

LA CRECIDA DEL EBRO DE 2007: PROCESOS HIDROMETEOROLÓGICOS Y PERSPECTIVAS DE GESTIÓN DEL RIESGO

Francisco Espejo Gil¹, Sergio Domenech Zuco², Alfredo Ollero Ojeda² y Miguel Sánchez Fabre²

¹Agencia Estatal de Meteorología, Delegación Territorial en Aragón.

²Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza.

RESUMEN

Entre finales de marzo y primeros de abril de 2007 el río Ebro, el mayor colector mediterráneo de la Península Ibérica, experimentó un complejo proceso de crecida. Este trabajo pretende analizar este proceso con detalle en sus causas meteorológicas y en sus consecuencias hidrológicas, siempre dentro del contexto de la gestión del riesgo de crecida en un entorno tan variado y tan intervenido como el de la Cuenca del Ebro. La originalidad de esta crecida radica en las tres puntas de caudal que se corresponden con las tres distintas fases atmosféricas: invernal, equinoccial y una transicional entre ambas. Las consecuencias en el Ebro medio abrieron el debate sobre las posibles medidas de gestión del riesgo.

Palabras clave: crecida, inundaciones, gestión de riesgos, hidrometeorología, Cuenca del Ebro.

ABSTRACT

Between the end of March and the first half of April 2007 the Ebro, the main Mediterranean river in the Iberian Peninsula, experienced a complex flooding process. This paper intends to analyze this process in detail both as for its meteorological causes and its hydrological results, always within the context of flooding risk management in such a varied and altered environment as the Ebro Basin. The originality of this flood lies in the three different

Fecha de recepción: mayo 2008.

Fecha de aceptación: octubre 2008.

discharge maxima corresponding to the three different atmospheric phases: winter, equinoctial and a transitional phase between them. Its consequences in the Middle Ebro opened the debate on the possible risk management measures.

Key words: flooding, flood, risk management, Hidro-Meteorology, Ebro Basin.

I. INTRODUCCIÓN, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

Las crecidas fluviales son episodios extremos necesarios para el correcto funcionamiento de los ríos y de sus ecosistemas asociados. Sin embargo, las sociedades ribereñas no conviven bien con las avenidas, sino que cada vez sufren más daños al tener más intereses en los espacios inundables. En países desarrollados y ríos de llanura, como es el caso estudiado, hay en la actualidad suficientes mecanismos de planificación y sistemas de seguridad como para que una crecida no sea un drama, sino un acontecimiento beneficioso para el río y para la propia educación ciudadana.

A lo largo de las dos últimas décadas se ha desarrollado una línea de investigación sobre sistemas fluviales en el ámbito territorial de la cuenca del Ebro. Dentro de la misma, uno de los ejes de trabajo está constituido por la problemática ambiental y de riesgos del curso medio del Ebro y la búsqueda de soluciones de mitigación y ordenación del territorio (Ollero, 2000; Ureña & Ollero, 2001; Ollero *et al.*, 2004a; Ollero, 2007a, 2007b; Espejo, 2007, 2008a, 2008b).

La crecida que se registró en el cauce medio del Ebro durante los meses de marzo y abril de 2007 fue ilustrativa no solo por su magnitud sino fundamentalmente en cuanto a su gestión. El estudio científico de este proceso de crecida no ha tenido hasta el momento tanto impacto. Del mismo modo en otros países y cuencas las crecidas fluviales se han tenido en consideración recientemente más por la gestión de los espacios en cuencas transnacionales que por su interés hidrológico.

A raíz de las inundaciones que se registraron en Europa Central (Alemania, Austria, República Checa) durante el verano del año 2002, se aunaron esfuerzos internacionales por llevar a cabo una gestión integrada de las cuencas fluviales transfronterizas, como la cuenca del Danubio. Así por ejemplo, las inundaciones en la cuenca del Elba supusieron el desarrollo de nuevas estrategias de defensa de edificios ante las inundaciones en Alemania (Kreibich *et al.*, 2005). El interés que despertó el conocer los procesos de crecida e inundación se debió a la dificultad previa de llevar a cabo una correcta gestión de una crecida en cuencas que atraviesan más de un estado (Sutheo *et al.*, 2003).

Del mismo modo y a raíz de esta necesidad de gestión, se aprobó la Directiva 2007/60/CE de 23 de octubre, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación. Esta directiva establece con claridad que las inundaciones son fenómenos naturales que no pueden evitarse, que algunas actividades humanas y el cambio climático están aumentando su frecuencia y su impacto negativo y que hay que dar más espacio a los ríos, restableciendo en la medida de lo posible las llanuras de inundación. Esta norma exige a los estados miembros la evaluación preliminar del riesgo de inundación antes de diciembre de 2011, la elaboración de mapas de riesgo de inundación antes de diciembre de 2013 y la implementación de planes

de gestión del riesgo de inundación con anterioridad a diciembre de 2015. Igualmente señala que hay que supeditar las actuaciones de mitigación del riesgo a los principios de la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE).

Recientemente se ha despertado más interés por el conocimiento de crecidas relámpago o *flash-flood* (García Ruiz *et al.*, 1996; Riosalido *et al.*, 1998; Ogden *et al.*, 2000; Gaume *et al.*, 2004; Anquetin *et al.*, 2005; Norbiato *et al.*, 2007) debido quizás a la dificultad en su predicción y gestión, que por las que se dan en grandes sistemas fluviales. Se trata de fenómenos hidrológicos de carácter torrencial y muy rápidos en el tiempo, de ahí que sus consecuencias geomorfológicas sean uno de los objetivos más importantes en estos estudios (Arnaud-Fassetta *et al.*, 2005). Conocer el comportamiento del sistema fluvial ante un episodio de intensas precipitaciones es clave en la gestión de riesgos (Del Valle, 2002), y más aun donde hay un alto grado de exposición de la población como puede ocurrir en conos de deyección activos en zonas de montaña (Ayala, 2002; Domenech, 2008) o junto a ramblas de caudal intermitente (Domenech, 2006).

En algunos casos se han desarrollado líneas de investigación ligadas al conocimiento de las crecidas fluviales de grandes sistemas con un carácter de planificación u ordenación territorial (Carmona y Ruiz Pérez, 2000; Romero y Maurandi, 2000; Vallejo, 2000; Ibisate *et al.*, 2000; Ratto *et al.*, 2003; Bescós, 2003; Ibisate, 2004; Bescós y Camarasa, 2004). La minimización de los riesgos exige la realización de mapas y cartografías de peligrosidad de inundaciones que permitan establecer una adecuada gestión de los usos del suelo de la llanura de inundación (Díez Herrero *et al.*, 2006). En estos casos se aplican modelos hidrológicos de cuenca que permitan monitorizar la crecida, estableciendo umbrales de inundación y validando dichos modelos con los datos reales registrados en crecidas recientes (Camarasa y Bescós, 2004; Hunter *et al.*, 2007). La teledetección espacial, las tecnologías LIDAR (*Light Detection and Ranging*) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han significado un gran avance en el desarrollo de estos análisis (Horcajada *et al.*, 2000; Díez Herrero, 2001; Díez Herrero y Pérez Guerrero, 2003; Losada *et al.*, 2004). De igual modo, el desarrollo de modelos de predicción hidrometeorológicos ha supuesto también un gran avance en la prevención de las inundaciones, especialmente en el área mediterránea (Rabuffetti & Milelli, 2005; Reborá *et al.*, 2006).

En esta línea, los objetivos del presente artículo son la determinación de la relación entre la sucesión de las precipitaciones en los tramos alto y medio de la Cuenca del Ebro y la génesis y el desarrollo de la crecida, el análisis pormenorizado de la evaluación de la crecida acaecida en marzo-abril de 2007 en el Ebro medio, la identificación y evaluación de los desbordamientos producidos en el tramo medio del Ebro y la comparación de los efectos de inundación de este evento de crecida con los provocados por el acontecido en febrero de 2003.

II. ÁREA DE ESTUDIO

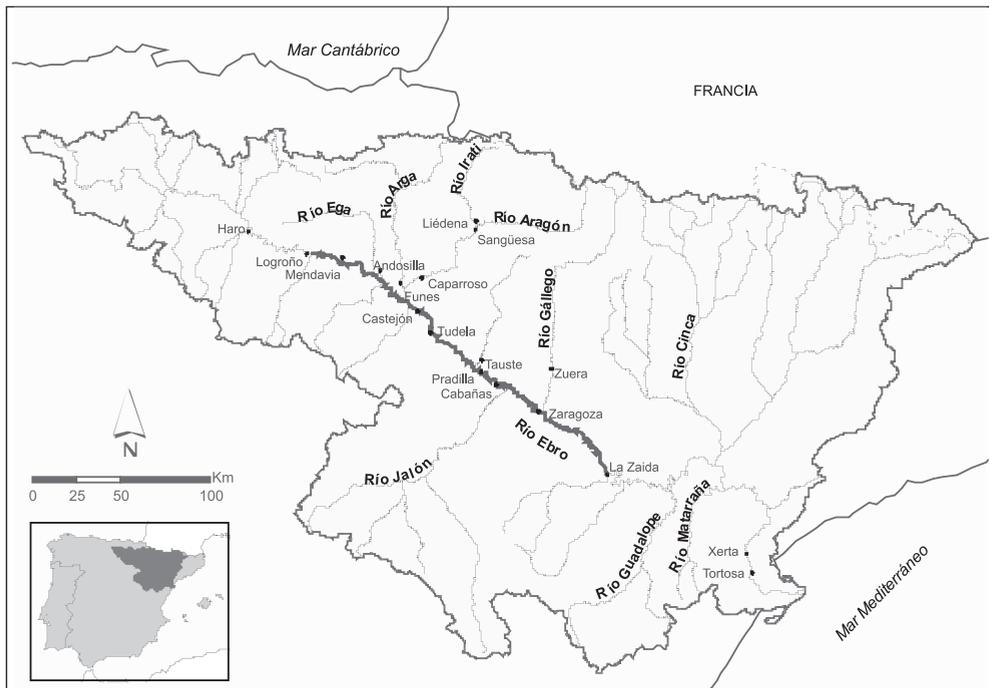
El análisis de la crecida de 2007 se ha centrado principalmente en el curso medio del Ebro, y en concreto en el sector de meandros libres, ya que es el que cuenta con procesos de inundación más destacables, así como con núcleos de población en especial situación de riesgo.

Con un cauce de 930 km de longitud, el Ebro es el mayor río mediterráneo de la Península Ibérica y su cuenca vertiente de 85.000 km² es la sexta en superficie de toda la cuenca mediterránea —la tercera excluyendo las que aportan sus aguas al Mar Negro—, desta-

cando por su importancia ambiental y territorial, por su riqueza como ecosistema y por su papel en la configuración de un eje socioeconómico y cultural de primer orden. A lo largo de todo su curso medio desarrolla un cauce meandriforme de pendiente muy baja. Los meandros son encajados y muy sinuosos entre Haro y Logroño y aguas abajo de La Zaida. Entre Logroño y La Zaida, recorriendo tierras de La Rioja, Navarra y Aragón, el Ebro traza un cauce de meandros libres o divagantes de 346,5 km de longitud (Figura 1). Es el curso fluvial de estas características más largo de la Península, constituyendo uno de los ejemplos de cauce dinámico más valiosos de Europa (Ollero, 1992). La anchura media de su extensa llanura de inundación es de 3,2 km, llegando a alcanzar una anchura máxima de 6 km. El índice de sinuosidad medio es de 1,505 y la pendiente media del cauce es notablemente baja: 0,67 m/km.

Este «Ebro de meandros libres» ha vivido una dinámica fluvial muy activa, con continuos cambios de trazado, migraciones y cortas de meandros. Aunque esta dinámica de gran valor geocológico ha quedado prácticamente eliminada desde los años ochenta del siglo XX, los procesos de erosión mantienen en algunos puntos cierta actividad. El río sigue movilizando materiales, manteniendo algunas barras de gravas dinámicas.

Figura 1.
EL EBRO DE MEANDROS LIBRES EN EL CONTEXTO DE LA CUENCA.

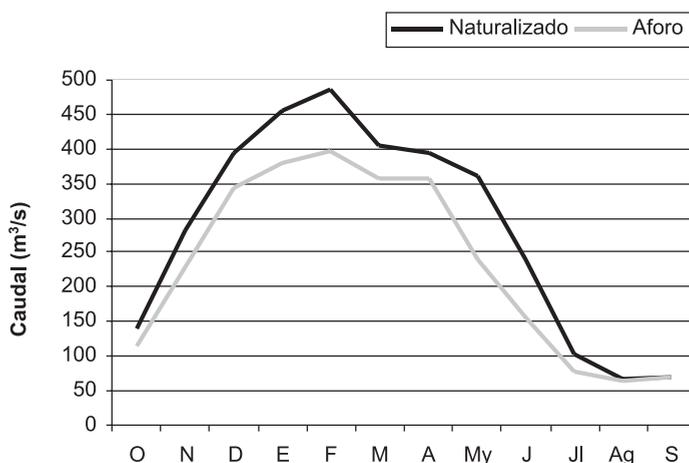


Fuente: C.H.E. Elaboración propia.

Los bosques de ribera del Ebro perviven en orillas convexas e islas en el centro del cauce. Hoy cubren sólo el 4,5% de la superficie de la llanura de inundación, y se limitan por término medio al 40% de la extensión que ocupaban en 1950. Esta reducción drástica se ha debido a intervenciones antrópicas con el fin de ganar terreno para el cultivo. Los sotos actuales son enclaves desconectados entre sí, jóvenes, instalados sobre terrenos renovados por el río en las crecidas de mediados del siglo XX, y han alcanzado un notable grado de madurez a causa de la reducción de las crecidas en las últimas décadas.

El régimen hidrológico del Ebro medio es pluvio-nival, con máximo en febrero y estiaje estival, tal como se refleja en la figura 2, donde se representan las curvas de variación estacional de caudal en el aforo de Castejón, correspondientes tanto a los datos medidos como a los naturalizados por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) con el modelo Sacramento (Burnash, 1995). La influencia pluvial oceánica produce los notables caudales invernales, además de la mayor frecuencia de crecidas en dicha estación. A lo largo del curso fluvial se constata un lógico incremento del volumen de caudal, pero una pérdida progresiva de caudal específico, que si en Miranda y Castejón ronda los 10 l/km²/s, en Zaragoza se cifra en 6,6. Es muy relevante la aportación de unos 4.500 hm³ realizada por el Aragón-Arga inmediatamente aguas arriba de Castejón, que duplica el agua fluyente por el Ebro. La irregularidad interanual del Ebro medio es notable, con valores de coeficiente entre 6 y 7, coexistiendo grandes crecidas con marcados estiajes.

Figura 2.
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL DE CAUDAL DEL EBRO EN CASTEJÓN.



Fuente: C.H.E. Elaboración propia.

El curso medio del Ebro es uno de los tramos de la red fluvial de la cuenca con mayor frecuencia e intensidad de crecidas. En febrero de 1643 tuvo lugar la primera gran crecida bien documentada, catastrófica en las ciudades de Tudela y Zaragoza. También merece ser

destacada la de septiembre-octubre de 1787, originada en el Pirineo Navarro, gravísima en el río Aragón (numerosas pérdidas humanas en Sangüesa), generalizada en toda la cuenca y en todo el curso del Ebro, de manera que en la escala de la iglesia de Xerta (en las proximidades del Delta) le corresponde la marca más alta, a 10 m de altura. La mayor avenida del siglo XIX fue posiblemente la más destacada de toda la historia en el Ebro medio: la de enero de 1871. En Zaragoza las aguas superaron en 1,5 m la señal de la riada más alta registrada hasta entonces. Toda la llanura de inundación quedó anegada y las aguas afectaron a los núcleos urbanos, con numerosas víctimas. Las siguientes crecidas importantes, en septiembre de 1874 y Marzo de 1878, no le fueron muy a la zaga en sus volúmenes. La de marzo de 1930 fue la última crecida del Ebro que causó víctimas mortales.

Desde 1950 los caudales punta de las crecidas extraordinarias en el Ebro medio son los que se recogen en la tabla 1. Todas las crecidas extraordinarias del último siglo han tenido lugar entre noviembre y marzo. La crecida de enero de 1961 es la más importante del siglo XX, con un periodo de retorno de 84 años en el aforo de Zaragoza. En amplios sectores anegó la totalidad de la llanura de inundación y causó graves pérdidas económicas.

Tabla 1.
CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS (M³/S) ALCANZADOS POR LAS CRECIDAS
EXTRAORDINARIAS EN EL EBRO MEDIO DESDE 1950.

| crecida | Mendavia | Castejón | Zaragoza |
|-------------------------------|----------|----------|----------|
| febrero 1952 | 855 | 3140 | 3260 |
| diciembre 1959 | 1476 | 2810 | 2744 |
| enero 1961 | 1307 | 4950 | 4130 |
| noviembre 1966 | 971 | 4050 | 3154 |
| febrero 1978 | 1152 | 3375 | 2631 |
| diciembre 1980 | 1516 | 3250 | 2908 |
| enero 1981 | 1490 | 2675 | 2940 |
| febrero 2003 | 2152 | 3320 | 2988 |
| umbral de desbordamiento | 810 | 1800 | 1630 |
| umbral crecida extraordinaria | 1238 | 3061 | 2716 |

Fuente: C.H.E. Elaboración propia.

Cabe destacar como periodos con abundantes crecidas las décadas de los años 30 y de los 60 del siglo XX. En la figura 3 se observa la tendencia decreciente de los caudales máximos anuales en el aforo de Zaragoza, tendencia rota por la crecidas de febrero de 2003, que fue la más importante por su volumen de caudal entre las registradas en los últimos 25 años (Ollero et al., 2004b; Losada et al., 2004), así como por ésta de marzo-abril de 2007, que parecen apuntar una tendencia alza en los caudales máximos (Figura 3).

Figura 3.
CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS ANUALES EN ZARAGOZA (SERIE 1943-2007).



Fuente: C.H.E.

III. METODOLOGÍA

El estudio de esta situación se ha abordado del modo clásico, de manera diferenciada para sus aspectos atmosféricos y para la respuesta hidrológica de la red fluvial. Sin embargo, la gran interrelación de ambos elementos supone que las referencias entre ambos sean muy frecuentes. Para el estudio de la fase atmosférica se han utilizado las salidas de análisis del modelo numérico HIRLAM-INM de la Agencia Estatal de Meteorología de España (AEMET) (Del Río, 1998), a diferentes niveles —superficie, 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa y 300 hPa— y con diferentes parámetros —presión, altura del geopotencial, temperatura, humedad relativa y viento—, así como imágenes infrarrojas del satélite METEOSAT (Espejo, 2007), aunque aquí sólo se muestre una parte muy reducida de los mismos. La distribución espacial de las precipitaciones se ha estudiado mediante interpolaciones espaciales con SIG de los datos diarios de la red climatológica de la AEMET, que en este trabajo aparecen como acumulaciones para cada una de las fases en las que se ha dividido el episodio.

La evolución hidrológica del episodio se puede estudiar con un amplio nivel de detalle gracias a la buena red de puntos de aforo de la Confederación Hidrográfica del Ebro y a la disponibilidad de los datos del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH). La actividad del SAIH-Ebro permite no sólo el seguimiento en tiempo real de la crecida, sino la acumulación de información de gran detalle, dada su periodicidad quinceminutal.

Tomando como punto de partida esos datos quinceminutales se ha efectuado una simplificación seleccionando los correspondientes a cada hora en punto. Se han analizado estos datos horarios pertenecientes tanto a las estaciones del tramo medio del Ebro como a las de diferentes afluentes, para valorar su contribución a la crecida del Ebro. Finalmente se han

representado los hidrogramas, que aparecen en otro epígrafe de este trabajo, incorporando además de los aforos del Ebro los de aquellos afluentes que mayor aportación realizaron durante el episodio de crecida (Aragón, Arga, Irati). No se incluyen en la representación gráfica de la evolución de la crecida los registros obtenidos en estaciones de aforos de afluentes cuyo volumen de aportación fue menos significativo (Arba, Gállego, Ega).

Todos estos datos estuvieron disponibles durante el transcurso de la crecida y en los días posteriores en Internet, página web de la Confederación Hidrográfica del Ebro, de donde parcialmente fueron recogidos, solicitando el SAIH-Ebro los que restaban para completar las series necesarias.

El análisis de imágenes de satélite y de fotografías aéreas realizadas en el momento de máxima inundación constituye la metodología de trabajo más adecuada para la evaluación de la superficie y consecuencias de los procesos de inundación, permitiendo la evaluación de daños. Así, durante la crecida de febrero de 2003 se pudo realizar la fotointerpretación directa mediante vuelos en avioneta y el análisis de inundabilidad con imágenes de satélite (Losada et al., 2004). Sin embargo, para la crecida de marzo-abril de 2007 no se pudo realizar esta evaluación porque las condiciones atmosféricas los días posteriores al máximo de crecida no fueron las adecuadas para el análisis mediante teledetección. Conviene realizar la evaluación de zonas inundadas con imágenes de satélite el mismo día del máximo de crecida, ya que es entonces cuando suele registrarse la mayor zona inundada. Sin embargo, la cobertura nubosa de las imágenes Landsat ETM 7 del día 6 de abril (máximo de crecida en este caso) era elevada, imposibilitando dicho análisis. Tan sólo se contó con imágenes del sensor MODIS con una cobertura nubosa aceptable dos días después del máximo de crecida. Sin embargo la resolución espacial de este sensor (250 m) no es apta para obtener una zona inundada comparable con la estimada por Losada et al. (2004) en la crecida de 2003.

Para la evaluación de consecuencias también es fundamental el trabajo de campo durante el proceso de crecida y en los días posteriores. Estas observaciones se restringen por fuerza a espacios concretos, siendo imposible el reconocimiento simultáneo e intensivo de toda la llanura de inundación afectada. En el caso de la crecida de marzo-abril de 2007 se realizaron observaciones cualitativas durante cada una de sus puntas en diferentes enclaves de la llanura de inundación y también desde lo alto del escarpe margo-yesífero de la margen izquierda del Ebro, que resultaron útiles para la comprobación de consecuencias geomorfológicas y económicas.

IV. LA CRECIDA DE MARZO-ABRIL DE 2007: GÉNESIS METEOROLÓGICA

Los procesos de inundación que afectan a la Cuenca del Ebro son tan variados como diversos son los ámbitos de cada una de las cuencas de sus afluentes. Sin embargo, es posible alcanzar algunas generalizaciones considerando los procesos que afectan a grandes sectores de la cuenca, como por ejemplo las áreas situadas en la margen izquierda (norte) o en la margen derecha (sur) del curso principal. Otra posible clasificación de los procesos de crecida es según las que afectan a los afluentes de la cabecera (especialmente en las áreas de la Cordillera Cantábrica y de los Pirineos occidentales) y las que afectan a los afluentes de entornos más mediterráneos (Pirineos orientales y zonas al sureste de la cuenca). Existe una clara diferenciación entre el origen meteorológico de los procesos de crecida de la primera zona (denominada aquí sector superior) y los de la segunda (a la que se hace referencia como sector inferior) (Espejo, 2008b).

Las crecidas del sector superior de la cuenca suelen estar producidas por vaguadas estacionarias de gran longitud de onda en los niveles medios y altos que suponen una incidencia de la circulación del noroeste vinculada al chorro circumpolar sobre el extremo noroccidental de la cuenca, que producen grandes acumulaciones de precipitación (del orden de 250 mm o superiores) sobre la divisoria de aguas intercantábrica y el Pirineo occidental en periodos de tiempo que oscilan entre una y dos semanas. Este tipo de crecidas se da preferentemente en meses invernales o del comienzo de la primavera (diciembre-primeros de abril) y los procesos derivados de la precipitación en forma de nieve en cotas medias o bajas y su posterior fusión suelen jugar un papel importante en el desarrollo de los eventos de crecida.

Las crecidas que afectan primordialmente al denominado sector inferior de la cuenca pueden tener diferentes orígenes meteorológicos. Por una parte, las que afectan a mayores extensiones de esta sección son crecidas originadas por circulaciones ciclónicas con reflejo o no en superficie, que pueden acumular en las cabeceras de algunas subcuencas —especialmente las del Cinca al nordeste y las del Guadalope y Matarraña al sureste— cantidades del orden de 500 mm en episodios con una duración típica de una semana o incluso menor. Este tipo de crecidas es más frecuente en las estaciones equinocciales, primavera —con tendencia a afectar a las zonas más al oeste de este sector— y otoño —que suelen concernir más a la mitad oriental del sector inferior—. Por último, pueden aparecer crecidas predominantemente locales, con características de *flash-flood* que se producen sobre todo en verano, suelen afectar más al sector inferior de la cuenca y cuyo origen meteorológico está en sistemas convectivos.

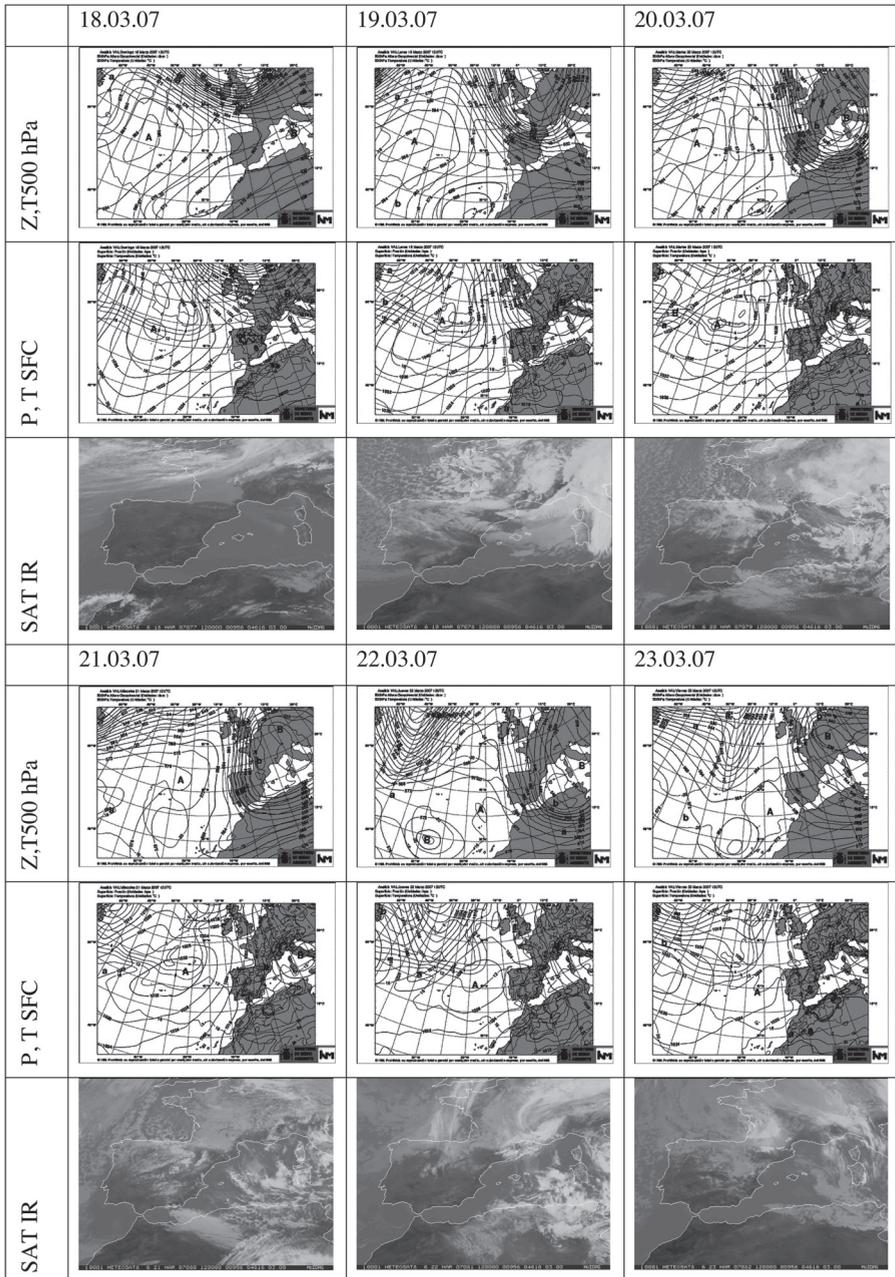
Las crecidas que atañen especialmente al Ebro Medio son las del sector superior de la cuenca, lo que determina que los episodios de crecidas extraordinarias en este tramo del colector principal se produzcan típicamente en el periodo invernal. La crecida del Ebro medio en 2007 puede clasificarse en origen como una crecida de este tipo, pero lo que quizás haga más destacable este episodio sea su complejidad y su origen meteorológico mixto con tres fases diferenciadas.

Desde el punto de vista meteorológico el episodio tuvo una duración muy larga, desde el 18 de marzo hasta el 10 de abril, a lo largo de la que se pudo diferenciar una primera fase de situación de crecida invernal típica, otra intermedia de transición y una tercera de situación de crecida equinoccial.

1. Primera fase

La primera fase estuvo caracterizada en los niveles altos por una vaguada con eje N-S sobre el centro-este de Francia que se profundizó hacia el sur entre los días 18 y 21 de marzo (Figura 4). En superficie, la dorsal anticiclónica que predominó sobre la península Ibérica retrocedió hacia el oeste y dejó paso a una intensa circulación de norte, con paso sucesivo de sistemas frontales que produjo numerosas precipitaciones en el sector superior de la cuenca, acumulando cantidades superiores a los 200 mm en las cabeceras del Arga y del propio Ebro (Figura 5). Hacia el día 22, el eje de la vaguada y el centro de la depresión se desplazaron hacia el este y la intensidad y distribución espacial de las precipitaciones disminuyeron. En esta primera fase la cota de nieve estuvo muy baja y se produjeron nevadas prácticamente a cualquier cota debido a la intensidad de la entrada de una masa de aire húmeda y fría. Más adelante se podrá constatar cómo esta fase correspondió con la primera punta de caudal en el Ebro medio.

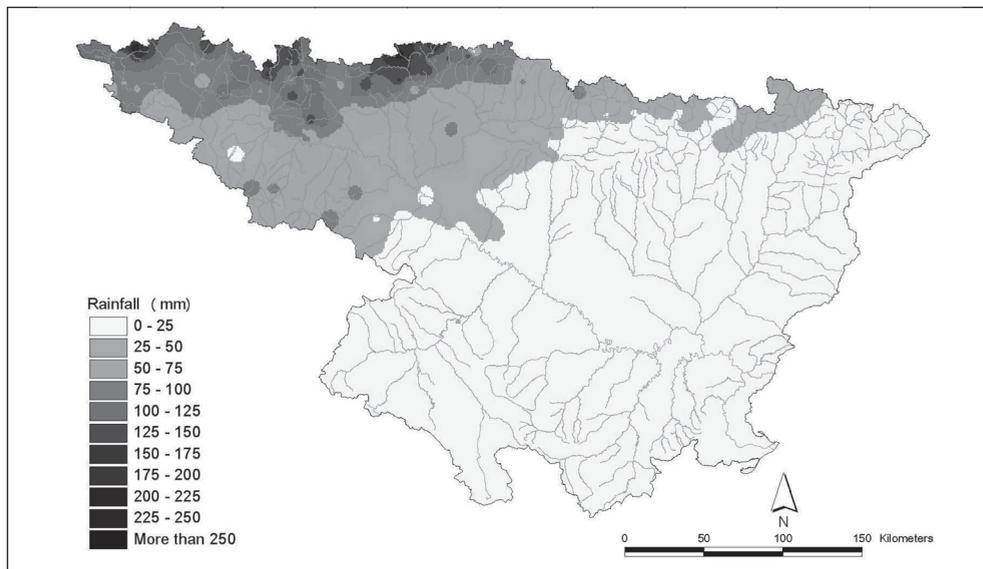
Figura 4.
SITUACIÓN A NIVELES ALTOS, BAJOS E IMÁGENES DE SATÉLITE CORRESPONDIENTES
A LA FASE INVERNAL DEL EPISODIO (18 AL 23 DE MARZO DE 2007)



Fuentes: AEMET y EUMETSAT.

Figura 5.

PRECIPITACIÓN ACUMULADA EN LA CUENCA DEL EBRO DURANTE LA PRIMERA FASE DEL EPISODIO (18.03.07-23.03.07).



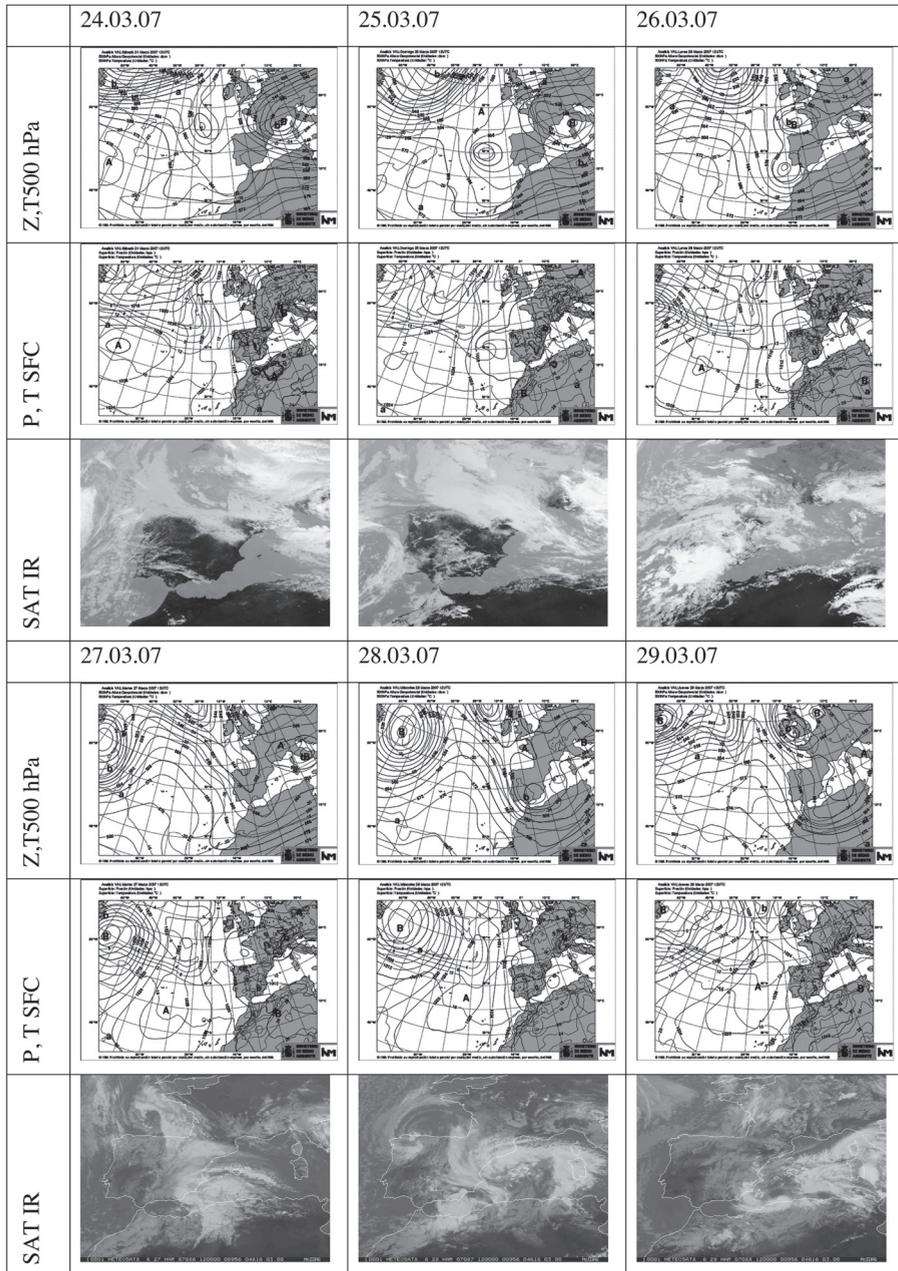
Fuente: AEMET, elaboración propia.

2. Segunda fase

La fase mixta que siguió a continuación se caracterizó por las perturbaciones del chorro circumpolar en altura — frentes fríos asociados a depresiones del norte — y las interacciones de la misma con una depresión aislada situada más al sur. Ya el día 22 (Figura 6) pudo apreciarse una depresión aislada en altura al oeste de Canarias, que tuvo su origen en la vaguada sobre la península Ibérica. Esta depresión se intensificó y comenzó a dirigirse hacia el norte a partir del día 23. A partir del día 24 (Figura 6) interaccionaron sobre la Península esta depresión, la depresión sobre el Mediterráneo occidental en la que se convirtió el principal agente de la primera fase de la situación y, en superficie se marcó una dorsal atlántica que aportó una cierta advección cálida sobre la cuenca, que produjo un ascenso de la cota de nieve y que facilitó además la fusión de la nieve caída en gran cantidad en cotas bajas en la fase anterior.

El día 24 se produjo en niveles altos la interrupción del flujo de aire marítimo-polar que en todo momento regía la situación y comenzó el predominio del flujo ciclónico asociado a una depresión situada sobre Liguria, suponiendo un cierto impasse en la situación y dando lugar a un segundo episodio intermedio caracterizado por la interacción de tres sistemas ciclónicos en los niveles medios-altos de la atmósfera. Al comienzo, el principal era el anteriormente mencionado, situado al NE de la Cuenca con un claro reflejo en superficie. Otro centro secundario se situó al NW de la Península Ibérica y el tercer centro en juego era el resto de la depresión aislada en niveles altos que, reabsorbido por la circulación general, se aproximó a la Península por el SW.

Figura 6.
SITUACIÓN A NIVELES ALTOS, BAJOS E IMÁGENES DE SATÉLITE CORRESPONDIENTES
A LA FASE INTERMEDIA DEL EPISODIO (24 AL 29 DE MARZO DE 2007)

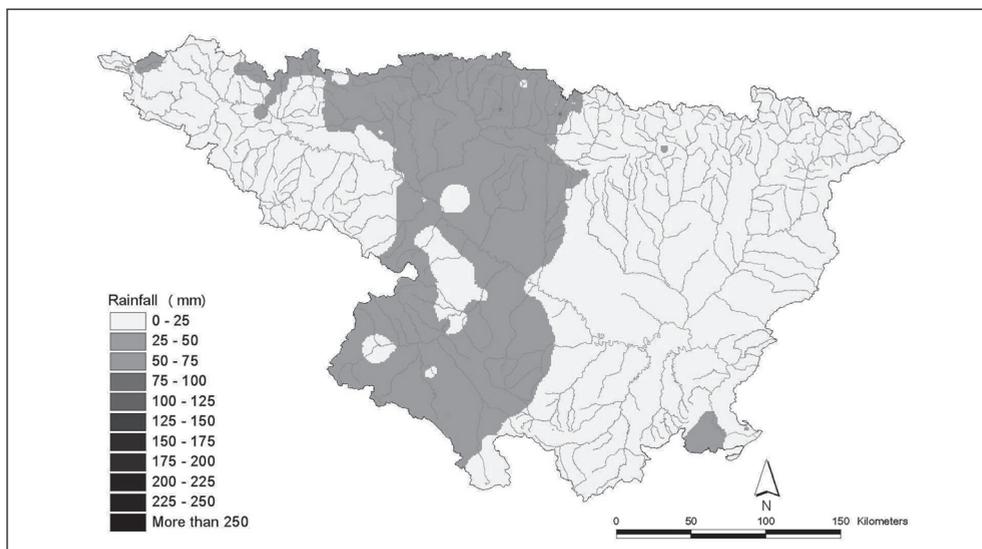


Fuentes: AEMET y EUMETSAT.

Durante los días 25 y 26, se produjo la interacción en niveles altos entre los dos sistemas ciclónicos restantes, uno al NE y otro al SW de la Cuenca. En los niveles bajos la situación se plasmó en una laxa depresión que abarca la totalidad de la Península con un frente ocluido que afectó más al NW de la Cuenca del Ebro con eje aproximadamente paralelo al propio río. El día 27 las depresiones presentes anteriormente en altura se fusionaron finalmente y desplazan su centro al Mediterráneo Occidental «arrastrando» al frente ocluido hacia el sur. Mientras tanto y al oeste de la Península, de nuevo se produjo un proceso de ciclogénesis en altura asociado a una profunda vaguada que terminaría de completar su ciclo sobre la Península y la Cuenca para el día 29. Lo más significativo en la Cuenca de este segundo episodio fue la precipitación asociada a la oclusión, que produjo precipitaciones moderadas —del orden de 30-50 mm— en una banda en sentido meridiano a lo largo de la zona central (Figura 7), aunque sin duda desde un punto de vista hidrológico lo más significativo fue el resultado de la interrupción del flujo polar y la advección cálida que supuso la fusión de la nieve caída durante los días anteriores en cotas relativamente bajas, que produjo la segunda punta de la crecida en el Ebro medio.

Figura 7.

PRECIPITACIÓN ACUMULADA EN LA CUENCA DEL EBRO DURANTE LA SEGUNDA FASE DE LA SITUACIÓN (24.03.07-29.03.07).

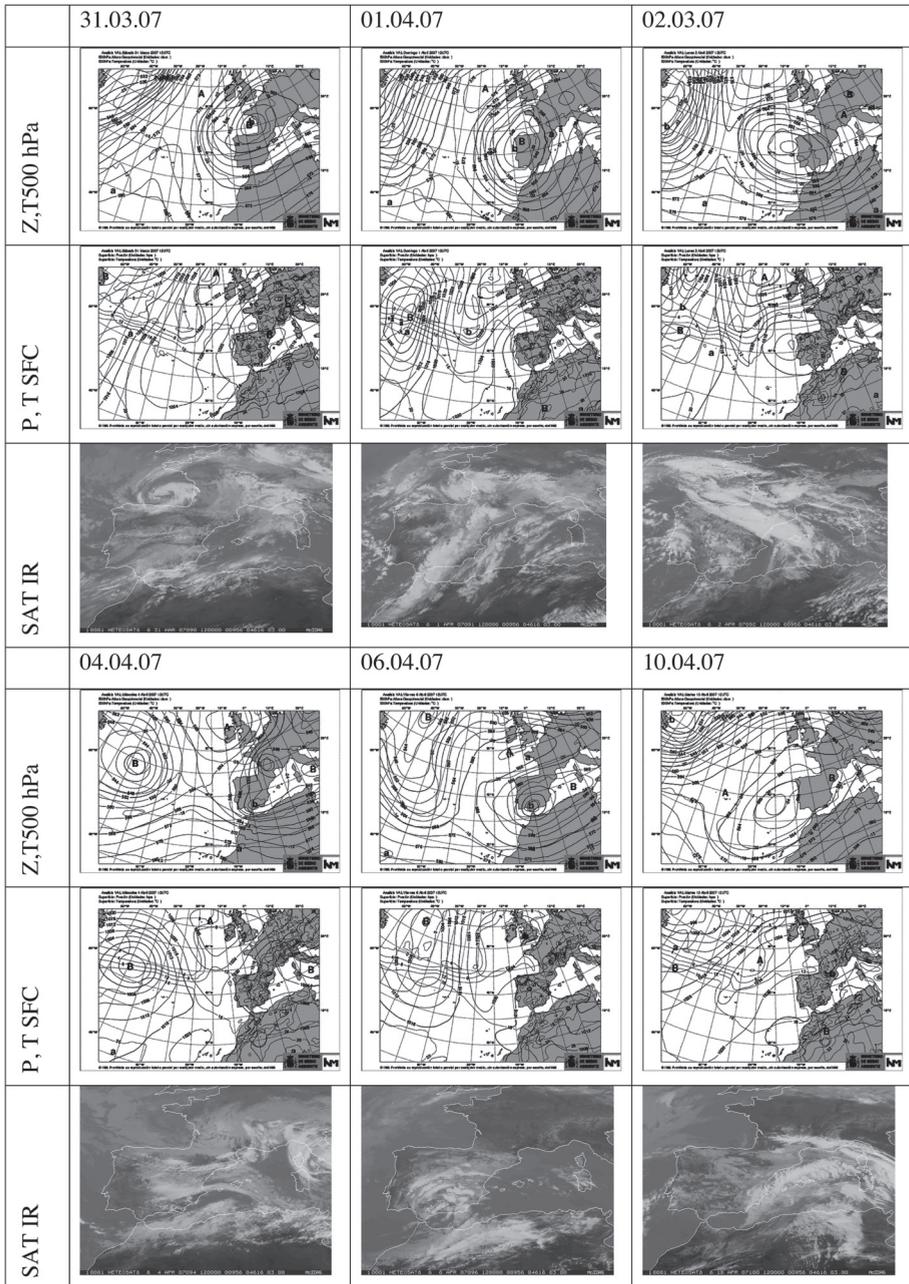


Fuente: AEMET, elaboración propia.

3. Tercera fase

A partir del día 30, una nueva depresión que se había formado durante las horas anteriores sobre las Islas Británicas se desplazó hacia el sur siguiendo la trayectoria en altura que le marcaba la rama descendente de la dorsal que se afianzaba sobre el eje central del Atlántico.

Figura 8.
SITUACIÓN A NIVELES ALTOS, BAJOS E IMÁGENES DE SATÉLITE CORRESPONDIENTES A LOS DÍAS MÁS SIGNIFICATIVOS DE LA FASE EQUINOCCIAL DEL EPISODIO (30 DE MARZO AL 10 DE ABRIL DE 2007)



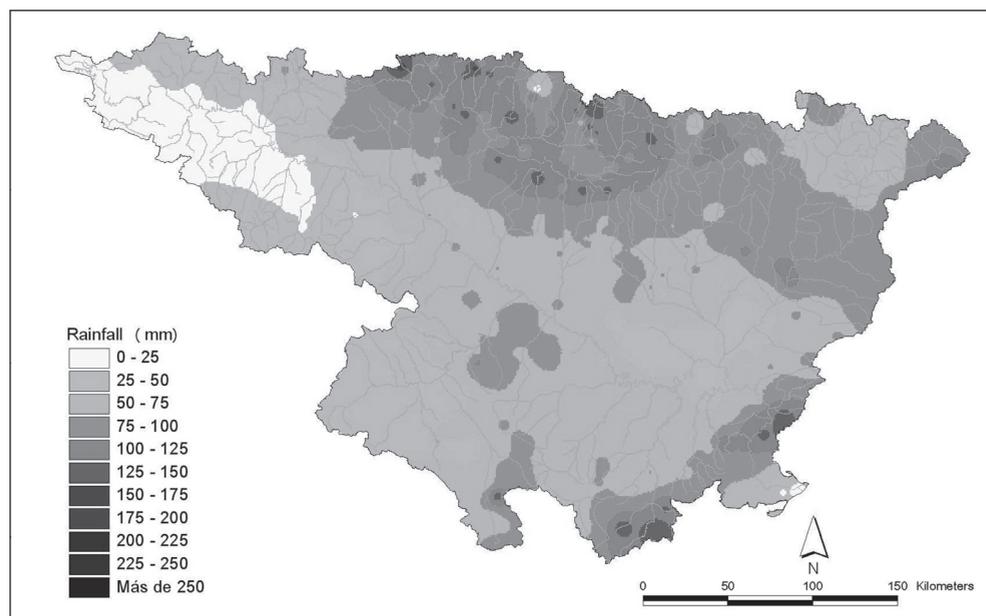
Fuentes: AEMET y EUMETSAT.

Sin embargo, esta nueva circulación meridiana no se prolongó durante mucho tiempo, puesto que la circulación ciclónica asociada a dicha depresión predominaría claramente a partir del día 31, al situar su centro sobre el Golfo de Vizcaya (Figura 8). Así, aumentó la influencia sobre la cuenca de los frentes y sistemas asociados a la depresión y aumentó la intensidad de las precipitaciones, que fueron generalizadas en la cuenca durante los tres días siguientes. La depresión, muy profunda, indujo flujo del suroeste sobre la cuenca, con advección cálida y produjo acumulaciones de precipitación del orden de 60 mm / 24 h en las cabeceras de los cursos del Pirineo occidental y central, así como en los cursos altos de los afluentes del Prepirineo (Figura 9). Las precipitaciones de estos tres días se sumaron a las escorrentías generadas por la fusión nival, reforzada por la advección cálida y por las propias precipitaciones, para producir la tercera y más importante punta de crecida del episodio en el Ebro medio.

El 2 de abril la depresión adquirió una forma ovalada en sentido WSW-ESE, con su eje de vaguada paralelo al curso del Ebro, lo que volvió a producir una oclusión sobre la Cuenca con abundantes precipitaciones en su zona central. Dicha oclusión se propagó lentamente hacia el norte con el avance de la vaguada y repitió las nevadas en zonas bajas del área pirenaica. Esta situación persistió durante los días siguientes, enviando nuevos frentes y sistemas de componente S o SW. Hacia el día 6, la depresión se centró sobre el SE de España, induciendo por tanto la entrada de flujo de la misma componente sobre la cuenca y dejando precipitaciones que ya no afectaron a su sector superior sino que acumularon mayores canti-

Figura 9.

PRECIPITACIÓN ACUMULADA EN LA CUENCA DEL EBRO DURANTE LA TERCERA FASE DEL EPISODIO (30.03.07-10.04.07)



Fuente: AEMET, elaboración propia.

dades cuanto mayor fuera la proximidad a la desembocadura del Ebro (Figura 9). Un nuevo desplazamiento del centro de la depresión al oeste facilitó la entrada de frentes que produjeron precipitaciones en las zonas montañosas de la cuenca, en general débiles, y de esta forma se mantuvo la situación hasta que el día 10 se puede considerar terminado el episodio: una gran área depresionaria en superficie y niveles bajos que abarcaba toda la Península Ibérica hasta Canarias, con centro en altura al W de Portugal, con un flujo no muy marcado del SE que afectó a la Cuenca del Ebro con precipitaciones débiles.

V. PROGRESIÓN HIDROLÓGICA

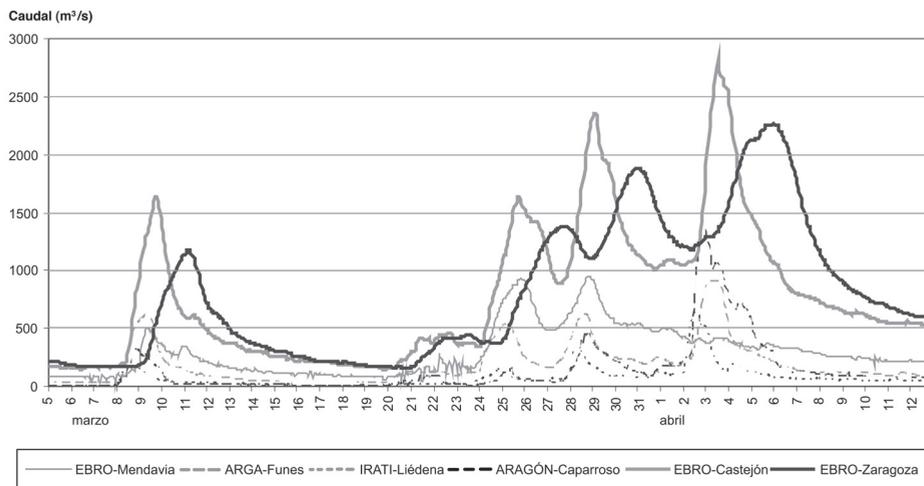
La crecida de marzo-abril de 2007 está definida por la presencia de tres picos que se suceden de forma rápida, siendo el principal el último. Están precedidos por una crecida de menor entidad pero que deja el terreno preparado para favorecer el funcionamiento de la escorrentía. Los tres picos de la crecida guardan una relación directa con las tres fases de precipitación que han sido analizadas en el apartado anterior. Ya desde última hora del día 19 de marzo de 2007, el caudal que discurrió por el río Ebro comenzó a incrementarse, tanto en Castejón como en Zaragoza, iniciándose el episodio de crecida que aconteció durante las semanas siguientes (Figura 10).

Antes, los limnógrafos de las dos estaciones de aforo mencionados habían registrado una crecida de menor entidad caracterizada por una pronunciada curva de ascenso que se completó en Castejón durante el día 8 de marzo, conduciendo al pico de 1636,36 m³/s a las 17:30 horas del día 9. Por su parte, en Zaragoza el incremento rápido de caudales se produjo, básicamente, durante los días 9 y 10, llegándose al pico de crecida (1173,80 m³/s) a las 3:30 h del día 11. El lapso de tiempo transcurrido entre los picos de la crecida en ambas estaciones, 34 horas, se ajusta perfectamente a lo habitual en la dinámica del Ebro, una media de 31 h. En ambos aforos el descenso de caudal también fue bastante rápido, quedando muy bien marcada la ruptura entre la curva de descenso y el inicio de la curva de agotamiento. Esta crecida también fue muy visible en el río Arga, midiéndose en Funes un caudal de 623,05 m³/s entre las 7:45 y las 8:45 h. del día 9 de marzo. También en el río Ega, que alcanzó en Andosilla 138,27 m³/s.

Podríamos decir que la curva de agotamiento de esta crecida se completó, ya que los caudales del Ebro en Castejón y Zaragoza rondaron durante muchos momentos de los días 19 y 20 los 160 m³/s. Por ello, queda totalmente diferenciada del episodio de crecida que acaeció algunos días después. No obstante, la presencia de esta crecida tuvo reflejo en el episodio de finales de marzo y principios de abril que nos ocupa, ya que supuso que éste encontrara tanto los cauces como los acuíferos aluviales próximos a los ríos fuertemente humectados.

Como se ha indicado, a partir de las lluvias caídas en la cabecera de la cuenca el día 18, el caudal del río Ebro, así como el del río Aragón, iniciaron un incremento a partir del día 19, que se acentuó durante los días 20 y 21 en Castejón, 21 y 22 en Zaragoza, y que llevó los caudales por encima de los 450 m³/s, nivel en torno al que se mantuvieron hasta el día 24. A primera hora de esta jornada en Castejón y al inicio del día siguiente en Zaragoza se constata un rápido incremento de caudal que dio lugar a la primera de las curvas de ascenso del complejo episodio de crecida acontecido en marzo-abril de 2007. Complejo por la presencia de 3 picos de crecida, muy visibles en algunos aforos del Ebro y afluentes como el Arga o el Irati, pero que fueron sólo 2 picos en otras estaciones del río Ebro.

Figura 10.
HIDROGRAMA DE LA CRECIDA DE MARZO-ABRIL DE 2007.



Fuente: SAIH-Ebro. Elaboración propia.

Tanto en Castejón como en Zaragoza se aprecian perfectamente tres picos, separados por descensos bruscos y muy significativos del caudal circulante. El primero de ellos se alcanzó a las 17 h. del día 25 de marzo en Castejón, algunas horas después de que el aforo del río Arga en Funes registrara un pico de 547,03 m³/s, y de que el Irati y el Ega vieran bastante incrementados sus caudales; también en Mendavia el caudal del Ebro era elevado en esos momentos, sobrepasando los 900 m³/s. En Zaragoza este pico comenzó a dibujarse en las primeras horas del día 27, aunque hubo que esperar a las 20:30 para que se registrase el caudal máximo de 1383,24 m³/s.

Cuando se estaba manifestando en Zaragoza este primer pico, en Castejón y en Funes (río Arga) ya se había producido un rápido descenso de caudal, aunque sin completarse la curva de descenso, e incluso se había iniciado una nueva curva de ascenso que conduciría al segundo de los picos o crestas del episodio de crecida, también de carácter secundario.

Este segundo pico se concretó en Mendavia en 955,4 m³/s medidos a las 18:30 h. del día 28 de marzo, en Castejón en 2362,17 m³/s registrados al empezar el día 29, quedando también muy patente en las aportaciones efectuadas al Ebro por el río Arga, con un pico de 627,5 m³/s en Funes, el Aragón, con un máximo de 480,45 m³/s en Caparroso, y el Irati, con 357 m³/s; en estos tres afluentes el pico se alcanzó el día 28 de marzo.

En Zaragoza, después de marcar el caudal un descenso sensiblemente menos acusado que el de Castejón, la curva de ascenso que condujo al segundo pico del episodio de crecida comenzó a dibujarse al acabar el mencionado día 28, alcanzándose la cresta a las 22:45 h. del día 30 de marzo, 46 horas después de registrarse en Castejón. Este pico se cifró en 1885 m³/s, valor que se repitió en varias de las mediciones quinceminutales efectuadas entre las 22:45 h. del día 30 y las 2 h. del día 31.

Nuevamente se repitió el esquema, de modo que cuando se estaba manifestando en Zaragoza este segundo pico de la crecida, en Mendavia, Castejón, Funes, Liédana y Caparroso se había completado una nueva curva de descenso, e incluso la crecida estaba dibujando su curva de agotamiento, aunque en Castejón ésta última apenas se empezaba a esbozar.

El día 2 de abril hay un nuevo «vuelco» en la evolución de la crecida, ya que se incrementaron muy bruscamente los caudales, sobre todo del Arga y el Aragón, pero también el Irati e incluso el Gállego y en menor medida el Ega. Como consecuencia también aumentó a un ritmo acelerado el caudal del Ebro en Castejón, aunque no se registró incremento de caudal en Mendavia donde la mencionada curva de agotamiento continuó su desarrollo. Ello evidencia con gran claridad que las aguas que alimentaron o determinaron el pico principal de la crecida del Ebro en Castejón y Zaragoza procedían esencialmente del sistema Arga-Aragón. En este sistema se constataron los siguientes picos: 644,5 m³/s del río Irati en Liédana, a las 13 h. del día 2 de abril; 910,35 m³/s del río Arga en Funes, en distintos momentos entre las 7:15 h. y las 9:45 h. del día 3 de abril; 1.393,8 m³/s del río Aragón en Caparroso, a las 20 h. del día 2. Por su parte, el río Ega en Andosilla llegó hasta 278,10 m³/s, el Gállego en Zuera hasta 392,61 m³/s y el Arba en Tauste hasta 248,2 m³/s.

Con todo ello el Ebro alcanzó en Castejón un pico máximo para todo el episodio de crecida de 2825,60 m³/s a las 12 h. del día 3 de abril. En Zaragoza, el descenso del pico del día 30 de marzo se interrumpió a lo largo del día 2 de abril, comenzando un nuevo ascenso lento al principio y mucho más rápido desde la segunda mitad del día 3. El pico principal de la crecida quedó marcado en Zaragoza entre las 23:30 y las 23:45 h. del día 5, cifrado en 2282,44 m³/s, lo que supone una laminación muy considerable respecto al valor alcanzado en Castejón. El desfase temporal entre los picos de estas dos estaciones de aforo del Ebro fue prácticamente de 60 horas, casi el doble de lo habitual, como consecuencia de la intervención en la llanura de inundación permitiendo, mediante la rotura de algunas defensas, la laminación de la crecida y la pérdida de velocidad de su frente.

En el hidrograma se ha incluido de manera testimonial la evolución de los caudales del Ebro en Tortosa. Ésta queda desligada de la crecida, ya que los aportes de caudal fueron gestionados a través de los embalses de Mequinenza y Ribarroja, dirigiendo con el ritmo de desembalse los registros medidos en Tortosa, siendo lapsos de tiempo muy concretos los que se dejó discurrir el agua al ritmo de la crecida.

Mención especial merece el carácter tan tendido o suavizado que tuvieron los tres picos del episodio de la crecida de marzo-abril en Zaragoza. Se debió a la laminación realizada, en la amplia llanura de inundación existente entre los aforos de Castejón y Zaragoza, tanto de forma natural como inducida desde la acertada gestión de la crecida efectuada por la Confederación Hidrográfica del Ebro.

VI. CONSECUENCIAS Y MEDIDAS DE GESTIÓN

La crecida que experimentó el Ebro tuvo unas marcadas consecuencias en diferentes ámbitos: medioambientales, económicas y sociales.

Desde el punto de vista medioambiental, el sistema fluvial del corredor del Ebro asistió a procesos de reactivación recobrando funcionalidad alguna de sus componentes, teniendo en cuenta que en el periodo 2003-07 no se había registrado ninguna crecida de importancia. La

larga duración del evento de 2007 permitió la recarga del acuífero aluvial del Ebro en todo el tramo afectado, lo cual fue muy beneficioso para las comunidades vegetales y faunísticas regenerando las biocenosis en los sotos, que habían sufrido las consecuencias de dos años secos precedentes. Del mismo modo, se iniciaron procesos geomorfológicos de movilización y deposición de sedimentos, haciéndose visibles la aparición de nuevos depósitos de gravas en el cauce, creándose así nuevos hábitats fluviales.

Desde el punto de vista económico, las pérdidas en el eje del Ebro fueron cuantiosas. Se produjeron daños en infraestructuras de riego (acequias), anegamiento temporal de zonas de cultivo (unas 12.000 hectáreas) y rotura de defensas. En la población zaragozana de Pradilla no se produjeron evacuaciones de la población ante el riesgo de inundación del casco urbano, cosa que sí ocurrió en la crecida de 2003. En Cabañas se había recrecido el muro que protege el casco urbano a raíz de la crecida de 2003, por lo que el evento de crecida tampoco supuso un gran riesgo, aunque las aguas alcanzaron niveles de alerta entre la población.

La laminación de la crecida aguas arriba de Zaragoza no supuso un riesgo para la población de la ciudad aunque sí se inundaron garajes subterráneos en las zonas más próximas al cauce, sobre todo en la margen izquierda, por la elevación del nivel freático. También se inundaron instalaciones deportivas y recreativas.

Otra de las consecuencias de la crecida fue el impacto social y en los medios de comunicación por la gestión de la misma. La ruptura de motas aguas arriba de Zaragoza fue muy criticada desde las poblaciones ribereñas, porque la magnitud de la crecida no fue como la de 2003 y se achacó la ruptura de los diques a la salvaguarda del meandro de Ranillas, enclave de la Exposición Internacional Zaragoza 2008. Ello no hizo sino reavivar el enfrentamiento medio rural-medio urbano, solicitando los alcaldes de las poblaciones ribereñas otro tipo de medidas o compensaciones en caso de tener que inundar sus huertas para salvar el recinto y el evento de la Exposición. Desde estos sectores se seguía demandando una mayor limpieza del río, dragados y recrecimiento de motas.

Desde el punto de vista de la gestión hidrológica, la buena coordinación entre el organismo de cuenca (Confederación Hidrológica del Ebro) y el de predicción meteorológica (AEMET), se materializó en un equipo conjunto de gestión de crisis que, con la información más detallada disponible, permitió gestionar la red y sus embalses de manera que no coincidiesen las puntas de crecida de los afluentes más importantes con las del colector principal, mitigando así los efectos de la crecida en el Ebro medio (Requena *et al.*, 2008).

En respuesta al impacto social de la crecida extraordinaria de febrero de 2003, la Consejería de Medio Ambiente del Gobierno de Aragón promovió el Plan Medioambiental del Ebro, conformado por un conjunto de estudios detallados y cuyas propuestas no se han puesto en práctica. A raíz de la crecida de abril de 2007, la Confederación Hidrográfica del Ebro ha constituido una comisión técnica para el estudio de dos medidas fundamentales:

- a) Permeabilización de motas con compuertas, logrando áreas de inundación controlada con una capacidad de 53 hm³ aguas arriba de Zaragoza (desde Novillas) en la crecida de 10 años. Esta medida se debate con la posibilidad de demoler las motas que protegen de la inundación de 10 años y establecer un nuevo cordón de diques continuos en el límite de la crecida de 25 años.

- b) Cauces de alivio, canales secundarios de aguas altas cuyo objetivo sería reducir la energía de la corriente en crecida y aumentar la capacidad de desagüe frente a los 6 núcleos de población con mayor riesgo: Novillas, Pradilla, Boquiñeni, Alcalá, Cabañas y Pina.

Una solución clave para la problemática expuesta puede ser la consecución de un Territorio de Movilidad Fluvial de suficiente anchura y continuidad para garantizar la conservación y mejora del río y sus riberas, la ordenación de áreas inundables, la minimización de riesgos y la plurifuncionalidad y desarrollo sostenible en el espacio inundable (Ollero, 2007). Este Territorio de Movilidad Fluvial se planteó como objetivo fundamental en el Plan Medioambiental del Ebro, implicando la retirada de defensas de margen y el retroceso de las motas. La conveniencia de revisar el actual sistema de defensa y la necesidad de definir ese Territorio Fluvial han quedado de manifiesto en la pequeña crecida acontecida en junio de 2008, en la que hubo de procederse de nuevo a la ruptura de motas aguas arriba de Zaragoza para reducir la punta de caudal y resguardar así el recinto de la Exposición Internacional sólo unos días antes de su inauguración (Espejo, 2008c)

A raíz de la crecida de marzo-abril de 2007 y de la aprobación pocos meses después de la Directiva 2007/60/CE, la Confederación Hidrográfica del Ebro ha puesto en marcha un sistema de información territorial (SITEbro) de consulta pública en internet. En el mismo se incluye una detallada cartografía de espacios inundables para diferentes periodos de retorno, tanto para el Ebro aguas arriba de Zaragoza como para algunos de sus principales afluentes. Dicha cartografía se ha realizado a partir de tecnología LIDAR y está previsto que se complete para toda la cuenca en 2011.

VII. LA CRECIDA DE 2007 EN EL CONTEXTO DE LAS CRECIDAS RECIENTES DEL EBRO

La situación atmosférica que produjo la crecida del Ebro de marzo-abril de 2007 presenta unas características interesantes y diferentes de otras crecidas recientes. Entre las primeras que cabe mencionar figuran su duración y su complejidad. Se trata de una situación larga, de unas tres semanas de duración y con diferentes fases, que afectó de manera distinta a unas y otras partes de la Cuenca. En este sentido, esta situación de crecida representa un estado mixto dentro de la clasificación establecida para las crecidas según sus causas atmosféricas (Espejo, 2008b) en crecidas invernales, equinocciales y estivales.

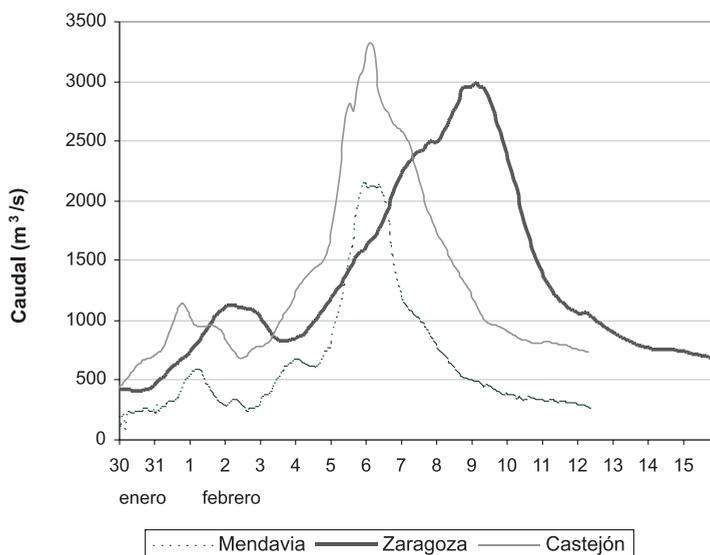
La primera fase de esta situación es perfectamente homologable a una crecida invernal, y por lo tanto es muy parecida a crecidas como la de 2003 (Ollero *et al.*, 2004b), aunque la tercera fase de la misma se puede clasificar como una situación de crecida equinoccial, ya que afectó sobre todo a áreas de la banda central de la cuenca y su génesis estuvo producida por una marcada circulación ciclónica. No obstante, las situaciones de crecida equinoccial pueden subdividirse en primaverales —que suelen tener más incidencia en las zonas más occidentales de la cuenca— y otoñales —que se suelen presentar en los ámbitos más orientales de la misma—. La tercera fase de esta situación tuvo, lógicamente, una fuerte componente primaveral y afectó en buena medida a las cuencas navarras y del Pirineo aragonés occidental (Figura 9) La segunda fase de este episodio, intermedia, vino a ser una especie de transición entre ambas fases «invernal» y «equinoccial». Esta complejidad produjo interacciones

y sinergias, de manera que elementos como la fusión nival a lo largo del resto de las fases de buena parte de las precipitaciones producidas durante la primera fase de la situación, añadida a las precipitaciones en forma líquida que se continuaban produciendo particularmente en las zonas mencionadas de Navarra y el noroeste de Aragón, coadyuvasen a la aparición de unas puntas de crecida mucho mayores en el Ebro medio.

La del 2007 junto a la de febrero de 2003 (Figura 11) constituyen las crecidas del Ebro más significativas de comienzos del siglo XXI. El caudal punta de la crecida de 2003 multiplicó por 12 el módulo en el aforo de Zaragoza, mientras que el de la crecida de 2007, lo hizo por 10. La diferencia entre los caudales punta de los eventos de 2003 y 2007 se cifra en unos 500 m³/s en Castejón y aproximadamente 700 m³/s en Zaragoza, siempre a favor del primero. La pérdida de caudal entre ambas poblaciones fue de algo más de 300 m³/s en 2003 (aproximadamente un 10% del caudal pico en Castejón) y de unos 550 m³/s en 2007 (en torno al 20% del caudal pico de Castejón). La onda de avenida de 2003 fue algo más lenta: 72 horas entre Castejón y Zaragoza, por 60 horas en 2007.

La crecida de 2007 anegó la mitad de superficie que la de 2003. Sin embargo, se rompieron más defensas, muchas de ellas de forma artificial para reducir el nivel en Zaragoza, como ya se ha comentado. De hecho, la inundación de 2007 fue desde el cauce menor y a través de las defensas, mientras en 2003 se anegaron muchos terrenos alejados del cauce menor, desde el freático, precisamente porque se rompieron pocas defensas y el caudal «se inyectó» en el acuífero (Ollero, 2007b).

Figura 11.
HIDROGRAMA DE LA CRECIDA DE FEBRERO DE 2003.



Fuente: SAIH-Ebro. Elaboración propia.

La crecida que experimentó el Ebro en el episodio de marzo-abril de 2007 puede calificarse de ordinaria y no se trata de una de las más significativas de los siglos XX y XXI. La periodicidad con la que se pueden repetir crecidas de este tipo es elevada tal y como se demuestra a continuación.

Se han calculado los caudales esperados de punta de crecida para diferentes periodos de retorno utilizando el ajuste estadístico de Gumbel a las siguientes series de datos de máximos instantáneos anuales: Miranda (56 años, desde 1946), Mendavia (51 años desde 1950), Castejón (58 años desde 1948) y Zaragoza (62 años de la serie completa 1943-2007) (Tabla 2). La distribución de Gumbel calcula la probabilidad (P) de que un valor extremo sea inferior a un cierto valor (x). Así, $1-p$ es la probabilidad de que un valor extremo sea superior a x , mientras que $T_x = 1/(1-p)$ es el número de años necesario para que el valor máximo alcanzado iguale o supere el valor x una sola vez. T_x es el período de retorno del valor x (Gumbel, 1941).

Tabla 2.
CAUDALES (M³/S) ESPERADOS PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO YAFOROS.

| | 2 años | 5 años | 10 años | 25 años | 50 años | 75 años | 100 años | 500 años |
|----------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|
| Miranda | 634,3 | 987,3 | 1221,0 | 1516,2 | 1735,2 | 1862,6 | 1952,7 | 2455,1 |
| Mendavia | 852,5 | 1166,2 | 1373,9 | 1636,3 | 1830,9 | 1944,1 | 2024,2 | 2470,7 |
| Castejón | 1950,8 | 2767,8 | 3308,7 | 3992,1 | 4499,1 | 4793,8 | 5002,4 | 6165,3 |
| Zaragoza | 1762,2 | 2435,1 | 2880,6 | 3443,5 | 3861,0 | 4103,7 | 4275,5 | 5233,2 |

Fuente: Elaboración propia.

Al caudal del tercer pico de crecida, que corresponde al mayor de los tres registrados en el episodio de marzo-abril de 2007, puede asignársele un periodo de retorno de 2,5 años en Mendavia, 5,6 en Castejón y 4,1 en Zaragoza. La crecida de 2003, que sí se calificó como extraordinaria alcanzó un periodo de retorno de 9,5 años en Castejón y 12 en Zaragoza (Ollero, 2007b).

VIII. CONCLUSIONES

El análisis de este evento hidrometeorológico ha puesto de manifiesto las enormes opciones de seguimiento existentes actualmente, tanto para el componente meteorológico, a nivel de datos e imágenes, como para el hidrológico, con registros de aforo en tiempo real. Ello permite establecer y analizar con detalle la relación causa-efecto entre ambos componentes. Aunque estos procesos no suelen despertar tanto interés público y científico como los de tipo *flash-flood*, el estudio detallado de una crecida en una cuenca extensa con una llanura de inundación amplia también aporta datos relevantes para el conocimiento de la dinámica natural del sistema, útiles para la gestión y ordenación del territorio.

Con un periodo de retorno entre 4 y 5 años en el Ebro medio, la crecida de marzo-abril de 2007 no fue relevante por su volumen si no por su larga duración y complejidad hidrometeorológica, que hace de esta crecida un buen ejemplo para mostrar el funcionamiento de este tipo de procesos en cuencas fluviales extensas.

La situación atmosférica que produjo la crecida presentó gran variabilidad espacio temporal, de manera que procesos como la innivación en diferentes ámbitos de la cuenca, la distinta respuesta de éstos a las advecciones cálidas, a la subsiguiente fusión nival y al cambio de fase sólida a líquida de las precipitaciones, imprimieron características especialmente interesantes a este proceso de crecida. Éstas se manifiestan especialmente en las tres fases de la situación meteorológica que dieron lugar a los tres picos de caudal, resultando el principal el último de ellos, cuando todos los factores anteriormente mencionados actuaron sinérgicamente.

La superficie inundada en el curso medio del Ebro solamente alcanzó la mitad de la registrada en la crecida de 2003, aunque supuso una mayor ruptura de defensas, ya que fundamentalmente actuó el flujo superficial frente al papel del freático, a diferencia de lo acaecido en 2003. No obstante, la superficie anegada en 2007 sigue siendo importante aun tratándose de una crecida ordinaria, lo cual confirma la relevancia del Ebro medio como territorio-riesgo.

El desarrollo de esta crecida ha puesto de manifiesto la acertada gestión combinada por parte de los organismos de cuenca y los meteorológicos, a través de herramientas de predicción y seguimiento. Demostrada esta capacidad de gestión y comprobada la bondad de la laminación en la propia llanura de inundación, parece el momento propicio para adoptar medidas como el retroceso de las defensas, allí donde la protección afecta exclusivamente a bienes y no a personas, y la creación de cauces de alivio, teniendo siempre en el horizonte la perspectiva del Territorio de Movilidad Fluvial que permite a los ríos mantener su dinamismo y diversidad ecológica.

BIBLIOGRAFÍA

- ANQUETIN, S.; YATES, E.; DUCROCQ, V.; SAMOULLAN, S.; CHANCIBAUT, K.; DAVOLIO, S.; ACCADIA, C. y CASAIOLI, M. (2005): «The 8 and 9 September 2002 flash flood event in France: a model intercomparison». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, nº 5, 741-754.
- ARNAUD-FASSETTA, G.; COSSART, E. y FORT, M. (2005): «Hydro-geomorphic hazards and impact of man-made structures during the catastrophic flood of June 2000 in the Upper Guil catchment (Queyras, Southern French Alps)». *Geomorphology*, nº 66, 41-67.
- AYALA-CARCEDO, F. J. (2002): «La inundación torrencial catastrófica del camping «Las Nieves» del 7 de Agosto de 1996 en el cono de deyección del Arás (Biescas, Pirineo Aragonés)» en *Riesgos Naturales* (Ayala-Carcedo, F. J. y Olcina Cantos, J., coords.). Barcelona, Edit. Ariel Ciencia, 1ª ed., 889-912.
- BESCÓS, A. (2003): *Las inundaciones en el río Arga: estudio hidrogeomorfológico*. Tesis doctoral. Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá.
- BESCÓS, A. y CAMARASA, A. M. (2004): «La creciente ocupación antrópica del espacio inundable y el aumento de la vulnerabilidad en las poblaciones del bajo Arga (Navarra)». *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, nº 37, 101-117.

- BURNASH, R.J.C. (1995): «The NWS River Forecast System-Catchment Modelling» en *Computer Models of Watershed Hydrology* (Singh, V.P., Ed.). Water Resources Publications, 311-366.
- CAMARASA, A.M. y BESCÓS, A. (2004): «Cartografía de áreas inundables: comparación entre mapas de peligro y mapas de inundaciones concretas» en *Riesgos Naturales y antrópicos en Geomorfología* (Benito, G. y Díez Herrero, A., Eds.). Madrid, Actas de la VIII Reunión Nacional de Geomorfología, SEG y CSIC, 25-36.
- CARMONA, P. y RUIZ PÉREZ, J.M. (2000): «Las inundaciones de los ríos Júcar y Turia». *Serie Geográfica*, nº 9, 49-69.
- DEL RÍO, P. (1998): *Cadena operativa del Sistema de Análisis y Predicción HIRLAM-INM*. Madrid, Servicio de Modelización Numérica del Tiempo, Instituto Nacional de Meteorología, Nota Técnica nº 56.
- DEL VALLE, J. (2002): «Las intensas lluvias y riadas del 23 al 25 de octubre de 2000 en el SE de la cuenca del Ebro. Seguimiento y gestión mediante el S.A.I.H. de la C.H.E» en *La información climática como herramienta de gestión ambiental* (Cuadrat, J.M.; Vicente, S.M. y Saz, M.A., Eds.). Albarracín, VII Reunión Nacional de Climatología, Universidad de Zaragoza, 93-98.
- DÍEZ HERRERO, A. (2001): *Geomorfología e hidrología fluvial del río Alberche: modelos y S.I.G. para la gestión de riberas*. Tesis Doctoral. Departamento de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid.
- DÍEZ HERRERO, A. y PÉREZ GUERRERO, J. A. (2003): *Los SIGs en el Plan de Protección Civil de Ámbito Local ante el riesgo de inundaciones de Navaluenga (Ávila, España)*. Madrid, Seminario Euromediterráneo sobre Nuevas Tecnologías Aplicadas a la Gestión de Desastres, Dirección Gral. Protección Civil (Ministerio del Interior). 6 al 8 de Octubre de 2003. Comunicación Oral, 11 págs.
- DÍEZ HERRERO, A.; LAÍN, L. y LLORENTE, M. (2006): *Mapas de peligrosidad de avenidas e inundaciones. Métodos, experiencias y aplicación*. Madrid, Instituto Geológico y Minero de España, Serie Medio Ambiente, Riesgos Geológicos nº 7, 230 pp.
- DOMENECH, S. (2006): *Evaluación del riesgo de inundación del barranco Santa Bárbara-Depósitos ligado a precipitaciones extremas en Tauste (Zaragoza): caracteres y actuaciones*. Proyecto Fin de Carrera, Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza.
- DOMENECH, S. (2008): *Cartografía de peligrosidad de inundaciones: aplicación de una metodología al barranco Lierde (Villanúa, Huesca)*. Trabajo de investigación de doctorado. Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza.
- ESPEJO, F. (2007): *Estudio de la fase atmosférica de situaciones de inundación en la Cuenca del Ebro: 1960-2007*. Trabajo de investigación de doctorado. Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza.
- ESPEJO, F. (2008a): Cincuenta años de crecidas fluviales en la cuenca del Ebro: estudio de su fase atmosférica y clasificación. *XXX Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española*, Zaragoza.
- ESPEJO, F. (2008b): «Hacia una tipología de inundaciones en la Cuenca del Ebro en función de sus causas atmosféricas». *Geographicalia* (en prensa).

- ESPEJO, F. (2008c): «Mayo de 2008, un mes destacable en el nordeste peninsular». *Boletín de la Asociación Meteorológica Española* n° 21, 29-31.
- GARCÍA RUIZ, J. M.; WHITE, S.; MARTÍ-BONO, C.; VALERO, B.; ERREA, M.P. y GÓMEZ VILLAR, A. (1996): *La catástrofe del barranco de Arás (Biescas, Pirineo Aragonés) y su contexto espacio-temporal*. Zaragoza, Instituto Pirenaico de Ecología, 54 pp.
- GAUME, E.; LIVET, M.; DESBORDES, M. y VILLENEUVE, J.P. (2004): «Hydrological analysis of the river Aude, France, flash flood on 12 and 13 November 1999». *Journal of Hydrology*, n° 286, 135-154.
- GUMBEL, E. J. (1941): «The return period of flood flows». *Ann. Math. Stats*, Vol. 12, n° 2, 163-190.
- HORCAJADA, T.; SIMANCAS, M.R. y DORTA, P. (2000): «La constatación y validación de los mapas de riesgo de avenidas en pequeñas cuencas hidrográficas mediante Sistemas de Información Geográfica. Propuesta metodológica y aplicación a la ordenación del territorio». *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, n° 30, 135-154.
- HUNTER, N.M.; BATES, P.D.; HORRITT, M. S. y WILSON, M.S. (2007): «Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review». *Geomorphology*, n° 90, 208-225.
- IBISATE, A. (2004): *Las crecidas fluviales en el Zadorra: procesos, riesgos y propuestas de ordenación*. Tesis doctoral. Dpto. de Geografía, Prehistoria y Arqueología, Universidad del País Vasco, Vitoria-Gasteiz.
- IBISATE, A.; OLLERO, A. y ORMAETXEA, O. (2000): «Las inundaciones en la vertiente cantábrica del País Vasco en los últimos veinte años: principales eventos, consecuencias territoriales y sistemas de prevención». *Serie Geográfica*, n° 9, 177-186.
- KREIBICH, H.; THIEKEN, A.H.; PETROW, TH.; MÜLLER, M. y MERZ, B. (2005): «Flood loss reduction of private households due to building precautionary measures – lessons learned from the Elbe flood in August 2002». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, n° 5, 117-126.
- LINARES, A. (2006): El SAIH-Ebro: un sistema de información y ayuda a la decisión para la previsión de avenidas y gestión de los recursos hidráulicos de la cuenca hidrográfica del río Ebro (España). *V Congreso Ibérico Gestión y Planificación del Agua*, Faro (Portugal).
- LOSADA, J.A.; MONTESINOS, S.; OMEDAS, M.; GARCÍA VERA, M.A. y GALVÁN, R. (2004): «Cartografía de las inundaciones del río Ebro en febrero de 2003: trabajos de fotointerpretación, teledetección y análisis SIG en el GIS-Ebro» en *Medio ambiente, recursos y riesgos naturales: análisis mediante tecnología SIG y teledetección* (Conesa, C.; Álvarez, Y. y Martínez, J.B., Eds.), Murcia, Asociación de Geógrafos Españoles y Universidad de Murcia, vol II, 207-218.
- NORBIATO, D.; BORGA, M.; SANGATI, M. y ZANON, F. (2007): «Regional frequency analysis of extreme precipitation in the eastern Italian Alps and the August 29, 2003 flash flood». *Journal of Hydrology*, n° 345, 149-166.
- OGDEN, F.L.; SHARIF, H.O.; SENARATH, S.U.S.; SMITH, J.A.; BAECK, M.L. y RICHARDSON, J.R. (2000): «Hydrologic analysis of the Fort Collins, Colorado, flash flood of 1997». *Journal of Hydrology*, n° 228, 82-100.

- OLLERO, A. (1992): *Los meandros libres del Ebro medio (Logroño-La Zaida): geomorfología fluvial, ecogeografía y riesgos*. Tesis doctoral. Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza.
- OLLERO, A. (2000): Las riberas del Ebro medio: diagnosis y ordenación de un paisaje fluvial amenazado. *II Congreso Ibérico sobre Planificación y Gestión de Aguas*, Oporto (Portugal), 139-150.
- OLLERO, A. (2007a): *Territorio fluvial. Diagnóstico y propuesta para la gestión ambiental y de riesgos en el Ebro y los cursos bajos de sus afluentes*. Bilbao, Bakeaz y Fundación Nueva Cultura del Agua, 255 pp.
- OLLERO, A. (2007b): «La avenida del río Ebro en 2003. Medidas para la reducción de daños. Gestión de la ribera» en *Ingeniería fluvial. Aspectos técnicos y medioambientales* (Martín Vide, J.P., Ed.). Barcelona, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, 247-265.
- OLLERO, A.; SÁNCHEZ FABRE, M. y DEL VALLE, J. (2004a): «Problemática actual del corredor ribereño del Ebro aragonés en su curso de meandros libres» en *Geografía Física de Aragón. Aspectos generales y temáticos* (Peña, J.L.; Longares, L.A. y Sánchez Fabre, M., Eds.). Zaragoza, Universidad de Zaragoza, 253-263.
- OLLERO, A.; PELLICER, F. y SÁNCHEZ FABRE, M. (2004b): «La crecida de febrero de 2003 en el curso medio del Ebro: análisis de su evolución espacio-temporal» en *Aportaciones geográficas en homenaje al Profesor Antonio Higuera Arnal* (Faus, M.C., Coord.). Zaragoza, Universidad de Zaragoza, 143-55.
- RABUFFETTI, D. y MILELLI, M. (2005): «The hydro-meteorological chain in Piemonte region, NorthWestern Italy – analysis of the HYDROPTIMET test cases». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, nº 5, 845–852.
- RATTO, S.; BONETTO, F. y COMOGLIO, C. (2003): «The October 2000 flooding in Valle d'Aosta (Italy): event description and land planning measures for the risk mitigation». *International Journal of River Basin Management*, Vol. 1, nº 1, 105-116.
- REBORA, N.; FERRARIS, L.; VON HARDENBERG, J. y PROVENZALE, A. (2006): «Rainfall downscaling and flood forecasting: a case study in the Mediterranean area». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, nº 6, 611-619.
- REQUENA, R.; ESPEJO, F.; DESENTRE, A. y ÁLVAREZ, E. (2008): «Apoyo meteorológico a la gestión hidrológica de las crecidas del Río Ebro de marzo y abril de 2007». *Boletín de la Asociación Meteorológica Española*, nº 20, 20-23.
- RIOSALIDO, R.; FERRAZ, J.; ÁLVAREZ, E.; CANSADO, A.; MARTÍN, F.; ELIZAGA, F.; MARTÍN, A.; CAMACHO, J.L. y MESTRE, A. (1998): *Estudio meteorológico de la situación del 7 de agosto de 1996 (Biescas)*. Madrid, Instituto Nacional de Meteorología, 90 pp.
- ROMERO, A. y MAURANDI, A. (2000): «Las inundaciones en la cuenca del Segura en las dos últimas décadas del siglo XX. Actuaciones de prevención». *Serie Geográfica*, nº 9, 93-120.
- SUTHEO, L.; BÁLINT, G. y SZLÁVIK, L. (2003): «Prediction of extreme flood in August 2002 along the upper-Danube in Hungary». *Geophysical Research Abstracts*. European Geophysical Society, Vol. 5, 14563.
- UREÑA, J.M. y OLLERO, A. (2001): «Fluvial landscapes, catchment administration and land-use planning: experience based on two rivers in Spain». *Landscape Research*, 26, nº 3, 225-243.
- VALLEJO, I. (2000): «Las inundaciones en la cuenca del Guadalquivir». *Serie Geográfica*, nº 9, 133-149.