

## **Evolución del estado trófico de los embalses de Entrepeñas, Buendía y Bolarque por teledetección**

*Ramón Peña Martínez, María Luisa Serrano Pérez*  
Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. MOPT

### **RESUMEN**

Con apoyo de datos de campo (Clorofila, Transparencia, Temperatura, etc.), se han procesado imágenes del sensor Thematic Mapper del satélite Landsat 5 (cuatro fechas entre el 16 de julio y el 18 de septiembre de 1992).

Se han obtenido ecuaciones de aplicación general para la transparencia, y otra también general para la clorofila, con la excepción de una fecha.

Se ha realizado un estudio multitemporal conjunto del período cubierto por el seguimiento, obteniendo imágenes de cambios entre fechas y en todo el período, para los tres embalses.

### **SUMMARY**

Using Landsat 5 Thematic Mapper imagery corresponding four dates through summer 1992 (July 16th-September 18th) and direct measurements on the reservoirs (chlorophyll a, Secchi disc depth transparency and temperature), we make daily thematic maps (general application equations).

In addition, using the GIS Grass 4.0, we developed a multirate analysis, including differential images to evaluate the changes between dates and in the whole period for the three reservoirs.

### **Introducción**

El año 1992 ha sido un año particularmente crítico en este aspecto dado que la ausencia de precipitaciones ha motivado no sólo situaciones de alarma en abastecimientos sino que ha agravado el proceso de eutrofización de muchos embalses.

La Comisaría de Aguas del Tajo, responsable de la calidad de los recursos hídricos a su cargo, ha querido hacer un seguimiento más intensivo de las mayores y mejores reservas de la cuenca, que se concentran en la zona de los embalses de Entrepeñas, Buendía y Bolarque, con una capacidad máxima de embalse de 2.500 hm<sup>3</sup>.

Durante los meses de verano se han estado realizando tomas de datos limnológicos en los tres embalses citados y se ha querido completar estos estudios con el apoyo de la teledetección para poder generalizar los datos puntuales a toda la extensión de sus masas de agua.

Si bien hace algunos años que en España se vienen realizando trabajos de aplicación de la teledetección por satélite a la observación y cartografía temática de recursos naturales, más reciente es la experiencia desarrollada específicamente sobre las aguas epicontinentales. Ello es particularmente cierto en lo que se refiere al empleo de las imágenes digitales proporcionadas por el sensor "Thematic Mapper" de los satélites Landsat, habida cuenta de que las primeras imágenes TM disponibles datan de 1982.

Puede afirmarse, en efecto, que el CEDEX fue pionero en España cuando, en 1990, publicó los resultados del reconocimiento limnológico de todos los embalses de la cuenca del Tajo, efectuado en 1988 mediante el proceso de imágenes digitales Landsat TM, lo que constituye el antecedente más próximo del presente trabajo. En 1993 se ha efectuado un segundo reconocimiento limnológico de la cuenca del Tajo por teledetección, que afecta de modo extensivo al conjunto de embalses de la cuenca.

#### *Determinaciones directas de apoyo*

Para deducir y cartografiar los valores de cualquier variable limnológica de los embalses a partir de imágenes digitales Landsat es preciso contar con un apoyo de datos obtenidos directamente, mediante el desarrollo de un plan de trabajos de campo, consistente en tomas de muestras de agua y determinaciones directas que sirven de base para una extrapolación espacial de los datos obtenidos. Ello se aplica no sólo a los embalses donde se han efectuado las mediciones sino también a los de igual órbita y fecha, aunque no hayan sido objeto de toma de muestras.

Las especificaciones propuestas para estas determinaciones adicionales al programa limnológico eran:

Fechas: coincidentes con las del calendario de pasadas del satélite Landsat-5 (cada 16 días, a partir del 30 de junio).

Localización: en los puntos indicados a lo largo de los embalses citados.

Parámetros:

- concentración de Clorofila a en superficie y a 5 m. de profundidad, esta última con la intención de corregir el dato superficial con otro de la zona eufótica.

- transparencia (profundidad del disco de Secchi).
- temperatura del agua en superficie.

Evidentemente, para realizar el trabajo propuesto es necesario contar con la imagen TM que abarque los embalses del estudio. En este caso corresponde la escena 200/32, es decir, Órbita 200, Fila 32.

Sin embargo, se ha podido ajustar al zona de interés dentro de una Miniescena de Landsat (68 km. en sentido E-O y 55 km. N-S, 2284 x 1835 píxeles de imagen), con unas coordenadas de centro de imagen de N 40°30' y O 2°37' (Longitud del meridiano de Greenwich).

Las fechas en que la zona estaba cubierta por nubes son inutilizables para los fines previstos. Por eso sólo se han podido aprovechar cuatro (marcadas con un asterisco):

30	de junio	• Cubierto
* 16	de julio	• Casi despejado
1	de agosto	• Muy nuboso
* 17	de agosto	• Despejado
* 2	de setiembre	• Despejado
* 18	de septiembre	• Casi despejado
4	de octubre	• Casi cubierto

#### ***Cartografía temática de los embalses***

El proceso de imágenes se ha realizado con el programa GRASS 4.0, (Geographical Resources Analysis Support System). El análisis estadístico se ha realizado mediante el paquete estadístico STATPRO.

El desarrollo de los trabajos realizados puede esquematizarse como sigue:

- Carga de imágenes digitales (escenas TM en soporte de CCT) en ordenador HP 9000/840 CH, a través de la unidad de cinta magnética.
- Identificación, en pantalla, de los píxeles correspondientes a los puntos de muestreo. Extracción, de los valores radiométricos multispectrales correspondientes.
- Análisis estadístico de datos, consistente en regresiones lineales múltiples mediante un procedimiento de iteración selectiva. Como variables independientes figuran los valores de "conteo" radiométrico registrados en las bandas espectrales TM, mientras que la variable dependiente es la concentración de clorofila o la profundidad de Secchi. La iteración consiste en la agregación progresiva y selectiva de variables independientes, por su grado de represen-

tatividad. El proceso se da por concluido cuando la mejora obtenida es muy pequeña o negativa (Ortiz y Peña, 1987).

- Cuando el análisis de regresión entre datos de campo y valores radiométricos no ofrece un ajuste satisfactorio o simplemente, como en este caso se desea obtener una ecuación multitemporal para los embalses en las distintas fechas, se procede a la aplicación de un proceso de "normalización" de la imagen, que pretende eliminar las diferencias entre imágenes debidas a las distintas condiciones atmosféricas, ángulo de incidencia solar, etc.
- Delimitación de contornos de embalses, estableciendo un valor "umbral" que se empleará para crear una máscara para eliminación del terreno circundante.
- Cálculo de imágenes-resultado, aplicando las ecuaciones de regresión para clorofila a y transparencia, mediante los módulos correspondientes del paquete que se utiliza.
- Atribución de un código de colores a una serie de intervalos numéricos, elegidos para ofrecer una gama de dieciséis categorías que identifican y agrupan a todos los niveles posibles. Ello facilita la interpretación de las imágenes resultantes de las combinaciones de bandas.
- Superposición a la cartografía temática de cada embalse de la imagen del terreno que le rodea, eligiéndose para ella tonos de gris, con el fin de que no se interfieran con los colores correspondientes a las categorías que identifican los rangos de concentración de clorofila ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) y de profundidad de Secchi (m.).

### *Normalización de imágenes*

Cuando se ha efectuado la normalización de las imágenes, se ha tomado como fecha de referencia la del 18 de septiembre, más completa de datos de campo, que son base de la calibración de las ecuaciones, y mejor ajuste clorofila-datos radiométricos; estas bandas normalizadas se utilizaron para desarrollar con ellas la ecuación de clorofila que ha sido aplicada con carácter general, salvo en el caso del 2 de septiembre, que presenta falta de datos (por pérdida de muestras en accidente de tráfico), en que se aplicó la desarrollada para el 17 de agosto.

Para ajustar la mejor ecuación general de transparencia se procedió a normalizar todas las fechas tomando como referencia la del 16 de julio. Con todas esas bandas normalizadas se desarrolló la ecuación que se ha aplicado con carácter general.

En dichos procesos se han obtenido los histogramas de imagen, las frecuencias relativas de cada valor radiométrico, y se han extraído los valores correspondientes a unas frecuencias del 99,9%, 99,95%, 99,99%, es decir, los valores que identifican los puntos de máxima reflectancia de las áreas de imagen en contraste y, del mismo mo-

do, los de mínima reflectancia relativa. Se realiza una regresión lineal entre las bandas (de referencia y a normalizar), ponderando 8 veces los niveles más bajos. Mediante esta ecuación se obtiene la banda "corregida" o "normalizada", que viene a resultar equivalente radiométricamente a la de referencia, que se toma como origen.

Esta técnica es una adaptación simplificada de la que aplica el investigador estadounidense David Eckhardt del US Bureau of Reclamation, (Eckhardt, 1988).

### ***Desarrollo de ecuaciones representativas***

El desarrollo de ecuaciones ha comprendido un amplio análisis estadístico con el propósito inicial de desarrollar ecuaciones de aplicación general, que es un objetivo deseable cuando se trata de estudios multitemporales como el presente.

Las ecuaciones que finalmente se han aplicado para elaborar los mapas temáticos han sido las siguientes:

#### *– Clorofila a*

Ecuaciones con bandas normalizadas al 18.09.92:

$$\ln(\text{Cif}) = 6.2715 + 0.2775 \cdot \text{B2NS} - 0.1883 \cdot \text{B1NS} - 0.0109 \cdot \text{B3NS}$$

[Coef. determinación: 0.7074; Desv. típ. estima: 0.65]

(aplicada en 16.07, 17.08 y 18.09)

[BxNS = bandas normalizadas al 18.09]

Ecuación del 17.08.92 (bandas normalizadas al 18.09.92):

$$\ln(\text{Cif}) = 0.1411 \cdot \text{B3NS} - 2.6213$$

[Coef. determinación: 0.5000; Desv. típ. estima: 0.83] (aplicada en 02.09.92)

[BxNS = bandas normalizadas al 18.09]

#### *– Transparencia de Secchi*

Ecuación con bandas normalizadas al 16.07.92

$$se = 11.66903 - 0.3662 \cdot \text{B2NJ} + 0.614 \cdot \text{B1NJ}$$

[Coef. determinación: 0.6976; Desv. típ. estima: 0.33]

(aplicada a 16.07, 17.08, 02.09 y 18.09)

[BxNJ = bandas normalizadas al 16.07]

#### ***Temperatura***

Para la evaluación y cartografía de temperatura de la superficie de los embalses, el proceso de datos es más sencillo y consiste en una calibración de los datos de conteos digitales de la banda infrarroja térmica TM (Bartolucci, 1985). Los valores calibrados son sometidos a una corrección lineal en función de la humedad relativa y la temperatura del aire correspondientes a la fecha de la imagen (Price, 1983), utilizando los datos de Radiosondeos meteorológicos del INM.

Ecuaciones de temperatura con corrección atmosférica

16.07.92	--	T°C	=	0.5128*B6	--	44.257
17.08.92	--	T°C	=	0.4783*B6	--	41.1544
02.09.92	--	T°C	=	0.4721*B6	--	39.9974
18.09.92	--	T°C	=	0.4631*B6	--	38.962

[B6 = banda 6 TM]

**Estudio multitemporal de embalses**

La utilización de un Sistema de Información Geográfica, como es el GRASS, permite realizar estudios para poner de manifiesto la evolución de los parámetros a través de sucesivas imágenes de distintas fechas.

Para proceder al estudio comparativo la primera operación es hacer coincidentes y "superponibles" las imágenes digitales, lo que requiere llevar a cabo la georreferenciación de las mismas, es decir transformar su marco de "coordenadas de imagen" (columna, fila) en otras "coordenadas geográficas" (UTM por ejemplo).

A partir de los mapas temáticos de cada fecha se han obtenido imágenes de diferencias, en las que, codificadas cromáticamente se representan las áreas en que se han producido cambios para mejorar o empeorar las condiciones del agua, tanto en lo que se refiere a concentración de Clorofila a, como a transparencia.

Estas diferencias se han obtenido entre fechas sucesivas y entre la primera y la última.

**Resultados**

**Mapas temáticos de embalses**

La aplicación de las ecuaciones a las distintas bandas de cada fecha da como resultado una serie de mapas temáticos de los parámetros.

Las reproducciones de los mapas temáticos han sido obtenidas mediante una impresora de transferencia térmica conectada como periférico a la estación de trabajo gráfica HP-9000-340-CH.

En la presentación de las imágenes se han establecido dos ventanas de imagen, una de ellas recoge la zona ocupada por el Embalse de Entrepeñas y la otra la de los de Buendía y Bolarque.

Para cada ventana se presentaron tres mapas temáticos referentes a tres variables: a) concentración de clorofila; b) transparencia según el disco de Secchi, y c) tempe-

ratura del agua. En cada mapa se indica la escala gráfica del mismo, así como la fecha a que corresponde la imagen.

Para cada una de las tres variables representadas, se ha establecido un código de colores, en el que se distinguen diez rangos de valores (de amplitud no necesariamente constante), tal como se muestra en las correspondientes leyendas. La elección de colores se ha hecho de manera que el rojo represente el grado más eutrófico o la temperatura más alta.

#### *Estudio de la evolución multitemporal*

Se han elaborado unas imágenes compuestas de cuatro mapas de diferencias cada una, con las variaciones detectadas entre fechas (16.07 - 17.08; 17.08 - 02.09; 02.09 - 18.09) y una cuarta del período total (16.07 - 18.09), indicándose en cada una de ellas por colores las mejoras (tonos azulados crecientes) o empeoramientos (tonos anaranjados crecientes) detectados, así como las zonas sin cambio de categoría (rango de valores), que se representan en blanco.

Los valores de la leyenda, entre -9 y +10 hacen referencia al cambio de categoría experimentado.

#### *Discusión y conclusiones*

La teledetección por satélite de los recursos naturales, aplicada al estudio puntual y de la evolución de la calidad de las masas de agua continentales, se ha manifestado en los últimos años como una herramienta de gran utilidad para el conocimiento a nivel regional del estado trófico de nuestros embalses.

La evolución de los parámetros limnológicos a lo largo de un período de estudio se lleva a cabo con éxito a través de Sistemas de Información Geográfica, que integran la información de cada fecha en forma georreferenciada.

Fecha dd. MM	Emb.	Sup. em. ha	Clf a mg/m <sup>3</sup>	dif. Clf mg/m <sup>3</sup>	Sec. m	dif. Sec. m	Temp. °C	dif. Tem. °C
16.07.92	Ent	1354	1.76	-	2.4	-	23.2	-
	Bue	2521	1.21	-	2.6	-	23.4	-
	Bol	469	2.10	-	5.2	-	23.0	-
17.08.92	Ent	1183	3.58	+ 1.82	3.1	+ 0.7	26.7	+ 3.5
	Bue	2368	1.46	+ 0.25	3.0	+ 0.4	27.2	+ 3.5
	Bol	528	2.97	+ 0.87	5.4	+ 0.2	27.1	+ 4.1
02.09.92	Ent	1029	2.75	- 0.83	3.2	+ 0.1	21.8	- 4.9
	Bue	2278	2.90	+ 1.44	2.7	- 0.3	21.9	- 5.3
	Bol	440	1.65	- 1.32	5.4	- 0.0	21.6	- 5.5
18.09.92	Ent	941	4.41	+ 1.66	2.9	- 0.3	22.2	+ 0.4
	Bue	2285	1.42	- 1.44	3.1	+ 0.4	22.2	+ 0.3
	Bol	497	3.28	+ 1.63	5.4	- 0.0	22.9	+ 1.3
16.07-18.09	Ent	- 413	-	+ 2.65	-	+ 0.5	-	- 1.0
	Bue	- 246	-	+ 0.21	-	+ 0.5	-	- 1.2
	Bol	+ 32	-	+ 1.18	-	+ 0.2	-	- 0.1

Tabla 1

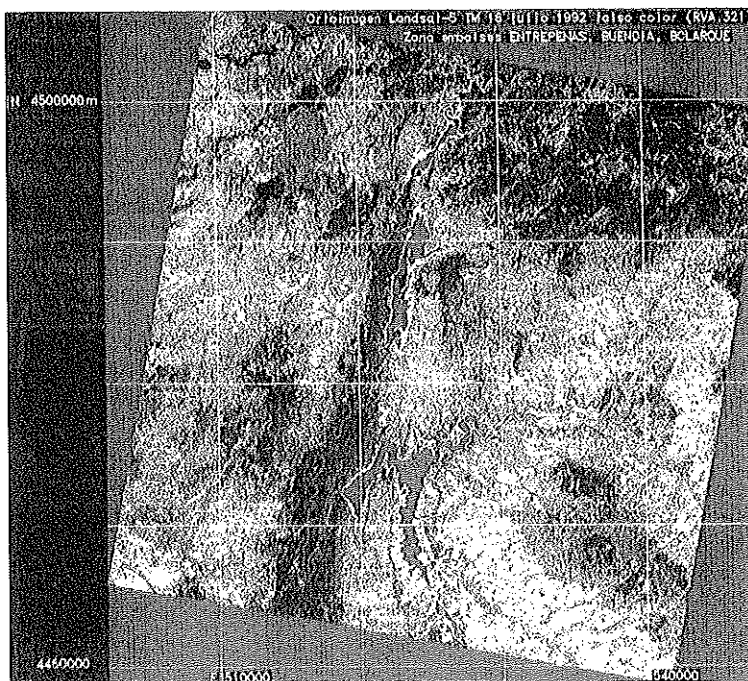
Valores medios, por embalses, durante el período y sus diferencias entre fechas

\* La superficie es la obtenida de las imágenes, la que figura entre paréntesis es la facilitada por la Comisaría de Aguas del Tajo.

Clf = Clorofila (mg/m<sup>3</sup>); Sec = Transparencia (m); T = Temperatura  
 dClf, dSe, dT = diferencias con la fecha anterior (o del período)  
 [TSI] = índice de estado trófico de Carlson (para Clorofila)



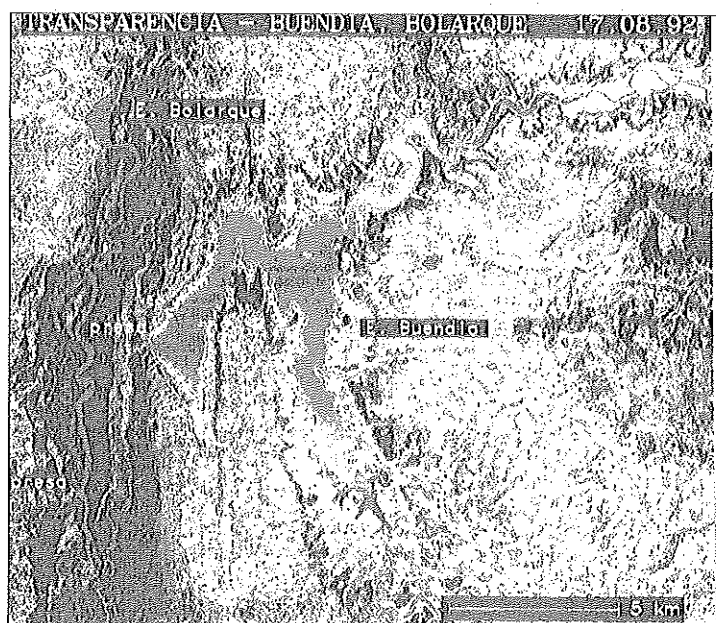
**Imágenes digitales**



*Miniescena georreferenciada. (A. 15)*

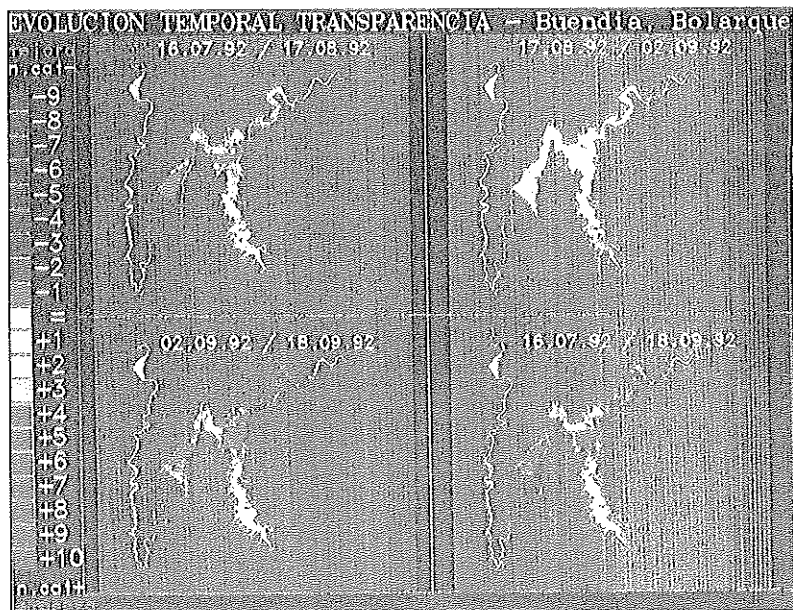
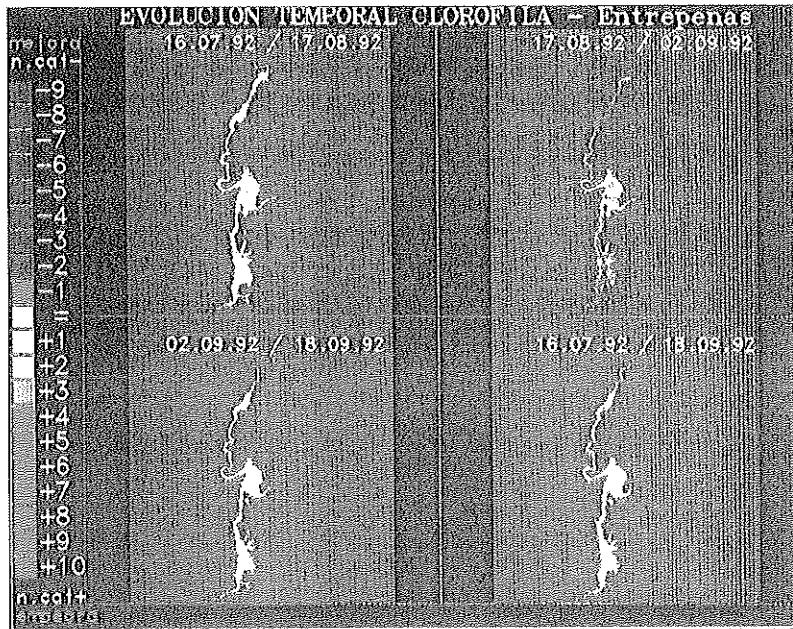
CLOROFILA		TRANSPARENCIA		TEMPERATURA	
0,0 - 1	OL	> 10,00		≤ 15,0	°C
1,1 - 2	OL	8,1 - 10,00		15,1 - 17,0	
2,1 - 4	OL	6,1 - 8,0		17,1 - 19,0	
4,1 - 6	OL	4,1 - 6,0		19,1 - 21,0	
6,1 - 15	ME	3,1 - 4,0		21,1 - 23,0	
16,1 - 25	ME	2,6 - 3,0		23,1 - 25,0	
25,1 - 35	EU	2,1 - 2,5		25,1 - 27,0	
35,1 - 45	EU	1,1 - 2,0		27,1 - 29,0	
45,1 - 55	EU	0,5 - 1,0		29,1 - 30,0	
> 55,0	EU	< 0,5		> 30,0	

*Leyenda de los mapas temáticos. (A. 16)*



Mapas temáticas. (A. 17)

*Evolución del estado trófico de los embalses  
de Entrepeñas, Buendía y Bolarque por teledetección*



*Imágenes de diferencias multitemporales. (A. 18)*

### **Bibliografía**

- Blackwell, R.J. & D.H. Boland:** 1979. Trophic classification of selected Colorado lakes. Jet. Prop. Lab. Publication 78-100, EPA. 600/4-79-005.
- Carlson, R.E.:** A trophic state index for lakes. *Limnology & Oceanography*, mar 1977, V. 22 (2).
- Chuvieco, E.:** 1990. Fundamentos de Teledetección espacial. Rialp. 453 p.
- Eckhardt, D.:** 1988. A method of Landsat 5-TM imagery normalization for reservoir multivariate studies. Comunicación personal.
- Lathrop, R.G. Jr. & T.M. Lillesand:** 1986. Utility of Thematic Mapper data to assess water quality in southern Green Bay and west-central Lake Michigan. *Photogr. Engin. & Rem. Sens.*, Vol. 52, pp. 671-680.
- Lathrop, R.G. Jr.** 1992. Landsat Thematic Mapper monitoring of turbid inland water quality. *Photogr. Engin. & Rem. Sens.*, Vol 58, No. 4, pp. 465-470.
- Lillesand, T.M., et al.:** 1983. Use of Landsat data to predict the trophic state of Minnesota lakes. *Photogr. Engin. & Rem. Sens.*, 49: 219-22.
- Martin, R.H. et al.:** 1983. Wisconsin's Lakes. A Trophic Assessment Using Landsat Digital Data. WI DNR Report S00536601, Madison, Wisconsin, 124 p.
- Ortiz, J.L. & Peña, R.:** 1987. Remote sensing of limnological parameters in reservoirs. In: Workshop on Landsat Thematic Mapper Applications, Frascati, Italia, Dic. ESA SP-1102.
- Ortiz, J.L. & Peña, R.:** 1989. Water quality monitoring in Spanish Reservoirs by satellite remote sensing. CEDEX.
- Peña, R. & Ortiz, J.L.:** 1987. Cartografía temática de embalses: aplicaciones limnológicas de las imágenes Landsat. En: Comunicaciones de la I Reunión Científica del Grupo de Trabajo en Teledetección. Inst. Inv. Geol. Jaume Almera. Barcelona, 10-11 dic. 1986, p. 403-423.
- Scarpace, F.L., Holmquist, K.W. & Fisher, L.L.:** 1979. Landsat analysis of lake quality. En: *Photogr. Engin. & Rem. Sens.* 45 (5) : 623-633.
- Verdin, J.P.:** 1984. Limnological applications of multispectral remote sensing. USBR Report No. REC-ERC-85-2. 51 p.
- Verdin, J.P.:** 1985a. Monitoring water quality conditions in a large Western reservoir with Landsat Imagery. En: *Photogr. Engin. & Rem. Sens.* 51 (3): 343-353.
- Verdin, J.P.:** 1985b. Multidate Landsat water quality models. Comunicación personal.
- Verdin, J.P.:** 1985c. Mapping surface water quality patterns of Lake Havasu with Thematic Mapper imagery. *Appl. Sci. Refer. Memo.* No. AP. 85-4-2. USBR.