

RECONOCIMIENTO LIMNOLOGICO DE EMBALSES POR TELEDETECCION: APLICACION A LA CUENCA DEL TAJO

J. L. ORTIZ CASAS (*)

R. PEÑA MARTINEZ (*)

RESUMEN. Las imágenes digitales multispectrales que proporciona periódicamente el sensor «Thematic Mapper» desde el satélite Landsat-5, permiten elaborar una cartografía temática de la superficie de los embalses. Para ello es necesario calcular, mediante un análisis estadístico iterativo de regresión múltiple, aquellas combinaciones lineales de bandas espectrales que mejor se correlacionan con los parámetros limnológicos a representar, en base a una serie de mediciones realizadas en los embalses, coincidiendo con las tomas de imágenes.

El C.E.H. ha aplicado esta técnica al reconocimiento limnológico de todos los embalses de la cuenca del Tajo, a fin de evaluar sus condiciones de eutrofia durante el verano de 1988, en función de la concentración de clorofila en superficie, y de la profundidad de Secchi, como medida de la transparencia del agua.

ABSTRACT. Multispectral digital imagery periodically acquired by the «Thematic Mapper» sensor on board of the Landsat-5 satellite, permits the development of thematic mapping of reservoirs water surface. For this purpose, it is necessary to apply a multiple stepwise regression analysis, in order to assess those spectral band lineal combinations best fitting the parameters to be monitored, based on sets of concurrent ground-truth values.

The CEH applied this approach to the limnological survey of all reservoirs within the Tajo drainage basin, in order to assess the trophic conditions as represented by chlorophyll concentration and Secchi depth transparency.

1. INTRODUCCION

La realización de una eficaz estrategia de control de la contaminación de los embalses exige disponer de una información actualizada y completa sobre aquellas condiciones o parámetros de calidad del agua que se desea controlar. Para ello es necesario llevar a cabo unos reconocimientos limnológicos apropiados de los embalses en cuestión. Cuando el ámbito de actuación incluye embalses de gran extensión o abarca todos los comprendidos en una amplia cuenca hidrográfica, el empleo de métodos convencionales resulta difícilmente operativo y altamente costoso. En tales circunstancias, un medio alternativo para la realización de tales reconocimientos, en lo que concierne a la superficie de los embalses y a ciertas características, lo ofrece la teledetección espacial, en particular aquella que hace uso de sensores multispectrales de la energía electromagnética reflejada o emitida por la superficie de la Tierra (Blackwell y Boland, 1979; Scarpace et al., 1979).

La principal ventaja que ofrece la teledetección por satélite es la disponibilidad automática, rápida y periódica,

de unas imágenes digitales de cualquier punto geográfico, basadas en las diversas reflectancias y emittancias del terreno para distintas bandas del espectro electromagnético visible e infrarrojo. Además, la resolución espacial ofrecida por los sistemas sensores es lo suficientemente buena como para poder elaborar una cartografía temática de la superficie de los embalses referente a ciertas variables limnológicas de interés, tales como la temperatura y la transparencia del agua, los sedimentos en suspensión, la concentración de clorofila, etc.

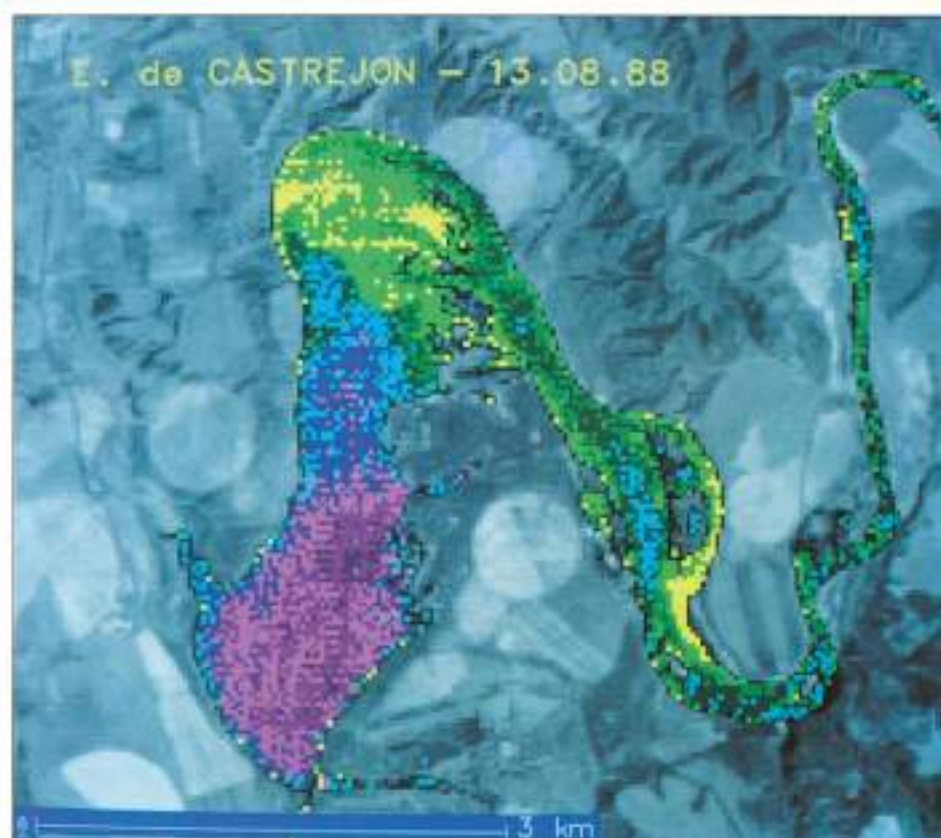
Si bien es preciso contar siempre con el apoyo de mediciones limnológicas directas, la existencia de grandes programas informáticos, tanto para análisis estadísticos como para proceso de imágenes digitales, y los llamados «SIG», o Sistemas de Información Geográfica, hacen posible mejorar progresivamente esta técnica y minimizar la necesidad de datos de campo.

2. LA TELEDETECCION POR SATELITES LANDSAT

2.1. GENERALIDADES SOBRE TELEDETECCION ESPACIAL

La función de los satélites de observación de la Tierra, tales como Landsat, SPOT y MOS, es la de servir de vehículo portador, siguiendo órbitas heliosíncronas, a un

(*) Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX IMOPUI.



Mapa térmico de transparencia del Embalse de Castrejón, correspondiente al día 13 de agosto de 1988.

dispositivo radiométrico dotado de una serie de sensores «pasivos» o células fotoeléctricas. Estos sensores son capaces de detectar la energía electromagnética reflejada, emitida o dispersada desde la superficie de la Tierra a través de la atmósfera. Las variaciones de energía son transformadas en variaciones de voltaje, originando unas señales o «conteos» electrónicos que son registrados en sistema binario sobre soporte de cinta magnética. Cada señal o pulsación electrónica corresponde a la energía recibida conjuntamente desde un «campo de visión instantánea» de la superficie del terreno, el cual constituye un elemento de imagen o «pixel».

La energía que llega al equipo sensor se descompone, según las longitudes de onda de las distintas radiaciones recibidas, en varias bandas del espectro electromagnético, de modo que a cada banda discriminada por el sistema corresponde un detector o conjunto de detectores. Ello significa que en cada momento se obtienen tantas imágenes digitales de un mismo lugar como bandas espectrales permite distinguir el equipo. Concretamente el sensor «Thematic Mapper», que es transportado por el satélite Landsat-5, permite distinguir siete bandas espectrales, desde la «azul» hasta la «infrarroja térmica».

La gran utilidad de las imágenes multispectrales reside en el hecho de que cada «objeto» típico de la

superficie terrestre (bosque, lago, pradera, etc.) presenta una «firma» o respuesta espectral característica, es decir, una composición característica de las reflectancias correspondiente a cada longitud de onda (Lillesand, 1979; Harris, 1987).

A su vez, la firma espectral de un objeto puede estar sometida a ciertas variaciones temporales y espaciales según los contrastes que presente aquél, tales como los debidos a enfermedades criptogámicas en masas vegetales o a proliferaciones de algas en embalses.

En la figura 1 se representan unas curvas generalizadas de reflectancia espectral para tres tipos de superficie terrestre: vegetación verde, suelo limoso y agua limpia. Las masas de agua no contaminadas absorben totalmente las radiaciones del infrarrojo próximo ($\lambda > 0,75 \mu\text{m}$) en tanto que el suelo y la vegetación muestran, por el contrario, una reflectancia muy elevada en la misma zona del espectro electromagnético. Ello facilita extraordinariamente la delimitación del contorno de los embalses a partir de imágenes digitales obtenidas en dicha banda espectral. De hecho, la reflectancia del agua no contaminada sólo tiene lugar a lo largo del espectro visible, con valores siempre inferiores a las reflectancias exhibidas por el suelo y la vegetación. Para embalses suficientemente profundos, y al margen de la reflectancia ofrecida estrictamente por la superficie del agua (la llama-

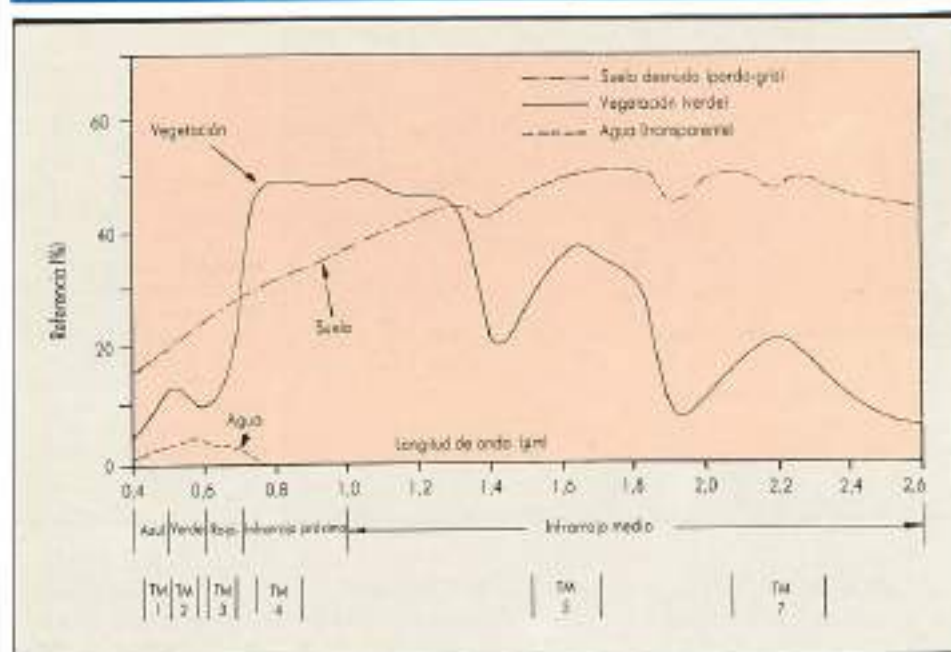


FIGURA 1. Curvas típicas de reflectancia espectral para masas de vegetación verde, suelos limosos y aguas no contaminadas. Se indican también las bandas espectrales cubiertas por el sensor TM, excepto la infrarroja térmica (banda 6).

da reflexión «especular»), cuando aumenta la concentración de clorofila de los embalses (síntoma de eutrofización creciente) suele disminuir la reflectancia en la banda azul y aumentar en la verde (Lillesand, 1979; Almanza y Melnick, 1985). Ello quiere decir que si, en lugar de una masa de agua transparente, se hubiesen representado en la figura 1 las reflectancias de unas aguas eutróficas (es decir, con gran producción de algas y alto contenido de clorofila), la curva representativa se acortaría por la izquierda y se extendería por la derecha hasta abarcar toda la banda infrarroja próxima.

Por otra parte, hay que subrayar que, a causa de la absorción atmosférica, las radiaciones que llegan hasta los sensores de los satélites se limitan a unas «ventanas», o porciones del espectro, más o menos amplias. Así, la absorción atmosférica es prácticamente total para radiaciones de longitud de onda $\lambda < 0.3 \mu\text{m}$ (ultravioletas), debido a la presencia de ozono, mientras que en algunas porciones de la banda infrarroja media es el anhídrido carbónico la causa principal de la absorción existente en la misma (figura 2).

De ahí que el conjunto de las bandas espectrales cubiertas por un sistema sensor no cubran una porción continua del espectro electromagnético, sino que hayan de adaptarse a las ventanas disponibles.

2.2. LAS IMÁGENES «THEMATIC MAPPER»

Hasta la fecha, la mayor parte de la oferta comercial de imágenes digitales de la superficie de la Tierra, a disposición de cualquier usuario, procede de los sistemas sensores «Multispectral Scanner» (MSS) y «Thematic Mapper» (TM), que se encuentran operando a bordo de los satélites de la NASA de la serie Landsat. El sensor MSS

empezó a proporcionar imágenes desde el comienzo de la serie, en julio de 1972, mientras que el sensor TM se incorporó en 1982, con el lanzamiento del Landsat-4. En la actualidad, sólo está en pleno servicio el Landsat-5, que continúa manteniendo un sensor MSS, además del TM, mientras que el Landsat-4 mantiene una actividad restringida. Las ventajas del TM sobre el MSS para la cartografía temática de embalses son bien significativas y ya han sido comentadas en las páginas de esta Revista (Ortiz y Peña, 1988). Baste recordar aquí que el tamaño del «pixel» TM corresponde aproximadamente en el terreno a un cuadrado de $30 \times 30 \text{ m}$ (en lugar de $80 \times 80 \text{ m}$) y que sus resoluciones espectrales (7 bandas) y radiométricas (256 niveles de gris) son notablemente superiores a las del MSS.

En ambos casos, las imágenes son comercializadas por «escenas», es decir, por el contenido de información multispectral que corresponde, aproximadamente, a una superficie de terreno de $185 \times 185 \text{ km}$. Dado el precio relativamente elevado de imágenes TM, éstas pueden, no obstante, ser adquiridas por cuartos de escena, en soporte de cinta magnética compatible con ordenador (CCT). En la tabla 1 se resumen las características más generales de las órbitas Landsat-5 y las imágenes TM.

Para la identificación de cualquier escena de la superficie terrestre, se utilizan las coordenadas WRS (Worldwide Reference System), compuestas por un número de órbita y un número de fila, ambos de tres dígitos. Las órbitas están numeradas en dirección este-oeste, a partir de la 001, que pasa por el oeste de Groenlandia y América del Sur, mientras que las filas se numeran de norte a sur, desde el paralelo 80° N . El

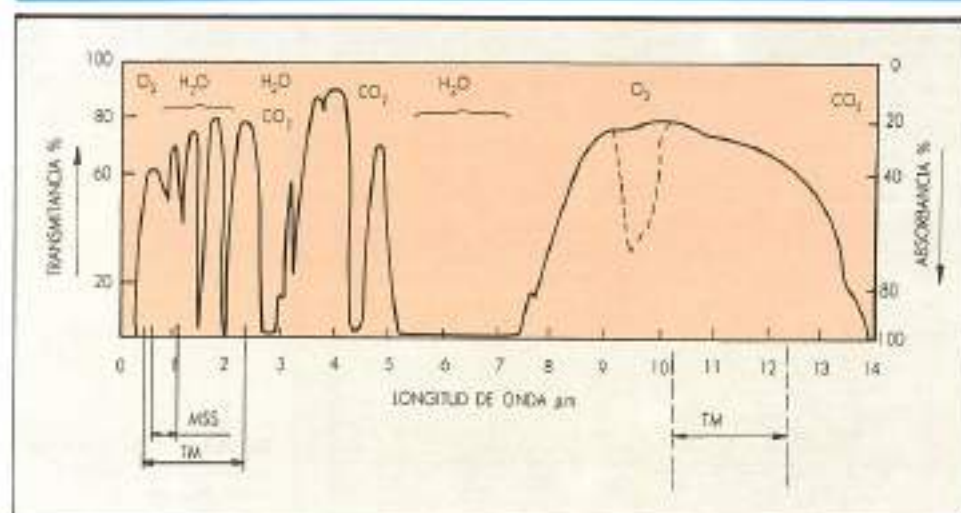


FIGURA 2. Transmisión y absorción atmosféricas, con indicación de los gases causantes de la absorción y de las bandas espectrales parcialmente cubiertas por los sensores MSS y TM. Las porciones espectrales de transmisión más elevada constituyen ventanillas atmosféricas.

conjunto del sistema comprende 223 órbitas y 119 filas. Por lo que se refiere a la Península Ibérica, su territorio queda cubierto entre las órbitas 197 y 205, y las filas 030 y 035.

Si bien la investigación y desarrollo tecnológicos relativos a los satélites Landsat es competencia de la NASA, el mantenimiento de los equipos y la producción y comercialización de las imágenes digitales fueron transferidas a la Compañía EOSAT en 1985. En Europa, la adquisición, proceso y distribución de imágenes Landsat está encomendada a la Agencia Espacial Europea (ESA) mediante el Programa Earthnet, a través del consorcio empresarial europeo EURIMAGE, con centro principal en Frascati (Italia) y estaciones de recepción de datos situadas en Kiruna (Suecia), Fucino (Italia) y Maspalomas (España). En Frascati, la información recibida es sometida a unos procesos previos de corrección geométrica y radiométrica, en función de las variaciones de altitud y latitud, así como a una calibración de los detectores instalados en el satélite.

3. PROCESO DE DATOS PARA APLICACION A RECONOCIMIENTOS LIMNOLOGICOS DE EMBALSES

En los trabajos de aplicación a cartografía temática de embalses, cabe distinguir dos tareas básicas de proceso de datos: a) Tratamiento y manejo de las imágenes digitales, b) análisis estadístico de regresión múltiple entre los datos radiométricos de las imágenes y datos limnológicos directos (Verdín, 1984; 1985). Esencialmente, el objeto de esta segunda tarea es obtener una extrapolación válida de los datos de campo, obtenidos para unos píxeles determinados, a toda la superficie de los embalses incluidos en la imagen.

La primera tarea se realiza mediante los sistemas de tratamiento de imágenes digitales. En el caso de los trabajos realizados por el Centro de Estudios Hidrográficos (Ortiz y Peña, 1989), se ha utilizado primeramente

el programa AID («Analyse d'Images Digitales»), continuando después con GRASS 3.0 (Geographical Resource Analysis Support System). Este último ha sido obtenido y adaptado al «hardware» de Hewlett-Packard, gracias al último Convenio Hispano Norteamericano con el US Bureau of Reclamation. En cuanto al análisis de regresión múltiple, ha sido empleado el paquete estadístico STATPRO, igualmente suministrado al CEDEX a través del Bureau.

El desarrollo de los trabajos realizados por el CEH

Órbita heliosíncrona, subpolar N-S	
Altura media nominal	705 km
Período orbital	98,9 minutos
Número de órbitas por día	14,56
Ciclo de repetición	16 días
Número de días entre una órbita y la siguiente (al oeste)	7 días
Tamaño de escena	185 x 185 km
Salida entre escenas consecutivas (en el Ecuador)	7,6 %
Número de bandas espectrales	7
Tamaño de píxel (excepto banda térmica)	30 x 30 m
Tamaño de píxel (banda térmica)	120 x 120 m
Niveles de cuantización niveles de gris	256
Número de detectores: $6 \times 16 + 1 \times 4 =$	100

TABLA 1. Características generales del satélite LANDSAT-5 y de las imágenes TM.

puede esquematizarse como sigue (Peña y Ortiz, 1990):

1. Carga de imágenes digitales (cuartos de escena TM en soporte de CCT o cinta compatible con ordenador) en ordenador HP 9000/840 CH.
2. Selección de subescenas de embalses, e identificación de las coordenadas de imagen tomadas como origen de subescenas. Transferencia de datos en «disquetes», a un ordenador personal IBM, con el paquete AID y monitor NEC «multisync» de 14" (640 × 480 píxeles).
3. Identificación, en pantalla, de los píxeles correspondientes a los puntos de muestreo. Para ello, se han superpuesto transparencias de los mapas topográficos de embalses sobre la imagen visualizada en pantalla. Estos mapas han sido previamente ajustados fotográficamente a la escala de la imagen en el monitor.
4. Extracción, por ordenador IBM PC-AT, de los valores radiométricos multispectrales («conteos» electrónicos de cada banda TM) correspondientes a los píxeles de los puntos de muestreo y a los ocho píxeles circundantes. Listado de datos por bandas espectrales TM, los cuales constituyen, junto con los datos limnológicos directos, la base para regresiones estadísticas múltiples.
5. Análisis estadístico de datos, a base de regresiones lineales múltiples por iteración progresiva. Las variables independientes son los valores de «conteos» radiométricos registrados en cada banda espectral TM, en tanto que la variable dependiente es la del parámetro limnológico escogido (concentración de clorofila, transparencia según profundidad del disco de Secchi, etc.).

La transferencia de los datos de las bandas TM se efectúa a través de ficheros grabados en discos flexibles de 5,25", que se convierten del sistema DOS al UNIX, ya que es éste el sistema en que opera la estación de trabajo gráfica utilizada, HP-9000/840 CH, con un monitor en color de alta resolución (1280 × 1024 píxeles). Todas las operaciones que siguen se efectúan con el paquete GRASS.

6. Delimitación de contornos de embalses, estableciendo un valor umbral que se emplearía para crear una «máscara» del terreno.
7. Enmascaramiento del terreno por eliminación automática de todos los valores de píxeles superiores al umbral empleado para la delimitación de contornos de embalse y, en general, de todos aquéllos situados fuera del área ocupada por masas de agua.

Cuando, por alguna razón, del procedimiento estadístico de iteración no se obtiene un ajuste satisfactorio entre los datos limnológicos y los valores radiométricos del satélite, es preciso recurrir a un proceso de «normalización» de las bandas espectrales TM. Este procedimiento proporciona una extrapolación en el tiempo, además de una extrapolación espacial, ya que hace uso de una ecuación obtenida en una fecha distinta a la de la imagen tratada. Para ello, se toman áreas comunes en zonas de solape entre escenas de órbitas contiguas y, por tanto, de diferentes fechas y con diferentes niveles de radiancia detectada desde el satélite, por efecto de las diferencias en las condiciones atmosféricas, el ángu-

lo solar, etc. En tales áreas se obtienen los histogramas de imagen, con las frecuencias relativas de cada valor radiométrico, a fin de extraer tanto los valores mínimos conjuntos como los correspondientes a unas frecuencias del 99,9 %, 99,95 % y 99,99 %, es decir, aquéllos que identifican los puntos de máxima reflectancia de las áreas de imagen contrastadas. Una vez efectuada dicha extracción, se realiza una regresión lineal simple por bandas espectrales (de un lado, los datos de la imagen/fecha de referencia; de otro, los datos de la imagen/fecha a normalizar), ponderando 8 veces los niveles más bajos. Esta ecuación de regresión permite «corregir» o normalizar la nueva imagen en la correspondiente banda espectral, tomando como origen la imagen de referencia anterior (Eckhardt, 1988).

8. Cálculo de imágenes-resultado, aplicando las regresiones para los parámetros limnológicos elegidos (clorofila y transparencia de Secchi), haciendo uso de los módulos correspondientes del programa GRASS.
9. Asignación de un código de colores a una serie de intervalos numéricos, elegidos para ofrecer una gama más o menos amplia de categorías que identifican y agrupan todos los niveles posibles. En los trabajos realizados, el código de colores elegido va desde el violeta oscuro (para representar el grado de eutrofia más bajo) hasta el rojo intenso (asociado al máximo grado de eutrofia).

10. Superposición de la imagen del terreno que rodea a cada embalse, eligiéndose para ello tonos de gris o sepia a fin de no interferir los colores correspondientes a las categorías que identifican los rangos elegidos para los parámetros limnológicos.

4. APLICACION A LOS EMBALSES DE LA CUENCA DEL TAJO

La aplicación de la teledetección por satélite al reconocimiento limnológico extensivo de embalses encuentra un campo idóneo en la cuenca del Tajo por varias razones:

- A. Gran número de embalses, hasta un total de 123, incluidos en el estudio.
- B. Distancias considerables, en muchos casos, desde los laboratorios de recepción y análisis de muestras de agua a los embalses.
- C. Dimensiones muy amplias de algunos de ellos, pudiéndose alcanzar superficies de 3.000 ha con longitudes de hasta 100 km.
- D. Problemas de calidad de las aguas en buena parte de los embalses de la cuenca, con grados distintos de importancia y evolución, según las zonas.

Ante tales circunstancias, entre 1988 y 1989 el CEDEX ha llevado a cabo, para la Confederación Hidrográfica del Tajo, un trabajo de aplicación de imágenes Landsat-TM al reconocimiento limnológico de todos los embalses de dicha demarcación hidrográfica, con miras a una evaluación del alcance e intensidad de la eutrofización manifestada por los mismos. Las características y resultados de este trabajo (Peña y Ortiz, 1990), se resumen a continuación.

4.1. TRABAJOS REALIZADOS

Las características limnológicas elegidas para cartografía temática y clasificación de los embalses son la concentración de clorofila (en mg/m^3) y la profundidad de visión del disco de Secchi (m) como medida de la transparencia del agua. A fin de obtener el necesario apoyo de datos directos, se realizó en el verano de 1988 un programa de trabajos de campo, consistente en tomas de muestras de agua y determinaciones «in situ», efectuadas en una serie de puntos distribuidos entre un reducido número de embalses elegidos al efecto. La extrapolación de dichos datos no sólo se ha aplicado a los embalses donde se hicieron los muestreos, sino a todos aquellos comprendidos dentro de la misma escena, aunque no hayan sido objeto de muestreos.

Dado que la toma directa de datos limnológicos ha de efectuarse coincidiendo con el paso del satélite Landsat, los trabajos de campo tienen que ser programados ajustándose al calendario previsto para los distintos pasos orbitales del satélite sobre la cuenca. Además, el requisito imprescindible de que el cielo se encuentre perfectamente despejado sobre las zonas ocupadas por los embalses a la hora de paso del satélite (10:30 h, hora solar, aproximadamente), supone generalmente una reducción del número de fechas disponibles para aprovechamiento de las imágenes Landsat.

4.1.1. Disponibilidad y elección de imágenes Landsat-TM

Evidentemente, para realizar el trabajo propuesto hay que contar con tantas imágenes TM (cuartos de escena) como sean necesarias para abarcar todos los embalses de la cuenca. En la cuenca del Tajo, son cuatro las órbitas Landsat que atraviesan su superficie: 200, 201, 202 y 203. Dado que en cada fecha sólo se obtienen imágenes de una sola órbita, se necesitan, como mínimo, cuatro fechas para obtener una información de toda la cuenca.

Las órbitas indicadas determinan, además, en qué fechas es posible adquirir imágenes Landsat de la cuenca del Tajo, con arreglo al calendario que se muestra en la tabla 2, por lo que afecta al período en que se realizó el reconocimiento. Las fechas indicadas con un asterisco

ORBITA	FECHAS					
	MAYO	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.
200	2, 18	3, 19	5, 21*	6, 22	7, 23	9, 25
201	9, 18	10, 26	12, 28*	13, 29	14, 30	16,
202	16,	1, 17	3, 19	4, 20*	5, 21	7, 23
203	7, 23	8, 24	10, 26*	11, 27	12, 28	14, 30

TABLA 2. Fechas de imágenes Landsat de la Cuenca del Tajo. (Período mayo-octubre 1988).

son las que finalmente fueron elegidas para el estudio, habida cuenta de la existencia de días con cielo nublado, y en función de los condicionamientos de tipo logístico y de los medios disponibles para los trabajos de campo.

Dada la anchura de la cuenca y su orientación general este-oeste, casi toda la superficie de la misma queda cubierta por el trazado de la fila 032 (coordenadas WRS), quedando sólo un 10 % de los embalses en zona de la fila 033. De este modo, las escenas necesarias para tener información completa de los embalses de la cuenca son las que se muestran en el mapa de la Fig. 3. En la Tabla 3 se especifican qué embalses están comprendidos dentro de cada cuarto de escena TM, pudiéndose apreciar que varios de ellos pueden ser observados alternativamente en escenas contiguas, gracias al solape lateral previsto entre las mismas.

4.1.2. Estrategia de toma de muestras y determinaciones de campo

Cada fecha de adquisición de imagen y toma de datos de campo implica el desarrollo de dos ecuaciones de regresión lineal múltiple en las que la variable dependiente es, respectivamente, la concentración de clorofila y la transparencia de Secchi. Para cada regresión estadística se considera conveniente contar con una población de unos 25 valores para cada una de ambas variables, correspondientes a otros tantos píxeles, distribuidos entre los embalses existentes dentro de uno o más cuartos de escena TM.

En consecuencia, en cada día de trabajo de campo (fecha de imagen Landsat) se ha intentado realizar muestreos y determinaciones en unos 25 puntos, aproximadamente, generalmente repartidos entre dos o tres embalses. A fin de evitar que la población estadística se concentre en un solo embalse, se ha seguido el criterio de aumentar, dentro de lo posible, el número de embalses visitados en cada día de trabajo, disminuyendo el número de puntos de muestreo por embalse.

Estimando que, por término medio, se cubren 2 cuartos de escena (cde) y tres embalses en cada día de muestreos, y teniendo en cuenta que para cubrir toda la cuenca se necesitan 14 cde (ver tabla 3 y figura 3), el número total de embalses en los que efectuar determinaciones sería:

$$\text{Número de días necesarios} = \frac{14 \text{ cde}}{2 \text{ cde/d}} = 7 \text{ d}$$

$$\text{Número de embalses} = 7 \text{ d} \times 3 \text{ emb/d} = 21 \text{ embalses}$$

De hecho, la agenda de trabajo de campo que se ha seguido es la que se indica en la tabla 3. Como se puede apreciar, el 21 de julio se abarcaron hasta tres cuartos de escena, mientras que hubo tres fechas en que sólo se abarcó un cde cada vez. En total, los 14 cuartos de escena TM que comprende la cuenca se han cubierto en ocho fechas, con un total de 18 embalses visitados.

4.1.3. Proceso de datos

El proceso de las imágenes digitales y el análisis estadístico de regresión iterativa se han realizado tal como



FIGURA 3. Mapa de la cuenca del Tojo, mostrando las escenas Landsat que cubren su territorio.

se ha indicado en 3, obteniéndose las ecuaciones que se muestran en la Tabla 4. Dado que ha habido algunos embalses para los que no pudo obtenerse un ajuste estadístico aceptable, ha sido necesario recurrir al procedimiento de «normalización» de imágenes mencionado anteriormente. Se han obtenido, de este modo, resultados satisfactorios tomando como base de extrapolación las ecuaciones del día 4 de agosto de 1988, desarrolladas para la órbita 202.

El código de colores atribuido a los valores de clorofila y profundidad de Secchi ha comprendido trece tonalidades o categorías. Para la clorofila, las categorías extremas han sido 5 mg/m³ (violeta oscuro) y 100 mg/m³ (rojo intenso). Para la transparencia de Secchi, los extremos han sido 10 m (violeta oscuro) y 0,25 m (rojo intenso). En las figuras 4 y 5 se muestran dos ejemplos de los mapas temáticos obtenidos.

4.1.4. Resultados

Los resultados de los trabajos realizados se han plasmado en una colección de mapas temáticos de clorofila y transparencia de Secchi, como los de las figura 4 y 5, codificados por colores, para todos y cada uno de los embalses de la cuenca (Peña y Ortiz, 1990).

Conviene subrayar que la información obtenida para cada embalse responde a las condiciones detectadas en

una fecha determinada (indicada en cada imagen), de tal modo que los resultados numéricos de concentración de clorofila y de transparencia del agua pueden diferir sensiblemente de los valores medios estivales. Un embalse puede, en efecto, presentar diferencias apreciables de biomasa de algas entre distintas fechas a lo largo del verano, aun cuando las fluctuaciones experimentadas se mantengan dentro del ámbito propio de una categoría trófica más o menos amplia. En consecuencia, si bien es posible otorgar unas calificaciones tróficas determinadas en base a los mapas temáticos obtenidos, no tiene mucha solidez establecer numerosas categorías intermedias.

Como síntesis de los resultados obtenidos, el gráfico sectorial de la figura 6 muestra los porcentajes de embalses comprendidos dentro de cada una de las 13 categorías referidas en 4.1.3., en función de la concentración de clorofila. El sector rayado menos densamente comprende el porcentaje de embalses oligotróficos (0-5 mg/m³), mientras que el sector con un rayado más oscuro (21-100 mg/m³) corresponde a embalses más o menos eutróficos. Finalmente, el sector blanco (6-20 mg/m³) representa el porcentaje de aquellos embalses que podríamos calificar como mesotróficos.

Aparte de las limitaciones arriba señaladas, conviene anotar una observación:

HIDROGRAFIA E HIDROLOGIA

ESCENA TM			EMBALSES	FECHAS IMÁGENES TM ADQUIRIDA
ORB.	FILE	CUAD.		
200	32	1	Palmos, Alcora, Entrepeñas, Buendía	21/7/88
200	32	2	Molina de Chinchón, La Testa, Laguna Grande de Masegosa	21/7/88
200	32	3	Bolarque, Zarza, Almaguera, La Bujeda, Estremera	
201	32	1	Pirilla, Riosquilla, Santillana, Miraflores de la Sierra, Palancar, Valmayor, Parquelagos, Las Nieves, Estanque Alto, Laguna de los Rodas	12/7/88
201	32	2	Pozo de las Romas, Beleña, El Vado, El Atazar, El Villar, Valdeobispo, Puentes Viejas, El Vellón	26/7/88
201	32	3	Guajanz, Castrejón, Pácoras, Cañares, Castrejón-El Carpio, El Carpio, Castrejón-Cañares, Castillas, Cazalegas	13/8/88
202	32	4	Pinaterra, El Castro	13/8/88
202	32	2	El Burguillo, Charca del Cura, San Juan, Ciudad Ducal, Robledo de Chavela	20/8/88
202	32	3	Aracampo, Torreón-Tajo, Torreón-Tiétar, Fresno, Serrejón, Plasencia, Malpartida de Plasencia, Malpartida de Plasencia II, Gargüera, Portaje	4/8/88
202	32	4	Rosario, Navalón, Valdecañas, Azután, Arroyo Pizarroso, Arroyo Recuerdo	
203	32	2	Gabriel y Galán, Ahigal, Guja de Granadilla, La Masida, Arrión, Baños	26/7/88
203	32	3	Borbalón, Arago, Valdeobispo, El Monón, Alcántara 2, Talaván, Alcántara I, Mata de Alcántara, Cueto, Molina, Barrosa, Cedillo (Zona de colar)	26/7/88
203	33	1	Cedillo (Zona de presa), La Solana	
203	33	2	Arca de Arriba, Arca de Abajo, Arroyo de Arriba, Charca de Brozas, Brozas II, Greña, Vegas Altas, Zamores, Hornos, Charca del Tajar, Arroyo Meribio, Salorno, Ribera de Mula, Peña I, Peña II, Cajueta, Molano, Arroyo de la Luz, Charca de Lancho, Barrieca de Abajo, Barrieca de Arriba, Charca de Frasco Díez, Guadalupe, Charca del Puchento, Los Arenales, Salor, Casa Zafra, Charca de la Generala, Tres Torres, Gallo, Ayuela, Alcuéscar, Charca del Cura, Arroyo de la Zahría	11/8/88

TABLA 3. Cobertura de las imágenes Landsat 5-TM sobre los embalses de la Cuenca del Tajo y fechas de toma de datos.

Más de la mitad de los embalses comprendidos en la categoría 1 (grupo «oligotróficos») tienen unas dimensiones muy pequeñas comparadas con el tamaño medio de los embalses de la cuenca. De los 29 embalses que figuran como oligotróficos, 17 tienen, en efecto, una superficie inferior a 16 ha. Eliminando del conjunto de los embalses de la cuenca todos aquellos cuya superficie es inferior a 16 ha, el porcentaje de embalses oligotróficos resulta ser del 17,4 %, sensiblemente inferior al 23,8 % antes apuntado.

Por encima de 200 ha de superficie, sólo ocho embalses han merecido el calificativo de oligotróficos: Beleña, Puentes Viejas, El Vellón, Valdeobispo, El Atazar, Gabriel y Galán, Entrepeñas y Buendía. Estos embalses se agrupan geográficamente en tres áreas bien determinadas: a) río Tajo, aguas arriba de la confluencia del Jarama, b) cabecera de la cuenca del Jarama-Henares, y c) cabecera del Alagón. La mayoría de los restantes embalses del grupo oligotrófico reciben generalmente los sobrenombres de «charca» o «laguna», en razón de sus pequeñas dimensiones. La distribución geográfica de estos pequeños embalses se extiende por diversas zonas de la cuenca del Tajo, ubicándose en las partes más altas, donde drenan áreas muy reducidas. Los embalses que, teniendo un tamaño igualmente pequeño, se hayan

situados dentro de tramos fluviales más bajos, presentan, en general, un estado eutrófico.

Con respecto a los embalses eutróficos de tamaño medio o grande, éstos se distribuyen en dos grandes zonas: a) tercio inferior del río Tajo, incluyendo las subcuencas del Arrago (afluente del Alagón) y Tajuja (afluente del Almonte) y la cuenca del Tiétar, b) embalses de las cuencas del Guadarrama, Manzanares y Guadalquivir, en particular los de Santillana, El Vellón y Valmayor. El resto de los embalses, eutróficos y mesotróficos, ocupan el tramo medio del Tajo, incluyendo la cuenca del Alberche.

Hay que señalar que algunos embalses que presentaban, hace algunos años, un aspecto deplorable debido a una fortísima contaminación de aguas residuales no tratadas, en la actualidad se encuentran en condiciones menos malas, aun cuando mantienen unas condiciones características de eutrofia. Entre estos embalses cabe citar Valmayor, Charco del Cura, Castrejón y Azután.

5. CONCLUSIONES

La experiencia desarrollada por el CEH en los últimos años, primeramente con motivo del último Proyecto Cooperativo CEDEX-USBR, y posteriormente con el es-

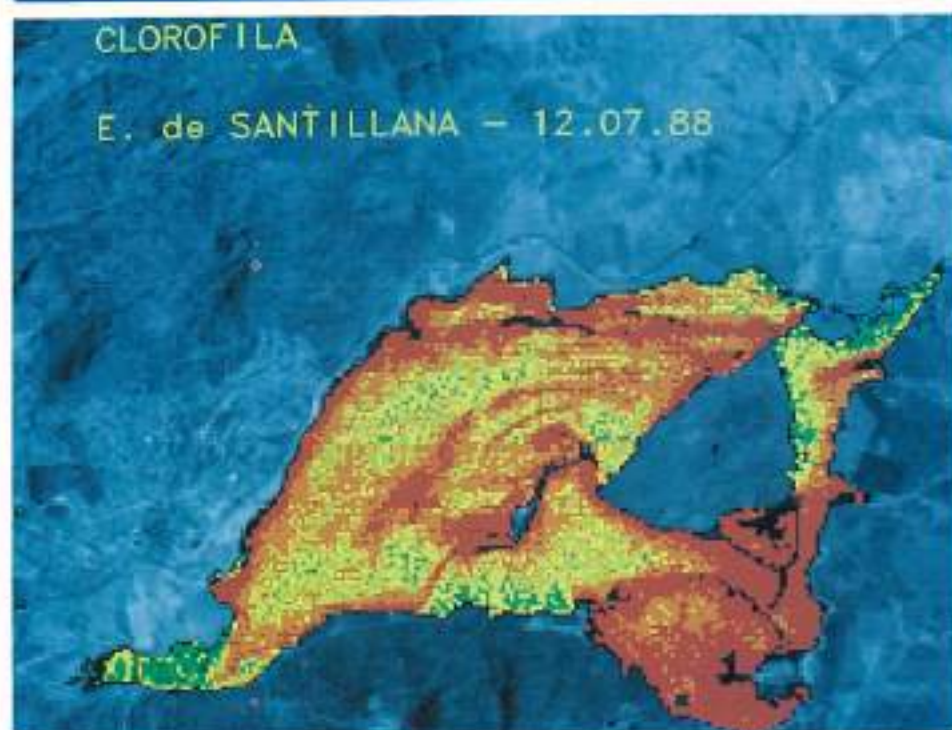


FIGURA 4. Mapa temático de clorofila del embalse de Santillana correspondiente al día 12 de julio de 1988.

12-07-88 (Valmayor)	$chl = 5,1200 \cdot tm4 - 24,521$ $1/sec = 0,3312 \cdot tm2 - 0,0018403 \cdot tm4 - 6,66208$
21-07-88 (Entrepeñas)	$chl = 0,6009 \cdot tm4 + 0,2181 \cdot tm3 - 5,1707$ $1/sec = 0,0302 \cdot tm2 + 0,1102 - 0,009244713 \cdot tm1$
26-07-88 (Gabriel y Galán)	$chl = 0,5299 \cdot tm2 - 9,0923$ $1/sec = 0,0462 \cdot tm4 - 0,1074$
28-07-88 (Balseña)	$chl = 0,0653347 \cdot tm4 + 4,215 - 0,06114817 \cdot tm1$ $1/sec = 0,03387 \cdot tm1 - 2,09949$
28-07-88 (El Atazar)	$chl = 0,219 \cdot tm2 + 0,839 - 0,06447896 \cdot tm1$ $1/sec = 0,03603 \cdot tm2 - 0,71941$
04-08-88 (Arrocampo) (*)	$chl = 2,1805 \cdot tm1 + 10,5699 \cdot tm2 - 7,149 \cdot tm3 - 232,2083$ $1/sec = 0,159 \cdot tm2 - 3,1055$
13-08-88 (Guañaraz)	$chl = 4,6005 \cdot tm4 - 48,1184$ $1/sec = 0,1334 \cdot tm3 - 2,3553$
20-08-88 (San Juan)	$chl = 1,6444 \cdot tm4 - 9,4456$

(*) Ecuaciones tomadas como referencia para la normalización de subsecciones sin ecuaciones específicas contrastadas.

tudio realizado para la Confederación Hidrográfica del Tago, confirma la utilidad de las imágenes multispectrales Landsat-TM para obtener una cartografía temática de la superficie de los embalses, referida a variables limnológicas tales como la concentración de clorofila o la transparencia del agua.

Esta utilidad de las imágenes Landsat-TM es particularmente manifiesta cuando la cartografía temática se extiende al reconocimiento limnológico de embalses a nivel de cuenca hidrográfica. Con la información suministrada por el sensor «Thematic Mapper» y con un mínimo apoyo de datos de campo ha sido posible, en efecto, obtener una panorámica general de las condiciones de eutrofia manifestadas por todos los embalses de la cuenca del Tago en determinadas fechas del verano de 1988. Asimismo, mediante un proceso de «normalización» estadística de imágenes de órbitas contiguas ha sido posible extrapolar a distintas fechas de paso del satélite la aplicación de la ecuación de regresión obtenida para un cierto parámetro limnológico en una fecha dada.

BIBLIOGRAFIA

- ALMANZA, E., y J. M. MELACK (1985). Chlorophyll differences in Mono Lake (California) observable on Landsat imagery. *Hydrobiologia*. 122:18-17.
BLACKWELL, R. J., y D.H. BOLAND, (1979). Trophic classi-

TABLA 4. Ecuaciones de relación entre las bandas espectrales TM y los parámetros limnológicos.

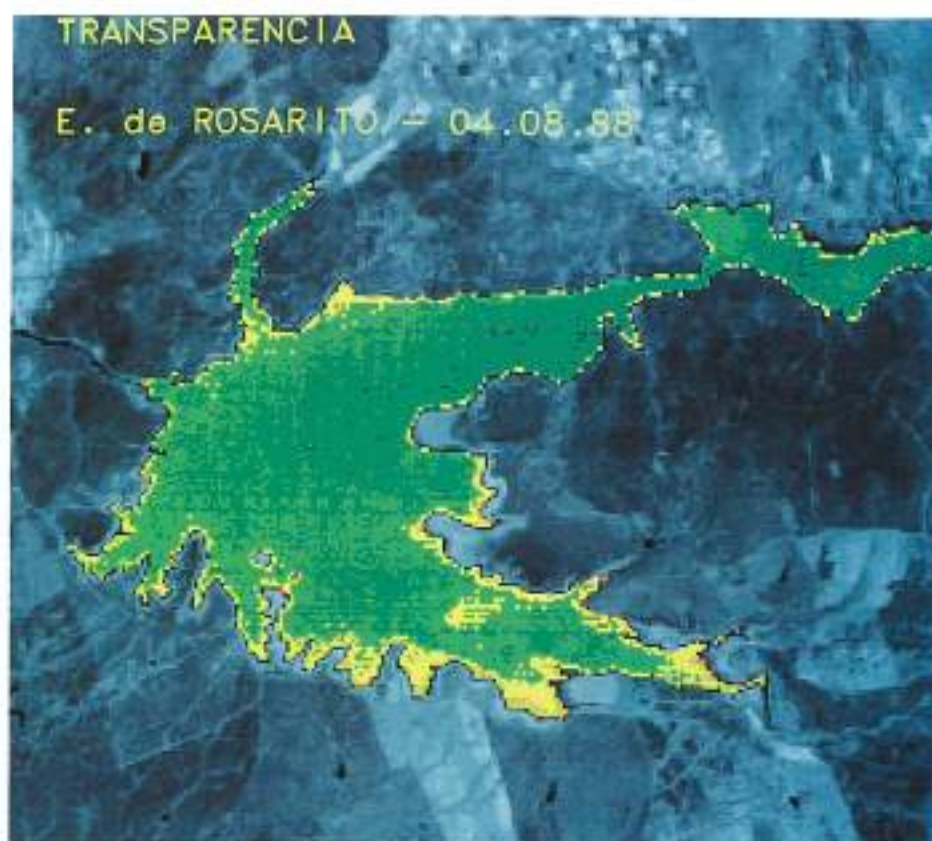
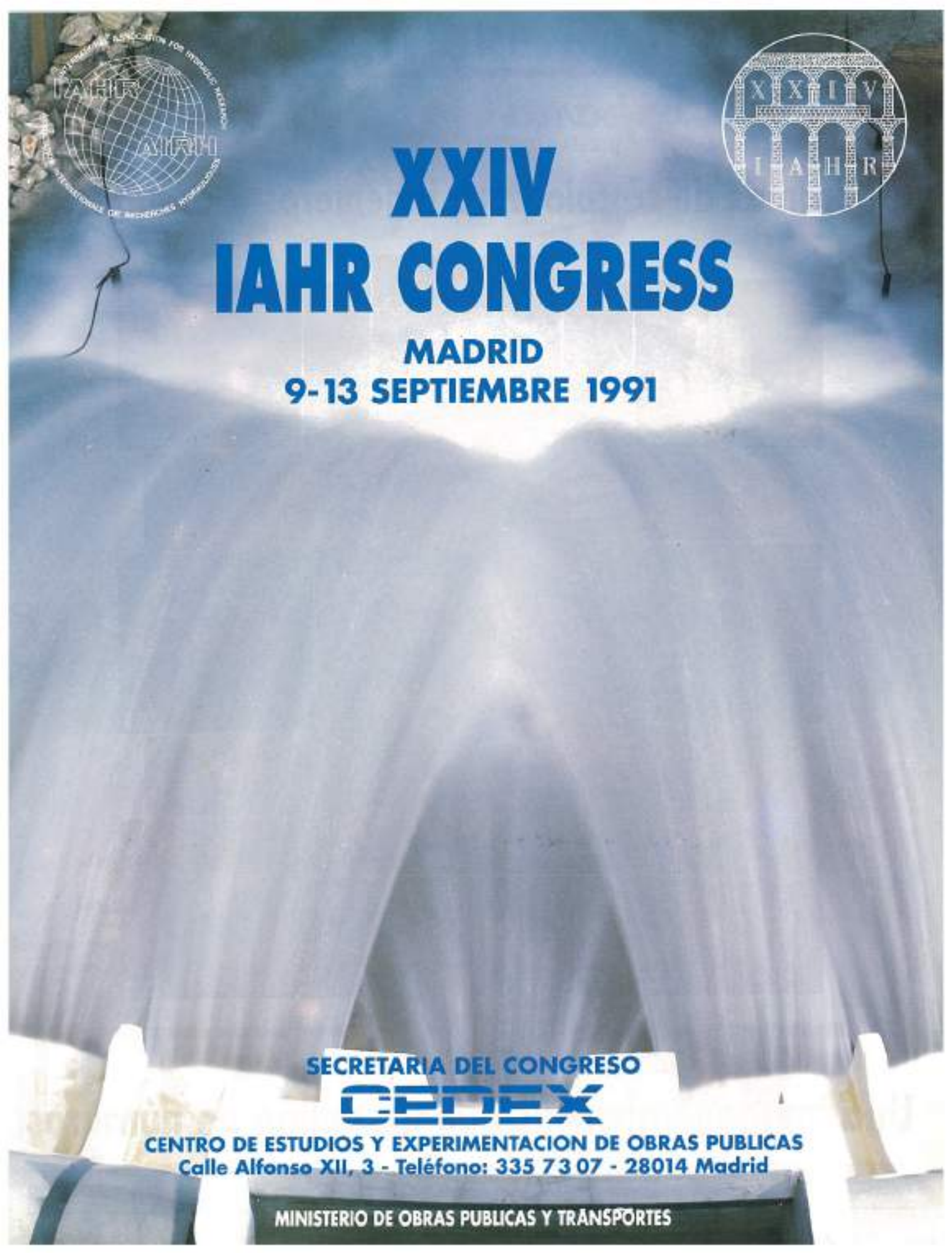


FIGURA 5. Mapa temático de transparencia de Secchi del embalse de Rosarito correspondiente al día 4 de agosto de 1988.



FIGURA 6. Diagrama circular de embalses, mostrando el porcentaje correspondiente a cada categoría de eutrofia asignada en los mapas temáticos. Sector rayado claro: oligotróficos. Sector rayado oscuro: eutróficos. Sector blanco: mesotróficos.

- ification of selected Colorado Lakes. *Jet Prop. Lab. Publ.* 78-100. EPA 600/4-79.005. US EPA, Wash. DC.
- ECKHARDT, D. (1988). A method of Landsat 5-TM imagery normalization for reservoir multistate studies. US Bureau of Reclamation. Comunicación personal.
- HARRIS, R. (1987). *Satellite Remote Sensing: An introduction*. Routledge & Reagan Paul, Londres, 219 p.
- LILLESAND, T. M. (1979). *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, 612 p.
- ORTIZ, J. L., y R. PEÑA (1987). Aplicaciones limnológicas de los satélites Landsat. *Ingeniería Civil*, CEDEX, 83:51-54.
- ORTIZ, J. L., y R. PEÑA (1989). Remote Sensing of Limnological Parameters in Reservoirs. Proc. Workshop. *Earthnet Pilot Project on Landsat Thematic Mapper Applications*, Frascati, Italia, dic. 1987, ESA SP-1182:49-5.
- PEÑA R., y J. L. ORTIZ (1990). *Reconocimiento limnológico de los embalses de la cuenca del Tajo por teledetección*. CEDEX, 307 p.
- SCARPACE, P. L.; K. W. HOLMQUIST, y L. I. FISHER (1979). Landsat analysis of lake quality. *Photogram. Eng. Remote Sens.* 45(6):623-633.
- VERDIN, J. P. (1984). Limnological applications of multispectral remote sensing. *USBR Report No. REC-ERC-85-2*, 51 p.
- VERDIN, J. P. (1985). Mapping surface water quality patterns of Lake Havasu with Thematic Mapper imagery. *Appl. Sci. Res. Memo No AP 85-4-2* US Bureau of Reclamation.



XXIV IAHR CONGRESS

**MADRID
9-13 SEPTIEMBRE 1991**

SECRETARIA DEL CONGRESO

CEDEX

**CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACION DE OBRAS PUBLICAS
Calle Alfonso XII, 3 - Teléfono: 335 73 07 - 28014 Madrid**

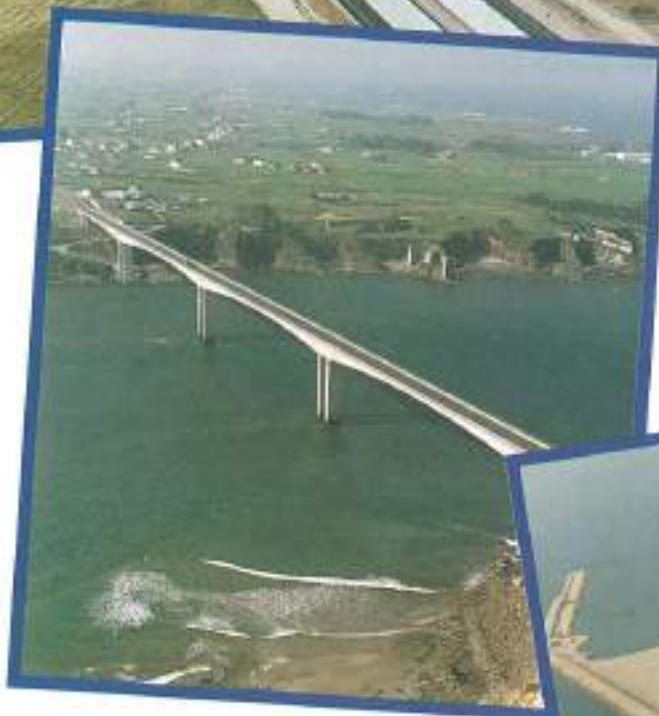
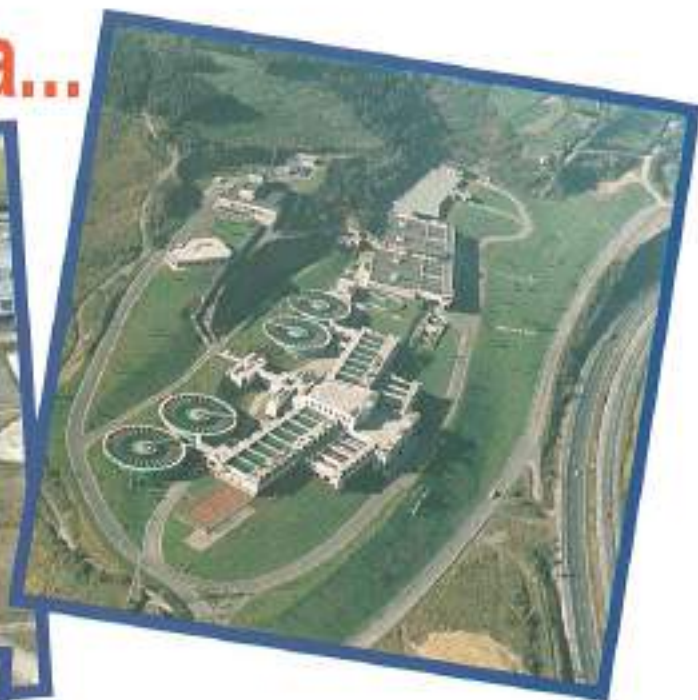
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS Y TRANSPORTES



CUBIERTAS

Y MZOV, S.A. CIA. GRAL. DE CONSTRUCCIONES

Cualquier tipo de obra...



**En cualquier lugar
del mundo.**

