

CARTOGRAFÍA DE LAS INUNDACIONES DEL RÍO EBRO EN FEBRERO DE 2003: TRABAJOS DE FOTOINTERPRETACIÓN, TELEDETECCIÓN Y ANÁLISIS SIG EN EL GIS-EBRO

J. A. Losada García¹, S. Montesinos Aranda², M. Omedas Margeli¹, M.A. García Vera¹ y R. Galván Plaza¹

(1) Oficina de Planificación Hidrológica, Confederación Hidrográfica del Ebro, Pº de Sagasta 24-28, 50071 Zaragoza

(2) GEOSYS, S.L.; Sector Foresta 23, locales 7 y 8, 28760 Tres Cantos - Madrid

RESUMEN

Durante los primeros días de febrero de 2003 se produjo una importante avenida en el Eje del Ebro como consecuencia de las abundantes escorrentías ocasionadas por la acción combinada de una intensa lluvia y la subsiguiente y rápida fusión de la nieve acumulada en cabecera durante los temporales de finales de enero; se alcanzaron caudales punta de 3.320 m³/s la madrugada del 6 de febrero en Castejón (Navarra) y de 2.988 m³/s la madrugada del día 9 en la ciudad de Zaragoza.

La Confederación Hidrográfica del Ebro (C.H.E.) realizó un intenso seguimiento del episodio de avenida, cuya evolución espacio-temporal pudo estudiarse gracias al concurso de diversas técnicas de medición/observación terrestre (Sistema Automático de Información Hidrológica, SAIH; observación directa en campo) y aérea; el análisis combinado de la fotointerpretación realizada en vuelo en días sucesivos a lo largo del episodio de avenida y de imágenes de satélite Landsat 7 y SPOT 2 y 5 correspondientes a diferentes momentos de las inundaciones, posibilitaron, una vez transcurrido el máximo de la crecida, la estimación de la superficie anegada, así como la generación de una importante base de datos georreferenciada específicamente aplicada al conocimiento y gestión de la evolución de la avenida, que ha sido integrada en el repositorio de datos del GIS-Ebro, el Sistema de Información Geográfica de la Confederación Hidrográfica del Ebro.

En esta comunicación, que contiene un amplio resumen de los trabajos cartográficos generados, se presenta un análisis de estimación comparativa de superficies anegadas a través de fotointerpretación en vuelo y de imágenes teledetectadas; además, para estas últimas, se realiza una valoración de superficies inundadas en función de dos diferentes aproximaciones metodológicas que proporcionan las técnicas de tratamiento digital: consideración de superficies cubiertas por lámina de agua, de un lado, y cuantificación de áreas con alto contenido en humedad, por otro.

Palabras Clave: Inundaciones, Teledetección, Cartografía, GIS-Ebro, Fotointerpretación.

ABSTRACT

During the first days of February 2003 there were an important flood in the Ebro River, because of the high run-offs during the first days of February due to the combination of heavy rains and the quick snow melting in its tributaries upstream catchments. Maximum peak flows of 3.320 m³/s in the early morning of the 6th of February in Castejón (Navarra) and 2.988 m³/s in the early morning of the ninth in Zaragoza, were registered.

The Ebro River Basin Authority carried out an intensive follow-up of this event. The spatial and time evolution of this event could be studied thank to the combined use of various monitoring techniques on the ground (data provided by the Automatic Hydrologic Information System, observation on the ground) and from the air. After the event, it was carried out a combined analysis, taking into account both the photographs available from a flight

during the flood event and the satellite images taken by Landsat 7 and SPOT 2 and 5. It made possible to estimate the flooding area, and to generate an important georeferenced database useful for the knowledge and management of the flood evolution, added to the GIS-Ebro, the Geographical Information System of the River Ebro Basin Authority.

This paper, besides containing a summary of the diverse cartography produced, shows an analysis of the compared estimation of the flood area both through flight photographs and satellite images. Moreover, for the latter, it was carried out a double methodological approach to determine the flood area: on one hand, the surface covered by the water sheet, on the other, the surface with high contents of humidity.

Key Words: *Floods, Remote sensing, Cartography, GIS-Ebro, Aerial photography.*

INTRODUCCIÓN

Los episodios de crecida del río Ebro constituyen uno de los fenómenos de mayor interés (ambiental, territorial y socioeconómico) a la hora de caracterizar el régimen hidrológico del gran río ibérico y plantear estrategias de ordenación y gestión del paisaje fluvial. Cifrándonos, únicamente, al ámbito del Ebro Medio y por sólo citar las avenidas extraordinarias que episódicamente han venido jalonando el discurrir del pasado siglo XX y principios del presente, habría que referirse a la de marzo de 1930, a la muy considerable de 1961 (4.950 m³/s de caudal punta en Castejón, 4.130 m³/s en Zaragoza –formación del Galacho de Juslibol e inundación de buena parte de la margen izquierda de la ciudad, actualmente urbanizada: barrio del Actur- y 4.160 m³/s en Sástago), a la de noviembre de 1966, febrero de 1978, diciembre de 1980, enero de 1981 y, finalmente, febrero de 2003 (caudales punta de 3.320 m³/s en Castejón y de 2.988 m³/s en Zaragoza), que constituye el objeto de estudio de la presente comunicación (Figura 1).

Los destacables caudales de avenida que a principios de febrero de 2003 circularon por el Ebro y principales afluentes en cabecera fueron producto de la acción combinada de unas cuantiosas precipitaciones (en forma de nieve, en amplios sectores montañosos de la cabecera del Ebro) y una subsiguiente y rápida fusión –provocada por la entrada de vientos cálidos y húmedos de componente SO- de la cubierta nival, que incrementó notablemente el caudal de numerosos afluentes en la cuenca semialta del Ebro, especialmente por su margen izquierda (Zadorra, Ega, Arga y la práctica totalidad de la cuenca del Aragón).

Todos los dispositivos de previsión y alerta funcionaron conforme a lo previsto, minimizándose el riesgo de pérdidas en vidas humanas y daños materiales, y el Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Confederación Hidrográfica del Ebro (C.H.E.) gestionó el episodio de avenida y proporcionó, en todo momento, información de la evolución del mismo en tiempo real, que pudo consultarse públicamente a través de la página Web del Organismo de cuenca (www.chebro.es).

Complementariamente a la recepción y procesamiento desde el SAIH de un gran volumen de información relativa a los caudales y tiempos de avenida, la Oficina de Planificación Hidrológica de la C.H.E. estimó como muy oportuna la posibilidad de disponer, además, de una visión cartográfica del territorio afectado por la inundación en el tramo medio del Ebro, entre Haro (La Rioja) y la cola del Embalse de Mequinenza (Zaragoza). En este sentido, conviene señalar la importancia que una buena cartografía de inundaciones -especialmente si ésta es reflejo de una base de datos georreferenciada de carácter diacrónico, que almacene cartografías de inundación pertenecientes a distintas fechas- puede tener como base fundamental para la elaboración de una cada vez más necesaria cartografía de riesgos por inundación, tal y como se prevé en la Directriz

Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones, que sea, además, fiel y sintética expresión de una mucho más compleja matriz de variables ambientales, territoriales y socioeconómicas y que coadyuve, por tanto, a una adecuada gestión para la ordenación y planificación territorial y ambiental de los espacios ribereños. De la importancia que estos mapas de riesgo de inundación pueden presentar en la gestión de los espacios fluviales, baste señalar su consideración y definición en el marco del –actualmente en fase de licitación- *Plan Medioambiental del Ebro*, promovido desde el Gobierno de Aragón, o su objeto detallado de estudio -y por referirnos tan sólo a algunas relevantes referencias actuales circunscritas al ámbito territorial que nos ocupa- en tesis doctorales de carácter aplicado (desde una perspectiva *ecogeográfica* en Ollero, 1996; con un enfoque *hidrogeomorfológico* en Bescós, 2003) y en artículos y reuniones técnicas en que se han analizado y debatido, con un sentido muy multidisciplinar e integrador, las inundaciones de febrero de 2003 (Ollero, Pellicer y Sánchez, 2003; Ollero, 2003). Finalmente, es importante señalar que una buena cartografía de las inundaciones de 2003 resulta ser también un elemento muy valioso para la calibración de los modelos hidrológicos, que permiten la definición de las zonas inundables y su clasificación según la ya referida Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones.

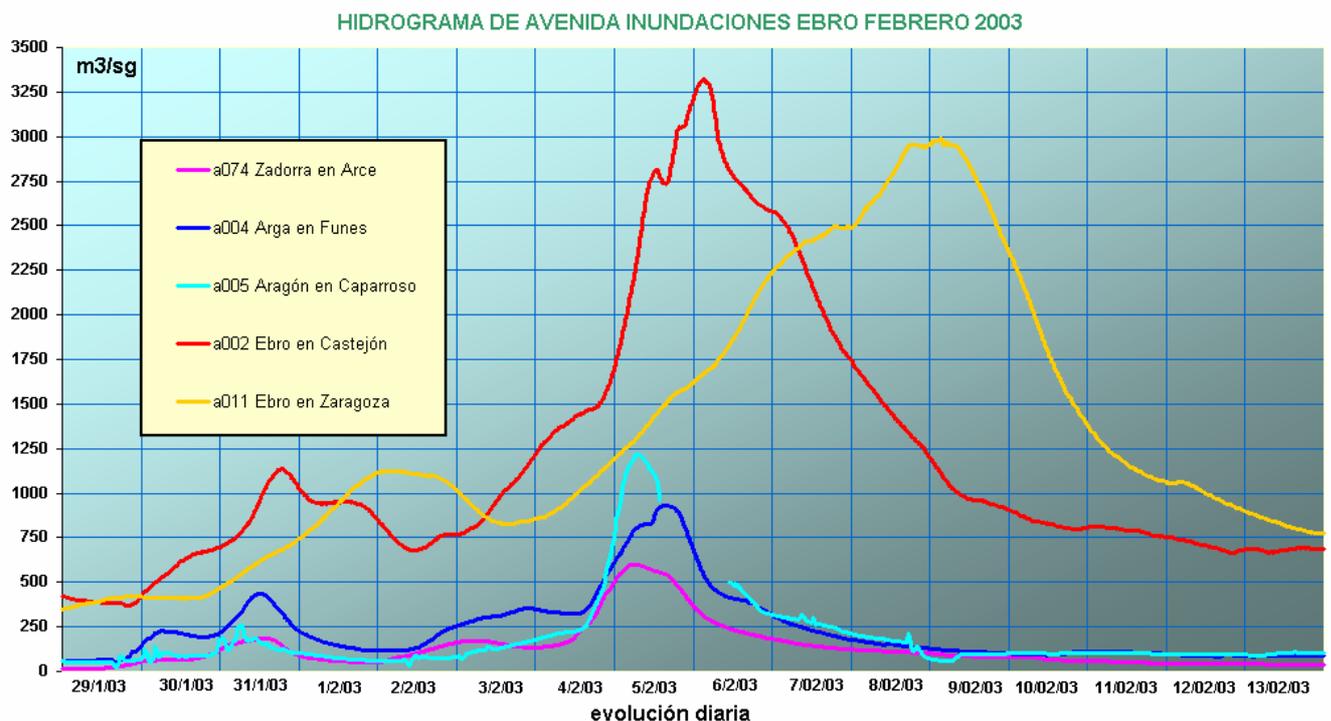


Figura 1. Hidrograma de avenida inundaciones Ebro en febrero de 2003. Caudales quinceminutales registrados por el Servicio Automático de Información Hidrológica (SAIH)

Para la obtención de esta cartografía de las inundaciones del río Ebro, que quedaría inmediatamente integrada en el repositorio de información georreferenciada del Sistema de Información Geográfica GIS-Ebro (*Arqued y Losada, 1999*), se planteó la utilización de dos diferentes aproximaciones metodológicas y tecnológicas:

-Fotointerpretación visual directa, sobre el territorio, a partir de composiciones en papel con las ortofotos del “SIG Oleícola Español” (M.A.P.A., 1997), a bordo de distintos vuelos tripulados efectuados en sucesivas jornadas del episodio de avenida sobrevolando amplios sectores de la llanura de inundación del Ebro medio. Se trata de una variante (fotointerpretación “en vuelo”) del método más tradicional de seguimiento de la evolución de una avenida.

-Aplicación de técnicas de teledetección espacial para la obtención de una cartografía de la superficie anegada; se adquirieron y analizaron al efecto distintas imágenes de satélite Landsat ETM 7 y Spot 2 y 5 correspondientes a diferentes fechas durante y después del máximo de crecida. Es una técnica en rápido proceso de aplicación y desarrollo, aunque aún en fase experimental, en el estudio de inundaciones, que presenta una interesante alternativa –cobertura global del fenómeno, visión diacrónica, etc. - al empleo de técnicas más tradicionales.

CARTOGRAFÍA DE LAS INUNDACIONES: FOTOINTERPRETACIÓN VISUAL DIRECTA

A lo largo del episodio de avenida se contrataron varios vuelos tripulados con la empresa de aviación *Mac Aviation*, de Zaragoza; estos vuelos, realizados los días 10, 11 y 14 de febrero de 2003, en jornada de mañana y a bordo de una avioneta tipo *Cessna*, tuvieron una duración conjunta de permanencia en el aire de 5 horas. El punto de partida fue, en todos los casos, el aeropuerto de Zaragoza, desde el que se concretaban los itinerarios más convenientes a seguir en cada caso, así como los tiempos y circunstancias de vuelo.

En los sucesivos itinerarios se sobrevoló un amplio sector territorial del Ebro medio que, siguiendo el eje del río, abarca desde Haro (La Rioja), aguas abajo de la confluencia del Zadorra con el Ebro, hasta las proximidades de Velilla de Ebro (Zaragoza), aguas abajo, punto en el que la onda de la avenida apenas dejó sentir ya sus efectos (proximidad del Embalse de Mequinenza, que laminó parte de los caudales de avenida).

En todos los casos, el sistema de obtención de una primera cartografía de las inundaciones por este método fue sumamente sencillo. Se prepararon, al efecto, unos manuscritos en soporte papel y formato manejable que consistían en composiciones temáticas con la representación de las ortofotos del “SIG Oleícola Español” (M.A.P.A., 1997) y la toponimia de los núcleos de población; se procuró, en todo caso, que la escala de estas cartografías de vuelo se ajustase lo más posible al tamaño real del mosaico paisajístico que presumiblemente se observaría desde el aire, a bordo de la avioneta.

Sobre esta base cartográfica, a mano alzada y en vuelo, se ensayó la delimitación del área máxima cubierta por las inundaciones, estimando, para ello, no sólo las superficies anegadas en el día/hora preciso del vuelo, sino también aquellas otras parcelas sobre las que se percibían signos evidentes de inundación (existencia de embolsamientos de agua, barro, presencia de humedad...) y que habían sido cubiertas por el agua en las jornadas previas en las que no se pudo volar.

La fotointerpretación de los territorios anegados que se sobrevolaban se realizaba, simultáneamente, por dos intérpretes, cada uno de los cuales fijaba su atención en una de las márgenes del río; un tercer tripulante realizaba fotografías a lo largo de todo el itinerario. Posteriormente, ya en gabinete, se procedía a terminar de perfilar las líneas de inundación observadas en vuelo, valiéndose, para ello, del apoyo suministrado por las fotografías en perspectiva adquiridas en cada uno de los vuelos.

Finalmente, se obtuvo una síntesis cartográfica del área afectada por las inundaciones –en soporte papel-, que constituyó el documento fuente para proceder a la digitalización de la información obtenida en vuelo, que se realizó sobre pantalla, en ArcGIS 8.1 (ESRI), sobre el mosaico de ortofotos del “SIG Oleícola Español” –ahora en formato digital- almacenadas en el Servidor de datos del GIS-Ebro (Figura 2).

Se obtuvo, de este modo, una cobertura georreferenciada con la delimitación general del territorio anegado por las inundaciones. En algunos tramos de especial interés (Comunidad Autónoma de Aragón) se procedió a digitalizar, también sobre las ortofotos del “SIG Oleícola Español”, el cauce actual del río Ebro, de modo que sirviese a modo de máscara con la que poder sustraer la superficie no afectada directamente por la avenida y pudiese estimarse, de manera más precisa, la superficie agraria directamente afectada por inundación.



Figura 2. Ejemplo de los trabajos de fotointerpretación de la avenida del Ebro, sobre las ortoimágenes del “SIG Oleícola Español” en las proximidades de Gallur (Zaragoza). Escala 1:15.000)

ESTIMACIÓN DE SUPERFICIES INUNDADAS MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN.

Complementariamente a la obtención de una cartografía de las inundaciones del Ebro mediante técnicas de fotointerpretación, se consideró de gran interés ensayar una delimitación de las superficies anegadas a través del análisis digital de un conjunto representativo –espacial y temporalmente- de imágenes de satélite. Estos trabajos, dirigidos desde la Oficina de Planificación Hidrológica de la C.H.E., fueron realizados por la empresa Geosys, S.L., que cuenta con una dilatada experiencia en el campo de las Tecnologías de Información Geográfica.

Tras un minucioso estudio de disponibilidad (búsqueda de fechas próximas al periodo de máxima inundación, escasa cubierta de nubes...) se seleccionaron un total de cuatro imágenes procedentes de las plataformas Landsat y SPOT (Figura 3), que cubren la totalidad del ámbito de estudio. Se valoraron, para ello, los siguientes criterios:

- Alta resolución espectral. La existencia de varias bandas espectrales en el rango infrarrojo del espectro electromagnético facilita la discriminación de las superficies cubiertas por lámina de agua.
- Alta frecuencia en las observaciones (resolución temporal). Los satélites de ambas misiones toman periódicamente imágenes de una misma zona de la superficie terrestre.
- Continuidad en el registro de datos. Los programas Landsat y SPOT mantienen operativa una recogida continua de datos terrestres.
- Operatividad en el tratamiento de las imágenes (proceso de imágenes ópticas más sencillo, robusto y fiable que las procedentes de sensores radar).

FECHA	SATÉLITE	SENSOR	ESCENA (Path-Row)
6 de febrero de 2003	Landsat 7	Enhanced Thematic Mapper (ETM+)	199-31
13 de febrero de 2003	Landsat 7	Enhanced Thematic Mapper (ETM+)	200-31
8 de febrero de 2003	SPOT 2	High Resolution Visible (HRV)	039-266
10 de febrero de 2003	SPOT 5	High Resolution Geometric (HRG)	040-267

Figura 3. Imágenes de satélite adquiridas en el estudio (Landsat 7 y SPOT 2 y 5)

Todas las imágenes fueron sometidas a un proceso de control de calidad, para inmediatamente después proceder a su corrección geométrica.

En el análisis espectral para la identificación de las zonas inundadas se han empleado, fundamentalmente, las bandas que recogen información del territorio en las siguientes regiones del espectro electromagnético (*Chuvioco*, 2002):

-**Rojo visible** (banda 3 Landsat ETM+, banda 2 SPOT 2 y SPOT 5). Las superficies acuáticas absorben o transmiten la mayor parte de la radiación óptica que reciben. La mayor reflectividad del agua clara se produce en la banda azul, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo cercano y medio, donde ya es prácticamente nula (es por ello que la frontera tierra-agua es muy nítida en esta región del espectro).

-Infrarrojo reflejado próximo (banda 4 Landsat ETM+, banda 3 SPOT 2 y SPOT 5). El agua absorbe en esta región la práctica totalidad de la radiación que recibe; esta banda puede ser empleada para discriminar zonas con diferente profundidad de agua y diferenciarlas del suelo húmedo. Los sólidos en suspensión presentan una disminución de su reflectividad en este intervalo.

-Infrarrojo reflejado onda corta (banda 5 Landsat ETM+ y banda 4 de SPOT 5). Es una región muy sensible al contenido de agua del terreno: El agua encharcada o embalsada con una profundidad suficiente absorbe toda la radiación del infrarrojo reflejado que le llega, por lo que estas superficies toman valores radiométricos muy cercanos a 0; es por ello que se discriminan muy bien fondos húmedos del entorno seco que los rodea.

-Infrarrojo reflejado medio (banda 7 de Landsat ETM+). Las características espectrales de esta banda para la discriminación de zonas húmedas resultan similares a las de la banda 5, aunque la reflexión en zonas de lámina de agua es algo mayor.

El comportamiento general (signatura espectral) de las cubiertas de agua en las diferentes regiones del espectro queda reflejado en la Figura 4.

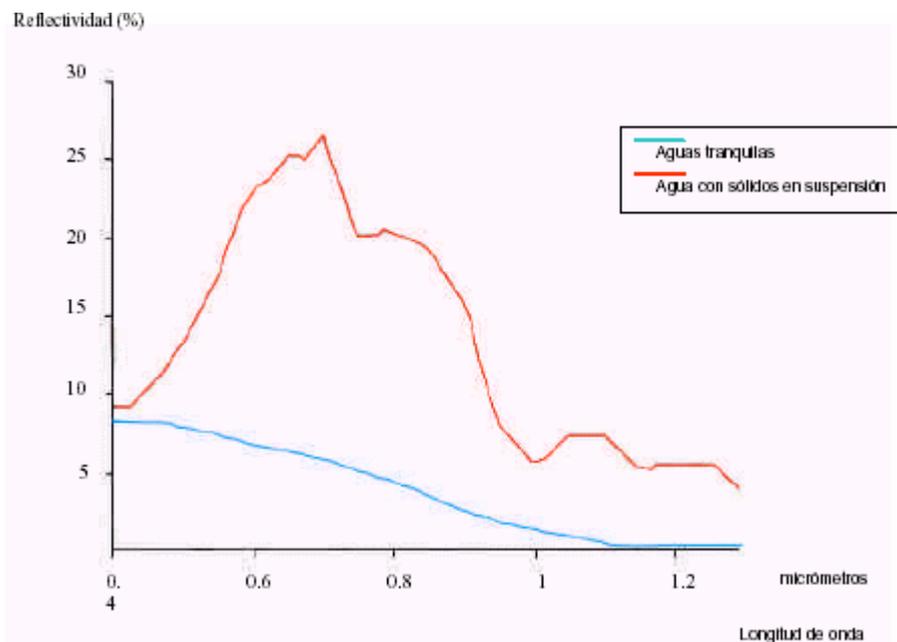


Figura 4. Signaturas espectrales de distintas tipologías de masas de agua

Para la estimación de la superficie total anegada por la crecida a través de técnicas de teledetección, se han seguido dos diferentes aproximaciones metodológicas que se complementan entre sí:

- Determinación de superficies cubiertas por lámina de agua
- Estimación de zonas que han podido estar cubiertas por aguas de avenida y que presentan, por consiguiente, mayor grado de humedad que el territorio circundante.

Se han empleado, para ello, dos técnicas complementarias de tratamiento digital de imágenes: **análisis visual** (composiciones en falso color –mejoradas tras la aplicación de técnicas de realce geométrico y radiométrico y transformación HSI- para cada una de las imágenes adquiridas, lo que posibilita su fotointerpretación y análisis visual de los diferentes elementos y tipos de cubiertas presentes) y **análisis digital** (desarrollo de diferentes aproximaciones metodológicas para la discriminación espectral de las superficies ocupadas –o que lo han sido recientemente– por agua).

Aplicación de índices para la detección de zonas inundadas

Para la detección de superficies cubiertas por agua se ha ensayado la aplicación específica de diferentes índices en función de cada una de las imágenes/día analizados.

En el caso concreto de la imagen correspondiente al **día 6/2/03** (Landsat 7 ETM+), se han utilizado dos índices distintos, ya que existe una gran variación en la respuesta espectral del agua según su grado de turbulencia y concentración de materia en suspensión:

1. Índice para la identificación de aguas turbulentas:

$$\left[\frac{\text{Banda 3} - \text{Banda 4}}{\text{Banda 3} + \text{Banda 4}} * 100 \right] + \left[\frac{100}{\text{Banda 5} + \text{Banda 7}} \right]$$

2. Índice para la identificación de aguas en calma:

$$\left[\frac{\text{Banda 4}}{\text{Banda 3}} - \frac{\text{Banda 4}}{\text{Banda 5}} \right]$$

El primer índice discrimina la presencia de aguas cargadas de sólidos disueltos y en suspensión, en tanto que el segundo se basa en la respuesta espectral del agua conforme aumentan los valores de longitud de onda; en ambos casos, y después de discriminar las áreas ocupadas por agua, se ha procedido a unir las dos clasificaciones temáticas resultantes en un único documento de imagen-mapa. En este mapa resultante, además de zonas inundadas aparecen representados píxeles pertenecientes a otros tipos de cubiertas con similar valor de respuesta espectral: nubes y sombras orográficas; las primeras han podido ser eliminadas gracias al análisis de la banda 6, en tanto que las superficies en sombra han podido descartarse a partir de su respuesta espectral en la banda 3, de valores inferiores a los del agua.

Para la detección de superficies inundadas en la imagen del **día 13/02/03** (Landsat 7 ETM+) se ha aplicado el índice de aguas turbulentas; en un proceso análogo al de la imagen anterior, han sido eliminadas las cubiertas de sombras pertenecientes a la presencia de nubes y al efecto del relieve.

En el caso de la imagen correspondiente al **día 8/2/03** (SPOT 2), se ha aplicado un índice análogo al primer término del índice de aguas turbulentas ensayado sobre las imágenes Landsat:

$$\frac{\text{Banda 2} - \text{Banda 3}}{\text{Banda 2} + \text{Banda 3}}$$

Para eliminar el sombreado orográfico se empleó la banda 1, en la que el agua presenta valores más altos; más difícil resultó eliminar otras cubiertas que se confunden con el valor del agua (áreas urbanas e industriales y sombras de nubes); se identificaron sobre la composición temática obtenida y se eliminaron manualmente –interpretación visual- estas zonas de confusión.



Figura 5. Mapa de superficie inundada sobre composición en falso color (SPOT 5, 10/2/03)

Finalmente, en la detección del territorio anegado en la imagen correspondiente al **día 10/2/03** (Figura 5), se optó por la aplicación del siguiente índice:

$$\frac{\text{Banda 3} - \text{Banda 4}}{\text{Banda 3} + \text{Banda 4}}$$

Al igual que en el caso anterior, se hizo necesaria la eliminación de sombras provocadas por el relieve, para lo que se utilizó la banda 2 del satélite.

Aplicación de índices para la detección de zonas inundadas

Como comentábamos anteriormente, además de la discriminación de superficies cubiertas por el agua, el análisis de la información contenida en las imágenes de satélite posibilita también el cartografiado de áreas con un alto contenido en humedad: La elevada absorción de la radiación infrarroja por parte de superficies con alto contenido en agua, permite apreciar las variaciones de

humedad del territorio, y estimar, una vez que el pico de crecida ha transitado por esa zona, cuáles son las áreas que han podido estar cubiertas por el agua.

La imagen Landsat 7 ETM+ del día 13/02/03, que cubre el ámbito de estudio entre Lodosa (Navarra) y Zaragoza, resulta especialmente apropiada para ensayar esta técnica, ya que los caudales máximos de avenida se produjeron en este tramo del Ebro entre los días 5 y 9 de febrero.

Con este propósito, se ha elaborado una composición en falso color (RGB) con las bandas 4, 5 y 7; sobre ella se ha digitalizado el contorno de áreas con un alto contenido en humedad (contraste de la imagen, técnicas de asociación espacial). Evidentemente, la aplicación de este método está subordinada a la percepción subjetiva de un intérprete, y a la clara existencia de un contraste entre las zonas que han sido encharcadas y aquellas otras que no han sido afectadas por la crecida; este contraste es muy dependiente de la fecha de adquisición de la imagen.



Figura 6. Discriminación visual entre áreas con alto contenido en humedad (en tonos oscuros) y otras posiblemente no afectadas por la crecida

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se ha ensayado una delimitación de la superficie de inundación (y la creación de una primera cartografía temática de las inundaciones del Ebro en febrero de 2003) siguiendo dos diferentes metodologías: fotointerpretación desde vuelo tripulado, de un lado, y tratamiento digital de imágenes de satélite, por otro; en ambos casos, la imposibilidad de detectar, a tiempo real, la *imagen* exacta con la situación de máxima crecida en cada tramo fluvial, impide que la cartografía obtenida incluya con rigurosa exactitud el total de la superficie inundada; no obstante, consideramos que esta cartografía generada sí recoge fielmente la distribución y evolución general de la creci-

da en superficie en tiempos relativamente cercanos a los de su máxima extensión, proporcionando información global y bastante fiable acerca de las superficies y tipos de cubierta del suelo afectadas, con posibilidad de ofrecer datos de estadísticas de superficies afectadas a escala de término municipal.

En cuanto a la estimación de superficies inundadas durante la crecida y refiriéndonos, en primer lugar, al análisis de las imágenes de satélite, hay que señalar que la superficie diacrónica (días 6, 8, 10 y 13 de febrero) resultante de la unión de las superficies ocupadas por el agua en las cuatro escenas consideradas, se estima en 15.226,79 hectáreas; por su parte, la superficie planimetrada sobre la fotointerpretación realizada en vuelo los días 10, 11 y 14 de febrero asciende a 28.106,22 Ha (se incluye, en ambos casos, el cauce actual del Ebro).

Esta evidente diferencia se debe, fundamentalmente, a la asincronía entre las fechas de las imágenes utilizadas (en especial, la de fecha de 13 de febrero) y los momentos de máximo caudal del Ebro en diferentes zonas; sin embargo, se produce una mejor y evidente coincidencia de las superficies calculadas por ambos métodos cuando la fecha de adquisición de las imágenes de satélite se aproxima a la de la máxima crecida en ese tramo, como es el caso de la imagen SPOT del día 10: la superficie inundada discriminada a partir del análisis digital de la imagen de satélite es de 4.581 Ha, bastante similar a la estimada por fotointerpretación para esta misma zona, 5.498 Ha.

Debido a ese desajuste temporal, y con objeto de reducir el sesgo de una posible estimación a la baja en el cómputo de la superficie anegada discriminable desde las imágenes de satélite, se desarrolló una metodología, complementaria a la aplicación de índices de detección de agua, consistente en la discriminación de áreas con alto contenido en humedad días después (una semana, aproximadamente) del paso de máximo caudal; este método pudo aplicarse al análisis del ámbito cubierto por la imagen Landsat del día 13 de febrero. En este caso, la estimación de superficies resulta bastante coincidente: en el territorio común a ambas coberturas (superficies fotointerpretadas en vuelo y ámbito cubierto por la imagen de satélite) la superficie estimada que quedó anegada es de 22.606 Ha según las imágenes de satélite, y de 19.849 Ha según la planimetría realizada sobre la fotografía aérea (para estas superficies, se considera que 18.279 Ha. son de cobertura coincidente). En el cuadro 1 se ofrece una síntesis general de estimación de superficies.

Finalmente, consideramos que la utilización combinada de ambas tecnologías y de sus métodos de trabajo asociados han revelado –con sus posibilidades y sus limitaciones– un gran interés para la estimación de la superficie afectada por una inundación; esta cartografía de zonas inundadas (de carácter diacrónico y multitemporal) debiera ser una pieza fundamental a la hora de sentar las bases de una gestión y ordenación de los paisajes y territorios ribereños, en consonancia con los postulados de la Directiva Marco del Agua.

En el póster que acompaña esta comunicación se muestra una representación visual, necesariamente sintética, de todos los trabajos de cartografía realizados, y se aportan datos estimativos de las superficies de inundación obtenidas a través de los dos métodos aplicados, fotointerpretación en vuelo y análisis digital de imágenes de satélite.

Cuadro 1. Análisis comparativo de estimación de superficies anegadas según método (fotointerpretación/teledetección) en función de considerar sólo áreas inundadas o también aquellas otras con alto contenido en humedad

A) SUPERFICIES ESTIMADAS MEDIANTE DELIMITACIÓN DE ÁREAS CUBIERTAS POR AGUA (en Ha)			
	Imagen de satélite	Fotografía aérea	% diferencia
Ámbito total del estudio	15.226,83	28.106,22	-45,82%
Sectores en los que se dispone de imágenes temporalmente coincidentes con el máximo de la crecida	4.581,40	5.498,17	-16,67%
B) SUPERFICIES ESTIMADAS MEDIANTE DELIMITACIÓN DE ÁREAS CON ALTO CONTENIDO EN HUMEDAD (en Ha)			
	Imagen de satélite	Fotografía aérea	% diferencia
Sectores para los que se dispone de una imagen (13/02/03) Landsat adquirida una semana después del paso del máximo de la crecida	22.605,94	19.849,13	12,20

Nota: Todas las superficies incluyen el cauce actual del Ebro

REFERENCIAS:

- Arqued Esquí, V. y Losada García, J.A.. (1999): "El GIS-Ebro. Un Sistema de Información Geográfica para la cuenca del Ebro". Conferencia de Usuarios de ESRI, Madrid, 8 p. [CD-ROM].
- Bescós Atin, A. (2003): *Las inundaciones en el río Arga: Estudio hidrogeomorfológico*. Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá, Madrid,. 407 p.
- Chuvienco, E. (2002): *Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*. Ariel Ciencia, Barcelona, 568 pp.
- Ollero, A. (1996): *El curso medio del Ebro: geomorfología fluvial, ecogeografía y riesgos*. Tesis doctoral. Publicaciones del Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, Zaragoza, 311 p.
- Ollero, A. (2003): *Comunicación al Seminario "El problema de las inundaciones: claves, razones y soluciones"*, Fundación Nueva Cultura del Agua-Universidad de Zaragoza.
- Ollero, A.; Pellicer, F. y Sánchez, M. (2003): *La crecida del Ebro de febrero de 2003*. Artículo en la Web de la Asociación de Geógrafos Españoles desde el 19 de febrero.