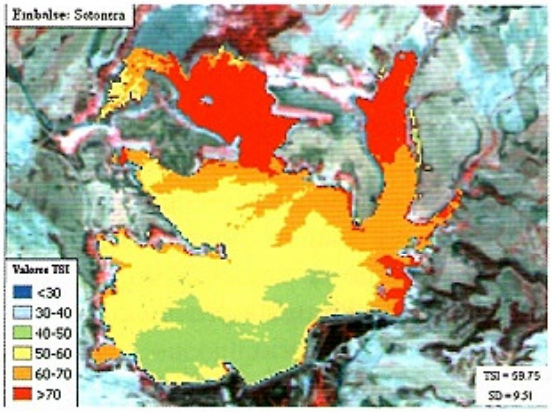

Figura 9. Cartografía de valoración del estado trófico en el embalse de La Sotonera (Huesca).

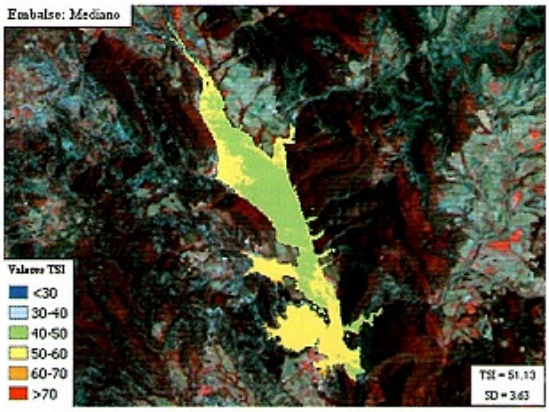

Figura 10. Cartografía de valoración del estado trófico en el embalse de Mediano (Huesca).

prende desde el rojo, para los valores de índice de estado trófico mayores (TSI>70), hasta el azul, que representa el extremo opuesto (TSI<30).

Se observó que, por regla general, los embalses de la cuenca del Ebro analizados tienen una calidad media (mesotróficos), encontrándose prácticamente el 75% de ellos con valores de TSI por debajo de 50.

En los mapas de calidad obtenidos a partir de la extrapolación de la ecuación deducida sobre los datos espectrales de cada embalse, se observa una gran heterogeneidad en los valores de calidad calculados, tanto entre los diferentes embalses analizados como dentro de la lámina de agua de cada uno de los embalses. Como norma general, los mayores grados de eutrofización corresponden a las zonas de cola de los embalses. Esto es un hecho esperable, ya que es en éstas donde llega la carga de sedimentos proveniente del tramo fluvial aguas arriba del embalse. No obstante, en determinados embalses esta pluma de sedimentos es bastante significativa (p. ej. en Mequinenza o Ribarroja), y posiblemente también indique fenómenos de erosión y pérdidas del suelo en las inmediaciones.

Conclusiones

Las principales conclusiones del estudio sobre la valoración del estado trófico de los principales embalses de la cuenca del Ebro mediante técnicas de teledetección se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Se ha validado la verosimilitud del empleo de técnicas de teledetección espacial para el estudio de la calidad de masas de agua superficial, como es el caso de los embalses, en la cuenca del Ebro. Se trata, por tanto, de una técnica complementaria válida para abordar el estudio limnológico de los embalses.
- Esta técnica posibilita, por un lado, el abaratamiento de costes en campañas de muestreo (ya que, con una pequeña muestra, se podrían extrapolar resultados a un conjunto mayor de masas de agua) y, por otro, ofrece una mayor información superficial que el análisis tradicional.
- En este estudio en concreto, el desajuste temporal entre las fechas de muestreo en campo y de paso del satélite ha determinado que la bondad del modelo no haya sido la esperada, especialmente en el caso del parámetro clorofila a, donde no se ha obtenido un modelo significativo. Para posteriores aplicaciones de esta misma técnica, se debería tener en cuenta esta circunstancia, y realizar el muestreo a partir de las fechas inmediatas de adquisición de las imágenes Landsat.
- Se trata de una técnica que permite un seguimiento temporal de la calidad de embalses de una manera muy efectiva y visual, pudiendo identificar así cambios estacionales en la disposición de los sedimentos, nivel de clorofila, etcétera, así como la localización de eventos concretos de aumento del nivel de eutrofización.
- Este estudio ha estimado que, para las fechas consideradas, los embalses objeto de estudio presentan, por término general, una cali-

dad trófica intermedia (mesotróficos), aunque existe gran heterogeneidad espacial entre embalses y aun dentro de los propios embalses.

Bibliografía

CARLSON R. E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, **22** (2), pp. 361- 369.

CEDEX. 1993. *Limnología del Ebro Mediante Teledetección*. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, Madrid.

C.H.E. 2004. *Estimación de la evolución reciente del vaso de la Laguna de Gallocanta mediante técnicas de teledetección espacial*. Consultor: CITA (D.G.A.), Zaragoza. 142 pp., 27 mapas. [Informe inédito.]

C.H.E. 2005. *Valoración del estado trófico de los principales embalses de la cuenca del Ebro mediante técnicas de teledetección espacial*. Consultor: OTRI (Universidad de Zaragoza), Zaragoza. 18 pp., 44 mapas. [Informe inédito.]

CHUVIECO, E. 1996. Fundamentos *de Teledetección Espacial*. Rialp, Madrid. 568 pp.

KLOIBER, S. M., BREZONIK, P. L., OLSMANSON, L. G. and BAUER, M. E. 2002. A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, **82**, pp. 38-47.

LOSADA GARCÍA, J. A., MONTESINOS ARANDA, S., OMEDAS MARGELÍ, M., GARCÍA VERA, M. A. y GALVÁN PLAZA, R. 2004. Cartografía de las inundaciones del río Ebro en febrero de 2003: trabajos de fotointerpretación, teledetección y análisis SIG en el GIS-Ebro. *In*: CONESA GARCÍA, C., ÁLVAREZ ROGEL, Y. y MARTÍNEZ GUEVARA, J. B. (eds.) *Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección*. Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia, Murcia, pp. 207-218. [Disponible en **http://oph.chebro.es**]

PEÑA, R. y SERRANO, M. L. 1994. Seguimiento del estado trófico de los embalses del alto Tajo por teledetección. *Limnetica*, **10** (1), pp. 69-81.

PEÑA, R., SERRANO, M. L. and RUIZ-VERDÚ, A. 1999. Studies of impact on fluvial ecosystems by airborne remote sensingthermal discharges in river Tajo and suspended solids diffution in rivers Esera and Cinca (Spain). *Limnetica*, **16**, pp. 99-107.

RUIZ-VERDÚ, A., DE HOYOS, C., Domínguez, J. A. y Peña, R. 2003. Estudio de la composición del fitoplancton en embalses españoles mediante teledetección. *Ingeniería Civil*, **131**, pp. 121-127.

STADELMANN, T. H., BREZONIK, P. L. and KLOIBER, S. M. 2001. Seasonal patterns of chlorophyll a and Secchi disk transparency in lakes of east-central Minnesota: implications for design of ground- and satellite-based monitoring programs. *Lake Reserv. Manage.*, **17**, pp. 299-314.