

HACIA UNA TIPOLOGÍA DE INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL EBRO EN FUNCIÓN DE SUS CAUSAS ATMOSFÉRICAS*

Francisco S. Espejo Gil

Agencia Estatal de Meteorología. Delegación Territorial en Aragón.
Paseo del Canal, 17. 50071 Zaragoza
pespejo@inm.es

Resumen: La Cuenca del Ebro es un territorio muy variado en sus rasgos climáticos y de relieve y, por ello, las situaciones de inundación que la afectan presentan un grado similar de diversidad. El estudio sistemático de la fase atmosférica de situaciones de inundación en la cuenca a lo largo de los últimos 50 años permite abordar la tarea de realizar una clasificación de las mismas según sus causas atmosféricas. A través de una selección de episodios y de su estudio homogéneo, mediante el uso de modelos numéricos de reanálisis para la atmósfera y técnicas de interpolación y representación gráfica modernas, se ha podido realizar un análisis de estas situaciones independiente de los medios técnicos de cada momento y se ha arrojado luz sobre las causas atmosféricas que las produjeron, permitiendo establecer analogías y por tanto esbozar clasificaciones según criterios como la estacionalidad, el tipo y dinamismo de la situación atmosférica o los diferentes ámbitos en los que se presentan dentro de la cuenca, estudiando además las relaciones entre ellas.

Palabras clave: Cuenca del Ebro, inundación, atmósfera, climatología sinóptica, tipología de inundaciones.

Abstract: The Ebro Basin is a greatly varied environment from both a climatic and a topographic point of view. Therefore, the flood situations affecting it show a similar degree of diversity. The systematic study of the atmospheric phase of flood situations in the basin over the last 50 years allows us to tackle a classification of these situations according to their atmospheric causes. An analysis of a selection of episodes studied homogeneously by means of modern weather numerical models for reanalysis as well as interpolation and graphical represen-

* Recibido: 15-11-07. Aceptado: 23-12-07.

tation techniques has been made. This study, independent of the technical means at the time of each situation, has cast light on the atmospheric causes behind them. It has allowed us to establish some analogies and, therefore, to make draft classifications according to criteria such as seasonality, type and dynamism of the atmospheric situation, or the different areas affected within the basin. The relationships among these classifications have been studied as well.

Keywords: Ebro Basin, flood, atmosphere, synoptic climatology, flood typology.

1. Introducción

El creciente interés por los temas ambientales relacionados con el agua, cuya gestión comienza a abordarse desde otras perspectivas diferentes a la de la mera maximización de la disponibilidad del recurso -que, sin embargo, sigue siendo la principal-, permite contemplar los procesos de crecida como algo propio de la dinámica fluvial (Ollero, 2007). Sin embargo, éstos atraen el interés general y de los investigadores principalmente por sus consecuencias sobre las personas y los bienes, lo cual está justificado porque se trata del riesgo natural que más trasciende en España, el que más daños económicos causa (C.C.S., 2006) y el segundo por daños personales (Ayala-Carcedo *et al.*, 2003).

En la Cuenca del Ebro se está concediendo mucho interés a todos los temas relacionados con el agua (Embid *et al.*, 2006) y es además un entorno variado y complejo donde se producen crecidas fluviales de distinto tipo y extensión, alguna de las cuales está muy reciente en el tiempo. Asimismo, se trata de una cuenca que dispone de un sistema de gestión hidrológica muy avanzado que permite en buena medida la gestión antrópica de dichos procesos naturales. Por todo ello, el estudio sistemático de las crecidas en la Cuenca del Ebro, específicamente de los procesos atmosféricos que las producen, es un tema que se inserta en esta corriente que se aborda desde una perspectiva cada vez más multidisciplinar y que puede resultar interesante para generar conocimiento por sí mismo y para su aplicación en otras materias puramente científicas o aplicadas a la gestión.

Existen diversos enfoques para el tema de las crecidas fluviales. En sus diferentes escalas espaciales y temporales, desde una crecida relámpago localizada hasta una crecida en una cuenca extensa y su subsiguiente inundación, el tema presenta interés para diversas disciplinas científicas y ha sido comúnmente abordado desde la Geografía, la Hidrología o la Meteorología. La propia definición de crecida presenta diferencias según sea el ámbito de aplicación desde el que ésta provenga. Así, hay

diferentes definiciones y parámetros de evaluación para las crecidas fluviales (W.M.O., 1969; Díez, 2002). Este trabajo va a dejar deliberadamente un cierto grado de indefinición sobre el término “crecida” puesto que, como se verá posteriormente al enumerar los objetivos del mismo, interesará abarcar la mayor diversidad posible de procesos de crecida fluvial sobre la totalidad de los cursos de la cuenca. De este modo, las situaciones de crecida consideradas procederán de las así consideradas por el organismo de cuenca, la bibliografía existente o el Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas.

2. Área de estudio

La Cuenca del Ebro, con 85001 Km² de superficie, ocupa el 14 % de la superficie de la Península Ibérica, siendo por extensión su segunda cuenca-vertiente –la mayor si se considera únicamente el territorio español– y a su vez una de las más importantes de la cuenca mediterránea (Tabla 1). Un porcentaje inmensamente mayoritario de su superficie se localiza en España, pero también cubre la práctica totalidad de Andorra y, en la cabecera del Segre, partes de la Cerdaña francesa. El sistema fluvial del río Ebro es el más complejo de entre los peninsulares y el colector principal es su río más caudaloso. La complejidad de la cuenca se debe tanto a factores orográficos como climatológicos. Su antigua condición de mar interior (Pellicer *et al.*, 1989) supone que en la actualidad esté conformada por una depresión rodeada por sistemas montañosos de diverso tipo (Mapa 1): al norte, las cadenas alpinas de los Pirineos y la Cordillera Cantábrica, en general de elevadas altitudes. Al suroeste el Sistema Ibérico, mezcla del reborde de la Meseta peninsular con las cadenas montañosas resultantes de la posterior orogenia alpina, y al este la Cordillera Costero-Catalana, con un origen complejo y un relieve de menor potencia pero suficiente para restringir gran parte de la influencia mediterránea directa hacia el interior de la cuenca.

La posición de la Península Ibérica, a caballo entre la zona de las perturbaciones extratropicales originadas por el frente polar y el dominio subtropical marcado por el Anticiclón de las Azores, el Mar Mediterráneo y la proximidad al norte de África, le proporciona una condición de zona fronteriza entre dominios climáticos, con gran variabilidad espacial y temporal, inter e intraanual (Martín Vide *et al.*, 2001). La condición de depresión rodeada por montañas de la cuenca, cada una de ellas con sus características particulares, viene a otorgar a los aspectos climáticos y a la morfología y comportamiento de la red fluvial un grado adicional de complejidad. Esta complejidad y diversidad se pone de manifiesto, entre otras formas, en las situaciones meteorológicas que producen inundaciones en la Cuenca del Ebro, que afectan a distintos ámbitos de la misma y tienen diferentes orígenes.

Tabla 1. Principales cuencas fluviales de la cuenca mediterránea (incluyendo la del Mar Negro).

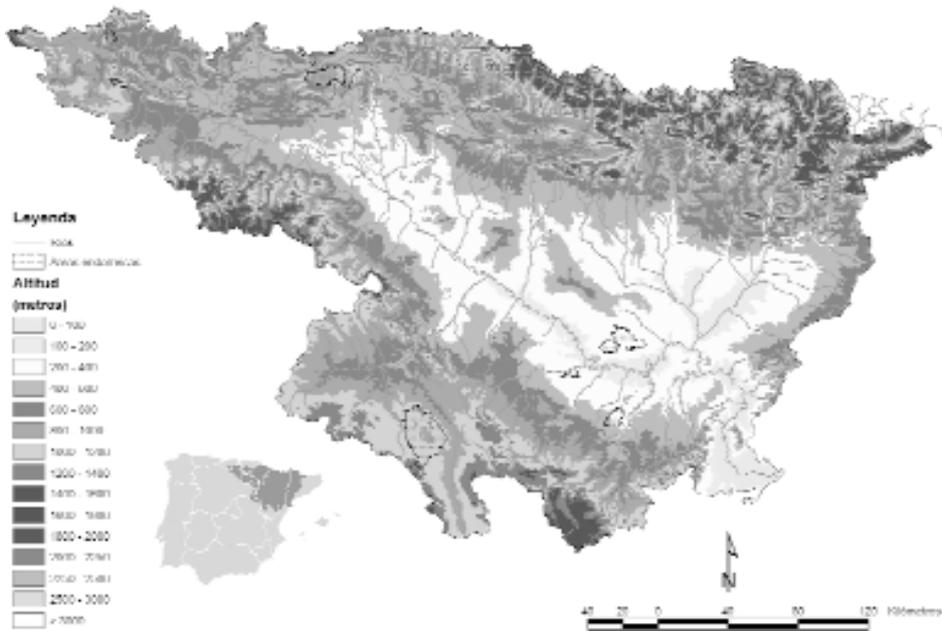
<i>Cuenca</i>	<i>Área de la cuenca (km²)</i>	<i>Longitud del colector principal (km)</i>	<i>Caudal medio cerca de la desembocadura (m³/s)</i>
Nilo	3035000	6695	1251
Danubio	817000	2850	6488
Dnieper	516300	2290	1670
Don	425600	1950	935
Ródano	95500	812	1693
Ebro	85001	982	483
Dniester	72100	1362	310
Po	71057	652	1515

Fuente: Elaboración propia.

Existen múltiples criterios para hacer subdivisiones de los ámbitos de la cuenca, ya por las características del curso principal (Ollero, 1996), por subcuencas, por unidades del relieve, etc. Para una caracterización somera de la misma y de sus cursos fluviales se va a proponer aquí otra, relacionada, como se puede comprobar más adelante, con las respuestas a las situaciones de inundación, que supone la división de la cuenca en dos sectores con la línea divisoria perpendicular al Ebro. El primero abarca la parte superior de la cuenca hasta el Moncayo, por el sur, y la cabecera del Gállego por el norte. El segundo es el paralelepípedo restante, comprendiendo las cuencas pirenaicas desde las del Gállego al Segre y las ibéricas desde la del Jalón hasta la del Matarraña.

3. Objetivos y antecedentes

El objetivo de este trabajo es abundar en el estudio de las situaciones atmosféricas que producen crecidas fluviales a través de un catálogo restringido a 22 situaciones en las que se ha pretendido representar la diversidad espacial y temporal, más que la gravedad, de las crecidas en los diferentes ámbitos de la Cuenca del Ebro. Los estudios hidrológicos de la cuenca, por ejemplo el de Davy (1975), de sectores parciales de la misma, como el de Ollero (1996) o de alguna de sus subcuencas, por ejemplo Marín (1987), cuentan con un capítulo dedicado a las crecidas en sus diferentes áreas de estudio. En estos capítulos normalmente se describen las situaciones atmosféricas que suelen dar origen a la tipología de crecidas que establecen o a las situaciones particulares que se consideran. Sin embargo, estas consideraciones suelen ser bastante superficiales y normalmente no incluyen ningún tipo de cartografía meteorológica que describa la situación referida. Igualmente, desde la meteorología y la



Mapa 1. Mapa físico de la Cuenca del Ebro (Elaboración propia).

climatología el estudio de las situaciones de crecida ha recibido una escasa atención, salvo trabajos parciales en este sentido (Ascaso, 1978; Frigola *et al.*, 2002) o estudios detallados de situaciones muy concretas (Riosalido *et al.*, 1998). El análisis de riesgos naturales suele trabajar el análisis de situaciones de inundación incluyendo sus causas meteorológicas, aunque tiene una gran tendencia a centrarse en las crecidas relámpago en la zona litoral y son escasos los trabajos que se refieren al ámbito de la Cuenca del Ebro, con las notables excepciones de las tesis doctorales de Bescós (2003) e Ibisate (2004) y artículos específicos como el de Ollero (2000).

4. Metodología

4.1. Fuentes de información

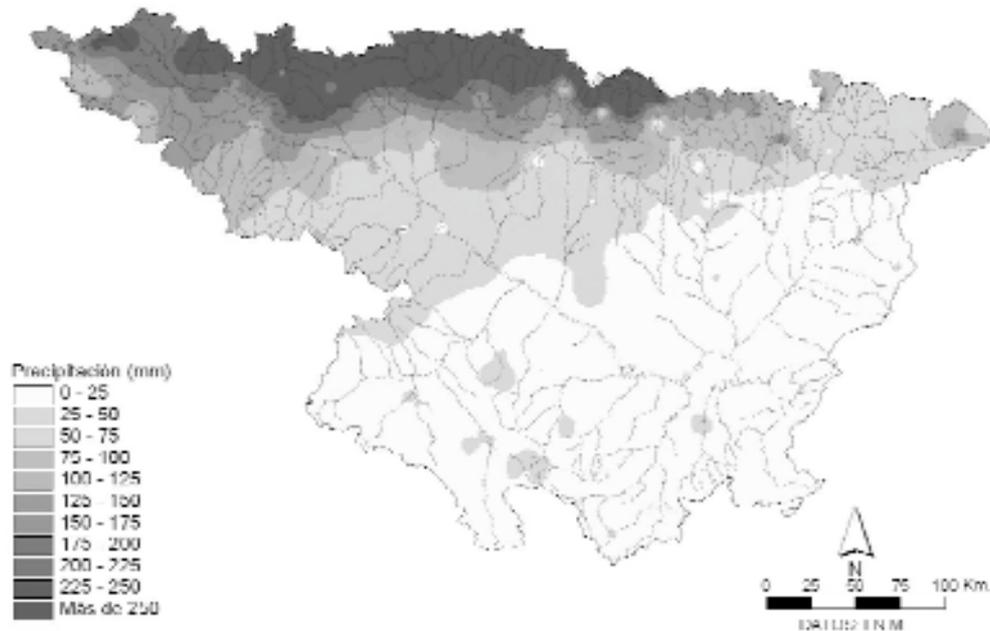
Dentro del catálogo de situaciones seleccionadas figuran las crecidas generales de la cuenca, que afectan al curso principal y a la mayoría de sus subcuencas, crecidas

locales y a menudo con bastante poca trascendencia como la de alguno de los afluentes ibéricos, o situaciones como la que dio lugar a la crecida relámpago que produjo la catástrofe del Camping Las Nieves en Biescas en agosto de 1996, que fue prácticamente irrelevante desde el punto de vista de la hidrología de la cuenca pero con enormes consecuencias humanas y repercusión social. Para la selección de las mismas se ha acudido a la bibliografía (Davy, 1975; Ascaso, 1978; Ollero, 1996, etc.), a las contempladas para la Cuenca del Ebro en el Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas (en realización) o al estudio de los hidrogramas de los puntos de medición de aforo de la Confederación Hidrográfica del Ebro (C.H.E.). Se ha procurado que el proceso de estudio de cada una de las situaciones sea lo más homogéneo posible a lo largo del tiempo, aunque elementos como la disponibilidad de imágenes de satélite (no existentes de forma sistemática antes de la década de 1980) o la evolución de los modelos numéricos de la atmósfera nos obliguen a introducir algunas modificaciones.

Los datos hidrológicos de los episodios proceden siempre de la red foronómica de la C.H.E. Para un área de estudio tan extensa y un periodo de tiempo tan dilatado normalmente el dato disponible con mayor facilidad será el caudal medio diario. Se utilizan de forma cualitativa para delimitar temporalmente los procesos de crecida en un punto de aforo, incluyendo en la medida de lo posible el o los máximos instantáneos para determinar cuantitativamente la intensidad del mismo, refiriendo en este caso el caudal máximo instantáneo en términos del módulo del cauce en ese punto de aforo.

Los datos de precipitación proceden de la red de observatorios del Instituto Nacional de Meteorología (I.N.M.). Estos datos comprenden los de la red principal y los de la red secundaria atendida por colaboradores altruistas. El uso de estos datos presenta la ventaja de una buena cobertura espacial del territorio, que en la práctica hace innecesario el uso de productos de otro tipo, como las acumulaciones radar, debido a la escala de trabajo (toda la cuenca) y a la homogeneidad de la información durante todo el ámbito temporal del trabajo, ya que los datos radar sólo están disponibles para algo más que la última década. Los datos de precipitación de la red de observación del I.N.M. presentan la limitación de la resolución temporal a 24 horas, las precipitaciones diarias, que se consignan de 07 horas solares del día anterior a las 07 horas solares del día de la fecha, aunque normalmente esta resolución es suficiente para la interpretación de procesos que, salvo en el caso de crecidas relámpago, suelen prolongarse durante varios días. Estos datos se integran en un SIG ArcView 3.2 para la obtención de cartografías de precipitación total para el episodio completo (Mapa 2) y para cada uno de los días que lo componen (Figura 1).

Para la representación del estado de la atmósfera en cada situación se han utilizado productos de análisis -integración de las observaciones para representar el



Mapa 2. Ejemplo de la cartografía generada: precipitaciones acumuladas en el episodio de inundación de diciembre 1960 a enero de 1961 (Elaboración propia).

estado de la atmósfera en el momento de las mismas- de modelos numéricos. Para las situaciones posteriores a 1996, del modelo operativo HIRLAM-INM 0.5 y para las anteriores a esa fecha las del modelo de reanálisis ERA-40 del Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio (CEPPM). La razón para hacerlo así es el obvio límite temporal en la disponibilidad de modelos numéricos para la atmósfera y la evolución su calidad. A partir de 1996 se estima que los productos de análisis del modelo operativo tienen buena calidad para representar las situaciones, mientras que para los episodios anteriores se dispone recientemente del modelo de reanálisis ERA-40, un producto que utiliza el archivo de observaciones desde septiembre de 1957 hasta agosto de 2002 para integrarlos en un modelo numérico moderno y obtener un análisis de situaciones pasadas que, probablemente, no tiene parangón en la actualidad (Uppala, 2005). El análisis de las situaciones meteorológicas obtenidas con estos productos permite el estudio de diferentes campos (presión, temperatura, humedad relativa, viento, vorticidad potencial) para diferentes niveles de la atmósfera a lo largo del tiempo. Ha sido necesario establecer un criterio para la limitación de la cantidad de información de campos de modelos numéricos por cada episodio que está relacionado con la duración del mismo y cuyo fin es disponer de una cantidad similar de información para cada uno de ellos.

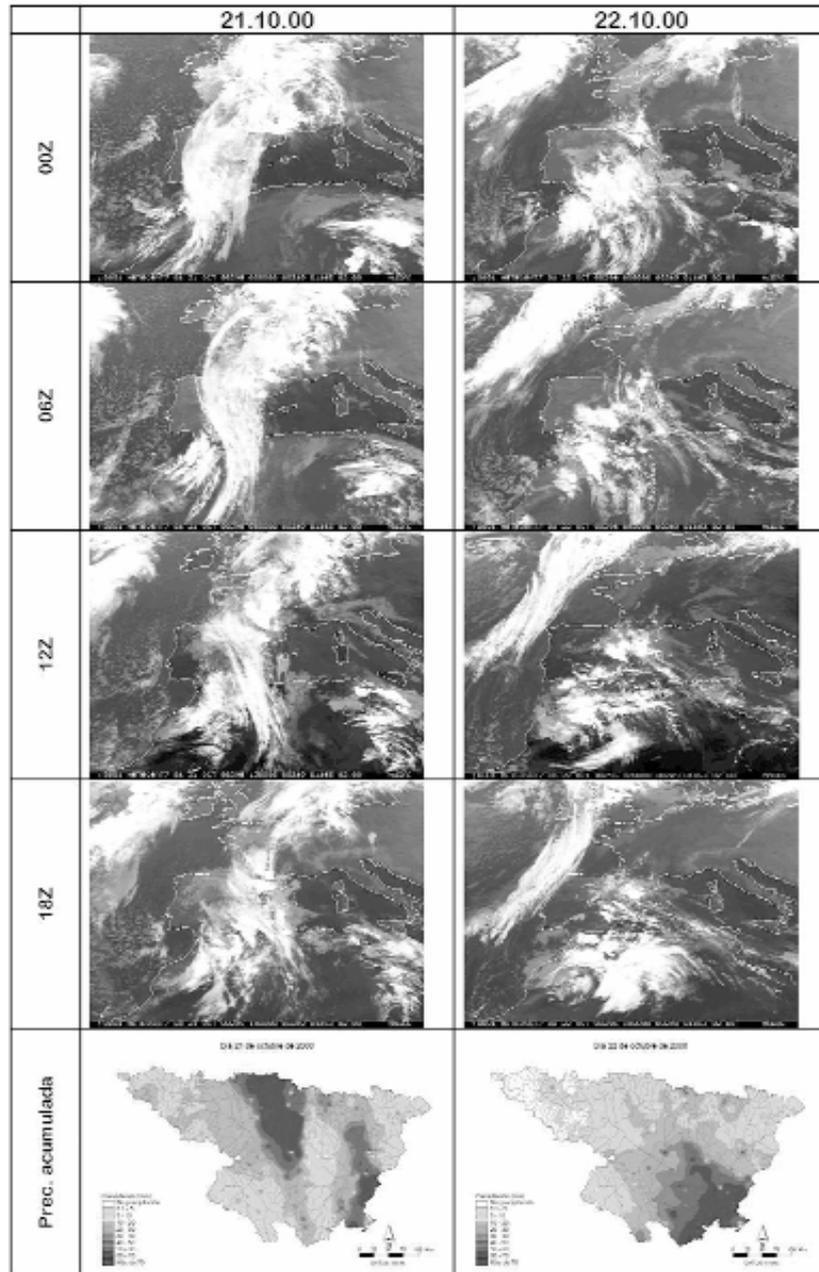


Figura 1. Ejemplo de descripción de una situación (octubre de 2000) mediante imágenes de satélite y mapas de precipitaciones acumuladas diarias. (Fuente: INM. Elaboración propia).

Otro elemento en el que la larga duración del periodo de estudio ha introducido una discontinuidad metodológica irresoluble es el de la disponibilidad de las imágenes de satélite, que permiten apreciar la evolución de las situaciones mediante la nubosidad asociada a sus sistemas (Figura 1). Se han utilizado imágenes de satélites geoestacionarios de la serie Meteosat, disponibles desde la década de 1980. La elección de un área similar y del mismo canal, el infrarrojo, permite la intercomparabilidad y la disponibilidad de las mismas independientemente de la hora del día. Las imágenes proceden del archivo del I.N.M y del servidor del National Climate Data Center del NOAA -especialmente las más antiguas-. En cuanto a la resolución temporal de las imágenes de satélite en principio se ha aplicado el mismo criterio que para los campos de modelos numéricos aunque de una manera flexible, de modo que el criterio para los campos de modelos será el mínimo y se incorporarán imágenes con un menor intervalo temporal si se considera necesario para explicar alguna característica de una situación particular.

4.2. Climatología sinóptica

Al ser éste, esencialmente, un trabajo de climatología sinóptica, se considera necesario explicar este concepto. Mientras que la climatología trata de los valores medios o extremos de los elementos del tiempo atmosférico en un lugar, como la temperatura, la precipitación, la presión, la insolación, etc., el concepto de climatología sinóptica incluye el estado medio de las situaciones atmosféricas en un área determinada (Barry *et al.*, 2001).

El término "sinóptico" aparece en climatología heredado de la meteorología, donde hace alusión a la representación conjunta de las observaciones simultáneas en lugares distintos que dio origen a los mapas del tiempo, o mapas sinópticos, para diferentes variables -típicamente la presión atmosférica-. El uso de estos mapas a escalas continentales derivó en el uso del término "sinóptico" para designar una escala de ciertos fenómenos meteorológicos, como las depresiones, anticiclones y sistemas frontales, que se presentan con unas dimensiones típicas de mil a dos mil kilómetros y una duración media de entre cinco y siete días. Así, la escala sinóptica se establece entre la hemisférica y la mesoscala (Orlanski, 1975). A su vez, la mesoscala se puede clasificar en otras subdivisiones: la meso- α , hasta unos 200 Km, la meso- β , entre 200 y 20 Km y la meso- γ , entre 20 y 2 Km (Fujita, 1986). Sin embargo, se suele entender, por extensión, por meteorología sinóptica la que estudia las situaciones atmosféricas -normalmente incluyendo la escala sinóptica y la mesoscala-. Nuestra área de estudio, la Cuenca del Ebro, requiere por tanto que el estudio de las situaciones atmosféricas que dan origen a crecidas, la climatología sinóptica de las situaciones de inundación, comience por su marco sinóptico y descienda posteriormente al nivel mesoscalar, que determina qué subcuenca es la afectada por un episodio de crecida en un episodio más localizado.

4.3. Campos meteorológicos considerados

Para la caracterización de las situaciones se han elegido una serie de niveles y de campos en cada uno de ellos (Figura 2). Los niveles elegidos son el de superficie y los geopotenciales de 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa y 300 hPa. Los dos primeros dan una idea de los niveles bajos de la troposfera (hasta unos 1500 m), los dos segundos, de los niveles medios y de la transición hacia los niveles altos (entre unos 3000 y 5500 m) y el último, de los niveles altos próximos a la tropopausa (alrededor de 9500 m). Además, son los niveles clásicos de referencia más comúnmente utilizados. Es necesario destacar que todos los campos considerados están orientados a un estudio de las situaciones a escala sinóptica y mesoscalar hasta la meso- α , reconociendo que las escalas menores necesitan de otros campos y modelos específicos.

En cada uno de estos niveles se han utilizado campos diferentes. En superficie, se incluyen campos de presión reducida al nivel del mar y de temperatura. El primero es útil tanto para expresar la configuración sinóptica en los niveles bajos como para intuir los flujos de viento dominantes. El segundo, en el contexto de este trabajo, permite distinguir de forma grosera entre la precipitación líquida y la sólida, así como delimitar la posición de las fronteras térmicas junto al suelo. En el nivel de 850 hPa se incluyen los campos de altura del geopotencial y de humedad relativa. La altura de geopotencial será un campo que se incluirá en todos los niveles de altura puesto que es básico para la interpretación de la situación de la atmósfera, pudiendo distinguirse en él los centros de alta y baja presión, las vaguadas y dorsales, las zonas de convergencia y divergencia, las áreas de deformación y los procesos de ciclogénesis, entre otros muchos. La humedad en 850 hPa caracteriza la masa de aire en niveles bajos y puede servir como indicador de la posición de las bandas nubosas en aquellas situaciones anteriores a la aparición de las imágenes de satélite, así como la presencia de capas secas que juegan un papel fundamental en el desencadenamiento de los procesos convectivos (Parsons *et al.*, 1998). En los niveles de 700 y 500 hPa se incluyen los campos de altura de geopotencial y de temperatura. La temperatura en 700 hPa puede ser de gran utilidad para estimar el nivel de la cota de nieve, ya que la altura media de este nivel en torno a los 3000 m permite, según la posición de las isothermas, estimar si las precipitaciones pueden ser de nieve o no en las zonas de montaña. En 500 hPa el campo de temperatura es fundamental para la identificación de embolsamientos de aire frío en altura que favorecen los procesos convectivos y que ayudan a identificar las depresiones aisladas en niveles altos (danas) –comúnmente conocidas como “gotas frías”– (Jansá, 2004).

El nivel del 300 hPa incluye los campos de altura de geopotencial y de viento (en los productos HIRLAM) o de vorticidad potencial (en los productos de ERA-40). Este nivel es fundamental para la identificación de las estructuras sinópticas próximas a la tropopausa, entre ellas las deformaciones del chorro polar causantes de la ciclogéne-

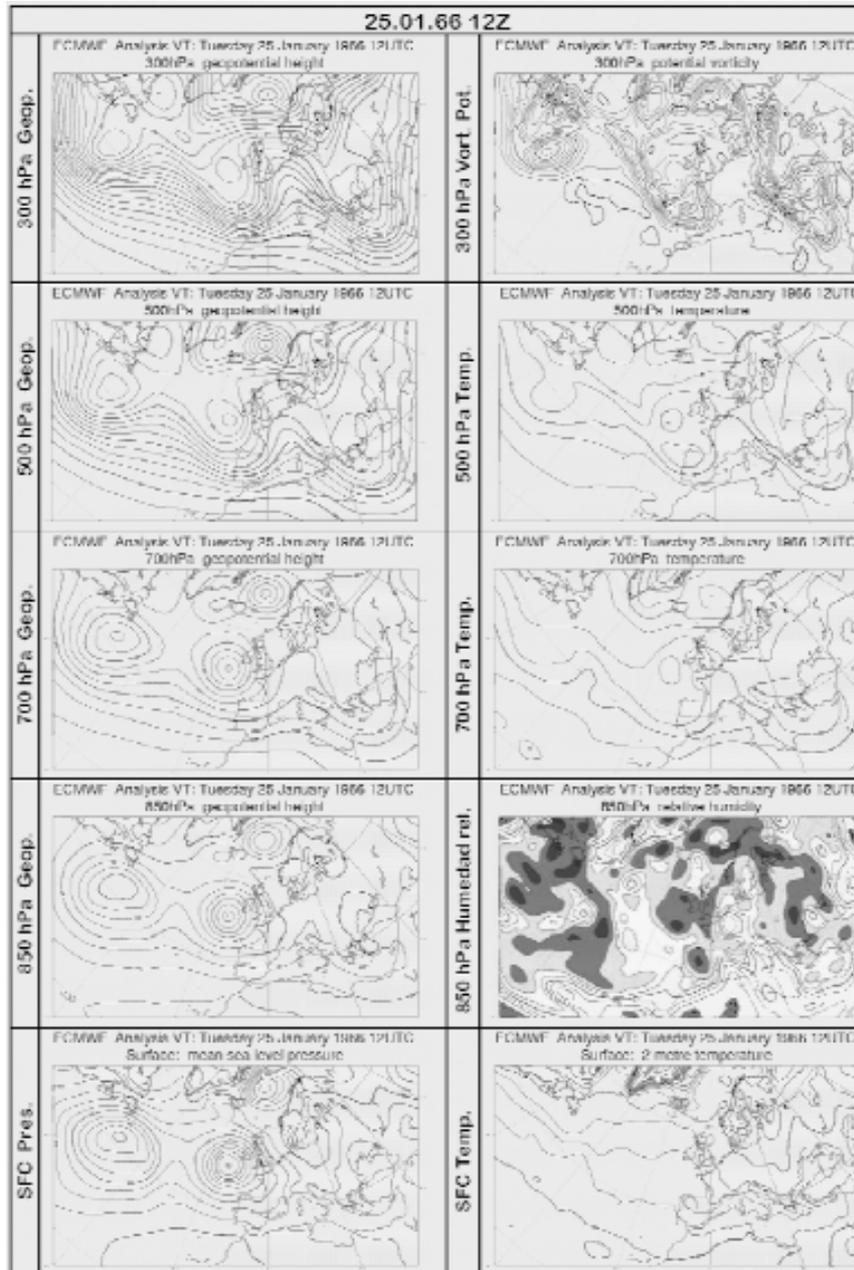


Figura 2. Ejemplo los campos utilizados para la descripción de un día de la situación correspondiente a enero de 1966. (Fuente: ERA-40 CEPPM. Elaboración propia).

sis (nacimiento y desarrollo de depresiones) que están detrás de la mayor parte de los procesos atmosféricos en las latitudes medias. El campo de viento en este nivel indica precisamente los máximos del chorro polar, es decir, las zonas donde se localiza el chorro polar por una parte y por otra donde son más activos sus procesos de deformación que originan depresiones con o sin reflejo en superficie. La vorticidad potencial es un concepto que está relacionado con la estabilidad de la atmósfera y con la presencia de fenómenos ciclogénéticos en estos niveles altos relacionados con los hundimientos de la tropopausa. Así, los máximos de viento y los máximos de vorticidad potencial en niveles altos son conceptos análogos que vienen a representar las zonas con mayor dinamismo de los procesos de deformación del frente polar y de generación de vórtices y depresiones. Se puede demostrar que físicamente la vorticidad potencial y los vientos tienen un comportamiento análogo a la carga eléctrica y las líneas de corriente, es decir, que la primera induce la configuración de las segundas (Bluestein, 1993).

5. Rasgos de la precipitación en Cuenca del Ebro

Se ha convertido en “un lugar común” hablar de lo extremado y de lo variado de los climas ibéricos. En pocos casos está este hecho más cerca de la realidad que en la Cuenca del Ebro. Su posición está encajada entre dos unidades de relieve importantes como es la Meseta central, con sus rebordes montañosos, y los Pirineos y su continuación por el Cantábrico que retienen o interfieren en los flujos entrantes, sin olvidar que la Cordillera Costero-Catalana culmina el cierre por el este y hace lo mismo con los flujos mediterráneos. Pero por esa misma disposición del relieve, éste es un eficaz interceptor de las precipitaciones y, por lo tanto, van a ser zonas que presenten fuertes contrastes climáticos entre las montañas circundantes y la depresión interior, lo que justifica la aseveración inicial. La cantidad media anual de precipitación en la Cuenca del Ebro puede variar entre alrededor de 2000 mm en las zonas altas de los Pirineos, la divisoria de aguas cantabro-ibérica de Navarra o la Sierra del Escudo en Cantabria y poco más de 300 mm en el centro de la Depresión, es decir, la cantidad anual de precipitación puede variar en un factor 7 en una distancia lineal de 130 Km. (I.G.N., 2005)

La distribución estacional de las precipitaciones es asimismo diferente según las partes de la cuenca. En la cabecera del Ebro y a lo largo de la divisoria septentrional hasta, aproximadamente, la cuenca alta del Cinca, el máximo de precipitación tiende a producirse durante el invierno, con un máximo secundario primaveral. En el extremo oriental de la cuenca, desde el Pirineo oriental hasta la cuenca del Matarraña, los máximos se suelen producir en otoño, con un máximo secundario primaveral. En

el resto de la cuenca el máximo de precipitación se produce en primavera, concretamente en el mes de mayo, con un máximo secundario en otoño. En muchas áreas de la Ibérica aragonesa se produce la peculiaridad de que en verano suele llover más que en invierno debido a la actividad convectiva estival sobre la zona, lo que pone en cuestión la mediterraneidad pura de estos ámbitos o destaca del papel de la continentalidad en su carácter mediterráneo. En realidad las precipitaciones estivales no son significativamente bajas, como sucede en los entornos mediterráneos típicos, más que en las partes más orientales de la depresión central. En el resto, incluyendo toda la divisoria septentrional, tienen una participación relativa considerable en el total anual. Ello no significa, sin embargo, que el verano no sea la estación más seca en la mayor parte de la cuenca y que no se produzcan estiajes acusados en los cursos fluviales. La variabilidad interanual es también una característica de la cuenca que, aunque se refleja en todos los ámbitos espaciales, es más destacable en las zonas más alejadas de la influencia atlántica, donde de hecho suele ser lo normal que las precipitaciones anuales estén por debajo de las medias descritas salvo años en las que éstas se rebasan holgadamente. Con esta situación se puede suponer que los afluentes más caudalosos del Ebro serán los que viertan sus aguas por la margen izquierda y, en especial aquellos que tengan sus cabeceras directamente sobre la divisoria de la cuenca. Los cursos ibéricos tendrán menor importancia global y, dentro de ellos, los menos caudalosos serán los comprendidos entre el Jalón y el Guadalope (excluidos), que sitúan sus cabeceras en zonas relativamente secas.

En un estudio sobre inundaciones es importante conocer no sólo la distribución media de las precipitaciones sino sus extremos: la probabilidad de producirse precipitaciones altas o episodios que acumulen grandes cantidades de precipitación. Se han realizado diferentes estudios sobre extremos de precipitación y sus periodos de retorno a nivel nacional (I.N.M., 2007) o regional para ámbitos de la Cuenca del Ebro (Beguiría *et al.*, 2006). Estos estudios ponen de manifiesto que el periodo de retorno de precipitaciones superiores a 100 mm/24h es, en general, mucho menor en la mitad meridional de la cuenca que en la septentrional. A lo largo de la práctica totalidad de los sistemas montañosos que bordean la cuenca este periodo de retorno es inferior a 15 años. Los resultados inferiores a 30 años cubren buena parte de los somontanos de la Ibérica y de las zonas orientales, mientras que para las áreas centrales de la depresión y su extensión hasta prácticamente contactar con las sierras exteriores pirenaicas, este periodo se aproxima o es superior al siglo. Igualmente, se pueden esperar precipitaciones superiores al umbral de 60 mm/24h en todas las partes de la cuenca –con excepción del mismo centro de la depresión– con un periodo de retorno de 10 años. Este umbral se supera en todas las zonas elevadas con un periodo de retorno de 5 años. Es decir, todos los cursos de la cuenca que tienen su origen en los sistemas montañosos que la bordean son en principio susceptibles de experimentar procesos de inundación con periodos de retorno cortos. Dependerá de la extensión de las precipitaciones que esos procesos sean crecidas relámpago localizadas o inun-

daciones más extensas y sinérgicas entre diferentes cursos que deriven en situaciones que afecten a subcuencas enteras o a conjuntos de subcuencas y se traduzcan en crecidas en el colector principal.

6. Peculiaridades de la climatología sinóptica de la Cuenca del Ebro

El intento por resumir las diferentes situaciones sinópticas que afectan a un entorno tan complejo y variado como la Cuenca del Ebro necesariamente ha de pecar de superficialidad. Existen numerosas publicaciones que tratan, específicamente o no, este tema, unos de ellos generales para la Península Ibérica (Martín Vide, 1984; Font, 2000; Martín Vide *et al.*, 2001), otros adaptados a partes del área de estudio (Ruiz de Urrestarazu, 1982; del Valle, 1996; Cuadrat, 1999). Aquí, más que una clasificación de todas las posibles situaciones que pueden afectar a la cuenca se va a tratar de explicar brevemente cómo las diferentes partes de la cuenca responden a las situaciones más habituales. Se debe tener siempre en cuenta, además, la complicación que supone intentar hacer taxonomías de elementos que nunca van a ser idénticos entre sí y que además tienen muchas formas posibles para hibridarse y diversificarse. El esbozo de las situaciones descritas a continuación se resume y describe gráficamente en la figura 3.

Una de las situaciones típicas en cualquier punto de las latitudes medias es el paso de un sistema frontal. En la Cuenca del Ebro, las respuestas a los pasos de frente tienen mucho que ver con la posición del centro de la perturbación ciclónica a la que dichos frentes están asociados y al carácter del frente: frío, cálido u ocluido. Si el centro de la depresión está situado al norte de la cuenca, lo que es lo más habitual, lo más posible es que el frente cálido no se presente muy activo sobre la cuenca, de la que suele afectar principalmente al sector superior y a la zona pirenaica. Si la posición del centro de la perturbación ciclónica está en una latitud similar a la de la península y a una distancia de la misma similar en magnitud a la de la propia península, lo más probable es que cuando se sitúe sobre la cuenca el frente cálido haya sido atrapado por el frente frío, que siempre avanza más rápido, y se haya producido una oclusión. Las oclusiones que más efectos pluviométricos tienen son las que tienen su eje paralelo a las principales unidades de relieve de la cuenca y son las situaciones que producen más precipitación en la depresión. Sin embargo, dada la posición habitual de los centros de acción lo más frecuente es que los frentes cálidos circulen a una latitud superior a la del área de interés y que la cuenca se vea afectada por el paso de frentes fríos, que se prolongan hasta una distancia mucho mayor de los centros de las depresiones. Los pasos de frente frío afectan más a las mitades septentrional y occidental de la cuenca y sólo aquéllos muy activos o cuyos

centros de acción están más cercanos afectan a la totalidad de la cuenca. Especialmente en verano, los pasos de frente pueden formar complejos prefrontales –trenes convectivos, líneas de turbonada, etc.– debido a la fuerte inestabilidad y a la difluencia en niveles altos. Estos complejos se suelen formar sobre la Ibérica y desplazarse hacia el NE. Es importante destacar que los frentes están relacionados con una depresión, que tiene un giro antihorario. Por lo tanto, el movimiento de cualquier sistema frontal es el resultado de una composición de movimientos: uno de traslación de todos los sistemas sinópticos y otro de rotación o vorticidad. Así, aunque un frente frío penetre desde el NW, que es lo más habitual, el sentido de giro de su vórtice asociado fuerza a que la dirección del movimiento del flujo y de la nubosidad sea normalmente de SW a NE. Con mucha frecuencia la divisoria septentrional ralentiza el avance de los frentes. Es por este motivo que éstas son las zonas que reciben más precipitación media y que el resto de la cuenca reciba mucha menos. Debido a la menor altitud de los Montes Vascos, éstos se comportan a modo de ventana que permite el paso de la nubosidad y precipitaciones asociadas a muchos sistemas frontales hasta las sierras más altas de la Ibérica riojana y el Moncayo.

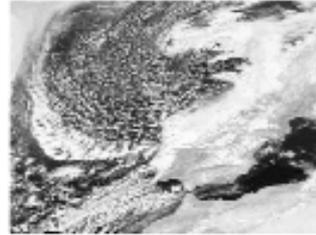
Las situaciones anticiclónicas no producen, en general, precipitaciones de importancia en la Cuenca y por tanto no suele haber inundaciones en su presencia, con dos salvedades. Una es que la presencia de una depresión o de una vaguada en niveles altos puede producir precipitaciones intensas mientras que en superficie la situación permanezca anticiclónica. La otra es que en el seno de situaciones anticiclónicas generalizadas, en verano se suele formar una depresión en el interior de la península producida por el calentamiento solar. Estas depresiones suelen afectar sólo a los niveles bajos y ser de ciclo diario, pero tienen una importancia enorme a mesoscala, ya que conducen flujos marítimos del SE sobre la cuenca que aportan humedad en los niveles bajos. Las convergencias locales, muy favorecidas, entre otros factores, por la orografía y las situaciones en altura (paso de vaguadas o depresiones aisladas) favorecen la convección intensa o profunda, que se puede producir especialmente en verano y sobre el sector inferior de la cuenca, produciendo precipitaciones ocasionalmente muy intensas que pueden causar crecidas relámpago y otros fenómenos adversos como granizo, fuertes rachas de viento o incluso tornados. Otros tipos de tiempo anticiclónico, como las entradas de aire polar continental del nordeste, las situaciones de cierzo o las de niebla en la depresión no tienen ninguna relación con las situaciones de inundación.

7. Estudio del catálogo de situaciones de inundación

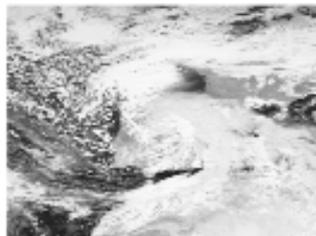
El punto central de este trabajo es el estudio de una serie de situaciones atmosféricas que han afectado a la cuenca y producido crecidas en una fracción mayor o



Paso de un frente cálido sobre la parte occidental de la Cuenca del Ebro



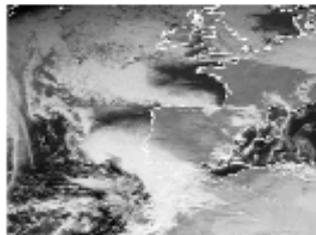
Paso de un frente frío sobre la Cuenca del Ebro



Oclusión sobre la Cuenca del Ebro



Nevadas generalizadas en la Cuenca del Ebro producidas por el paso de un frente frío muy activo y la intensa descarga fría posterior



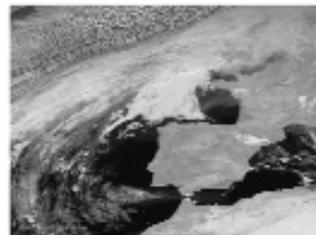
Entrada fría del nordeste



Situación de niebla



Situación de convección profunda con sistema convectivo de mesoescala sobre la cuenca



Situación de altas presiones y nieblas sobre la depresión central

Figura 3. Imágenes de satélite representando situaciones sinópticas típicas en la Cuenca del Ebro. (Fuente: Eumetsat. Elaboración propia).

menor de la red hidrológica. Resulta evidente que cualquier intento por obtener conclusiones generales de un catálogo reducido de situaciones de inundación es, de raíz, insuficiente. Se presenta el problema adicional de que este catálogo ha sido elegido de forma subjetiva, lo que supone una merma adicional a la validez de cualquier tipo de conclusiones que se puedan desprender de este estudio. Sin embargo, el mero hecho de afrontar sistemáticamente el estudio de un catálogo de situaciones que se han elegido con la voluntad de representar una solución de compromiso entre la variedad espacial y estacional en toda la superficie de la cuenca y un número contenido de las mismas puede aportar elementos interesantes al estudio de los procesos de inundación en la Cuenca del Ebro en relación con las causas que los producen.

Se han considerado un total de 22 situaciones de crecida para el periodo 1960-2007. La relación completa de los episodios y áreas afectadas aparece en la Tabla 2. El periodo considerado comienza con la gran inundación de la Navidad de 1960-1961 por varios motivos, entre los que figura la gran relevancia de dicho episodio de crecida, la adquisición progresiva a partir de ese momento de la configuración "moderna" de la cuenca, con la entrada en servicio de las obras de regulación más importantes y, por último, la disponibilidad de productos y herramientas que permiten el estudio de las situaciones atmosféricas pasadas de forma completa y análoga a las actuales. Las áreas afectadas, con sus subcuencas respectivas, se detallan en cada uno de los apartados de las situaciones. Se utiliza el término "general" para aquellos procesos de crecida que comienzan en la cuenca alta del Ebro y en la pirenaica, especialmente en su sector más occidental, y producen crecidas que afectan a todo el curso del propio Río Ebro. Dado el grado de complejidad de este tipo de grandes crecidas también se puede manifestar en otras áreas de la cuenca. Es necesario destacar, asimismo, que las fechas consideradas son las de la situación atmosférica que dio lugar a la situación de crecida, cuyos periodos y duración no tienen por qué ser coincidentes.

8. Resultados

El estudio detallado de las situaciones atmosféricas en los episodios de inundación considerados ha permitido establecer unas pautas generales en sus fases atmosféricas que, pese a lo reducido del catálogo y al hecho de su selección subjetiva, sugieren unas posibles formas de clasificación de situaciones, que se resumen en la Tabla 3. Estos criterios de clasificación son:

- a) Según la estacionalidad
- b) Según la movilidad de los procesos atmosféricos
- c) Según el origen meteorológico de los procesos
- d) Según las partes de la cuenca afectadas

Tabla 2. Relación de situaciones de crecida consideradas para su estudio en este trabajo.

<i>Número de la situación</i>	<i>Duración (fechas)</i>	<i>Áreas afectadas</i>
1	18-12-1960 – 12-01-1961	General
2	02-08-1963 – 27-01-1966	Cuencas del Cinca y Noguera Ribagorzana
3	19-01-1966 – 27-01-1966	Cuencas del Cinca y el Segre
4	05-11-1966 – 13-11-1966	General
5	13-11-1967 – 20-11-1967	Subcuencas de la Ibérica Riojana
6	20-01-1978 – 06-06-1978	General
7	01-06-1979 – 03-06-1979	Cuencas del Cinca y el Gállego
8	06-11-1982 – 10-11-1982	Cuencas del Gállego, Cinca, Segre y de la Ibérica Riojana
9	25-08-1983 – 28-08-1983	Subcuencas vascas, burgalesas y del Jiloca
10	01-04-1988 – 06-04-1988	Subcuencas de la Ibérica desde Burgos hasta el Moncayo
11	21-06-1988 – 03-07-1988	Cuenca del Cinca
12	12-04-1991 – 17-04-1991	Subcuencas ibéricas
13	01-12-1992 – 10-12-1992	Cuenca alta del Ebro y subcuencas pirenaicas occidentales
14	23-12-1993 – 29-12-1993	Cuenca alta del Ebro
15	07-08-1996	Barranco de Arás
16	16-12-1997 – 19-12-1997	Cuenca del Gállego y partes de la del Cinca
17	03-07-1998 – 07-07-1998	Subcuencas ibéricas
18	21-10-2000 – 26-10-2000	Subcuencas ibéricas más orientales y de la cordillera costera
19	23-08-2002 – 26-08-2002	Cuenca del Jalón
20	28-01-2003 – 05-02-2003	General
21	04-05-2003 – 13-05-2003	Subcuencas de la Ibérica Aragonesa
22	18-03-2007 – 10-04-2007	General

Fuente: Elaboración propia.

a. Comenzando por la estacionalidad, las situaciones atmosféricas causantes de procesos de inundación pueden clasificarse en:

- Invernales
- Equinocciales
- Estivales

Los procesos invernales suelen estar relacionados con la baja latitud de la circulación del chorro circumpolar en niveles altos y con los procesos asociados al mismo. La posición del chorro rige claramente la posición de las depresiones que se forman en sus ondulaciones, que afectan al área de estudio con gran intensidad. Por cuanto afecta a las inundaciones en la Cuenca del Ebro, suelen ser procesos largos, de entre 10 y 20 días de duración, en los que la zona de máxima intensidad del flujo incide directa y persistentemente sobre las áreas noroccidentales de la cuenca, produciendo precipitaciones moderadas y persistentes. Estos procesos causan crecidas en las subcuencas de la cabecera y las dispuestas a lo largo de la divisoria septentrional hasta el Pirineo central. Las subcuencas de la Ibérica riojana central y occidental tienen asi-

Tabla 3. Clasificación final de las situaciones de inundación consideradas en el trabajo.

<i>Sit.</i>	<i>Fechas</i>	<i>Tipo estacional</i>	<i>Tipo movilidad</i>	<i>Tipo meteorológ.</i>	<i>Sector</i>	<i>Margen</i>	<i>Unidad</i>
1	18-12-60 – 12-01-61	Invernal	Estacionaria	Circulación	Superior	Izquierda	DIC/PIW
2	02-08-63 – 03-08-63	Estival	Móvil	Ciclónico	Inferior	Izquierda	PIE
3	19-01-66 – 27-01-66	Invernal	Intermedia	Circulación	Inferior	Izquierda	PIW/PIE/ IBW
4	05-11-66 – 13-11-66	Equinoccial	Intermedia	Ciclónico	NC	Izquierda	PIW/PIE
5	13-11-67 – 20-11-67	Equinoccial	Intermedia	Ciclónico	Inferior	Izquierda	PIE/CCC/ IBW
6	20-01-78 – 06-06-78	Invernal	Estacionaria	Circulación	Superior	Izquierda	PIW/DIC
7	01-06-79 – 03-06-79	Estival	Móvil	Circulación	Inferior	Izquierda	PIW
8	06-11-82 – 10-11-82	Equinoccial	Intermedia	Ciclónico	Inferior	Izquierda	PIE
9	25-08-83 – 28-08-83	Equinoccial	Intermedia	Ciclónico	Superior	Izquierda	DIC/IBW
10	01-04-88 – 06-04-88	Equinoccial	Intermedia	Ciclónico	NC	Derecha	IBW/IBC/ CCC
11	21-06-88 – 03-07-88	Equinoccial	Intermedia	Ciclónico	Inferior	Izquierda	PIW/IBC
12	12-04-91 – 17-04-91	Equinoccial	Intermedia	Ciclónico	NC	Derecha	IBW/IBC
13	01-12-92 – 10-12-92	Invernal	Estacionaria	Circulación	Superior	Izquierda	PIW/DIC
14	23-12-93 – 29-12-93	Invernal	Estacionaria	Circulación	Superior	Izquierda	DIC/PIW
15	07-08-96	Estival	Móvil	Frontal	Inferior	NC	PIW/IBE
16	16-12-97 – 19-12-97	Equinoccial	Intermedia	Frontal	Inferior	Izquierda	PIE/PIW
17	03-07-98 – 07-07-98	Estival	Intermedia	Frontal	NC	NC	IBE/IBC PIW
18	21-10-00 – 26-10-00	Equinoccial	Intermedia	Ciclónico	Inferior	Derecha	CCC/PIW
19	23-08-02 – 26-08-02	Estival	Móvil	Ciclónico	Inferior	Derecha	IBE/IBC/ IBW
20	28-01-03 – 05-02-03	Invernal	Estacionaria	Circulación	Superior	Izquierda	DIC/PIW
21	04-05-03 – 13-05-03	Equinoccial	Intermedia	Frontal	NC	Derecha	IBE/IBW/ IBC/CCC
22	18-03-07 – 10-04-07	Invernal + Equinoccial	Estacionaria	Circulación + Ciclónico	Superior	Izquierda	DIC/PIW

Fuente: Elaboración propia.

mismo una participación relativamente importante. El resto de la cuenca recibe precipitaciones considerablemente menores y la aparición de procesos de inundación en otras subcuencas es rara. En este tipo de situaciones los procesos de innivación y fusión nival tienen una importancia alta, produciendo desfases temporales entre los máximos de precipitación y los de caudal, especialmente en cuencas como las del Aragón que tienen sus cabeceras a altitudes elevadas. Los resultados de estas situaciones suelen ser crecidas generales que afectan a las zonas mencionadas y, debido a la gran cantidad de precipitación que se puede acumular en cada episodio en la divisoria ibérico-cantábrica y el Pirineo occidental, que normalmente supera los 200 mm, al colector principal produciendo crecidas e inundaciones del Ebro medio. Dentro de este estudio pertenecen a este tipo de crecidas las situaciones numeradas 1, 6, 13, 14, 20 y la primera fase de la situación 22. La situación 3 es una variedad de situación invernal con bastantes componentes de situación equinoccial que afectó persistentemente a toda la zona pirenaica, con máximos en el Pirineo central, por lo que ha sido clasificada como "invernal de transición".

Los procesos equinociales son mucho más variables en cuanto a las subcuencas que afectan, normalmente a fracciones de la cuenca mucho mayores que el caso anterior, con máximos que pueden situarse sobre los Pirineos, especialmente en su sector oriental, o sobre la Ibérica, tanto en su sector occidental como en el extremo suroccidental. Están relacionados con sistemas activos de paso de vaguadas y frentes y con procesos de ciclogénesis y ciclólisis de depresiones frías o en niveles medios y altos. La diferencia entre unas u otras zonas afectadas dependerá de la posición de estos centros de acción durante el episodio. Las crecidas que se producen en estas situaciones pueden llegar a ser muy importantes, pero aunque las precipitaciones suelen estar mucho más generalizadas espacialmente que en el tipo invernal, las mayores acumulaciones de las mismas suelen estar localizadas en un número determinado de subcuencas. Además, su afección sobre el Ebro medio –la zona más poblada de la cuenca– suele ser menor bien por la menor superficie de las cuencas más afectadas (caso de las ibéricas occidentales), bien por producirse aguas abajo del mismo (caso de las crecidas en el sistema Cinca-Segre o Guadalupe-Matarraña). La duración media de estos episodios puede establecerse en torno a una semana, durante la que normalmente se producen precipitaciones de mayor intensidad en las zonas más afectadas que en los episodios invernales, con acumulaciones ocasionalmente muy importantes. Pertenecen a este tipo las situaciones numeradas en este trabajo 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 16, 18, 21 y la segunda fase de la situación 22. La variedad climática de la Cuenca del Ebro hace que puedan aparecer en diferentes ámbitos de la cuenca situaciones equinociales en meses diferentes a los típicamente primaverales u otoñales.

Las situaciones estivales suelen corresponder a procesos convectivos intensos y focalizados sobre zonas en general no muy extensas de la cuenca, que producen desde crecidas relámpago puntuales hasta, si la extensión de la convección es sufi-

ciente, crecidas que afectan a subcuencas enteras. El aumento de la extensión de las zonas afectadas por las fuertes precipitaciones está relacionado con la movilidad de las células convectivas y con la formación de estructuras convectivas más complejas como sistemas convectivos de mesoscala (Maddox, 1980). Para el desarrollo de células convectivas capaces de generar este tipo de procesos es necesario el concurso de situaciones propicias en los niveles medios y altos, como la presencia de ramas ascendentes de vaguadas, que profundizan, organizan y dirigen el movimiento de las células convectivas. Por el contrario, los factores orográficos y de mesoscala pueden causar la ralentización del desplazamiento de estas células de intensa precipitación, produciéndose entonces los episodios más graves de crecidas relámpago. La duración típica de este tipo de situaciones es de unas pocas horas, si bien el mantenimiento de las condiciones para su desencadenamiento les proporciona un cierto grado de recurrencia a lo largo del tiempo, por lo que pueden prolongarse hasta unos tres días. En este trabajo aparecen como ejemplos de este tipo las situaciones 2, 7, 15, 17 y 19.

b. La clasificación según movilidad de la situación atmosférica hace referencia a la capacidad de evolución de la situación meteorológica en el tiempo y en el espacio, lo que determinará durante cuánto tiempo afectarán las precipitaciones a qué porción de la cuenca. Si el tiempo de evolución es largo y la superficie afectada relativamente pequeña aparecerán situaciones estacionarias. Si el tiempo de evolución es corto y la superficie afectada grande, situaciones con gran movilidad. Es muy importante destacar que esta clasificación es relativa ya que depende mucho del tamaño del área de estudio: Si la superficie fuese pequeña, una situación muy próxima a la posición del chorro, con muchos cambios y paso rápido de bandas nubosas y sistemas frontales tendría gran movilidad. Para el ámbito de toda la cuenca, la extensión espacial modifica esta clasificación. Según este criterio las situaciones se clasifican en:

- Estacionarias
- Movilidad intermedia
- Móviles

Las situaciones estacionarias se corresponden con los episodios largos producidos por la incidencia directa del chorro circumpolar sobre la cuenca y, en casos extremos, por la persistencia de depresiones capturadas por la configuración general y con un desplazamiento lento o nulo. Por sí mismos, los chorros están entre las formaciones más dinámicas de la atmósfera. La velocidad del flujo en su seno y otros elementos, como la vorticidad potencial, hacen que se desencadenen procesos ciclogénicos y de desplazamiento de ondas, frentes y depresiones con una rapidez inusitada en otras configuraciones sinópticas, por lo que no son inmóviles o estáticos los chorros en sí mismos, cuyo dinamismo es el motor de la mayor parte de procesos sinópticos, sino la persistencia de la posición del mismo sobre la cuenca. A este grupo pertenecen todas las situaciones clasificadas como invernales en este trabajo: 1, 6, 13, 14, 20 y 22. La situación 22, pese a presentar una segunda fase dominada por una depresión destacó por la poca movilidad de ésta.

Las situaciones de movilidad intermedia se corresponden con la mayoría de los procesos de pasos de vaguada y frentes, así como con los de generación y desaparición de una depresión (en altura o con reflejo en superficie) en las proximidades de la cuenca. Son procesos en general dinámicos, pero su extensión los hace afectar a grandes áreas. Los ejemplos en este trabajo se corresponden con las situaciones equinocciales salvo la 3, inercial de transición y la 17 que es estival pero de más lento desarrollo: 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 16, 17, 18 y 21.

Las situaciones de alta movilidad se focalizan mucho en pequeñas extensiones. Se generan y desaparecen con igual rapidez. Las situaciones convectivas son, a la escala de la Cuenca, situaciones con gran movilidad, por lo que deben darse condiciones de una gran intensidad de las precipitaciones que producen o de detención o ralentización momentánea en su desplazamiento para que produzcan crecidas. En este trabajo pertenecen a este tipo las situaciones estivales: 2, 7, 15 y 19.

c. Según el origen meteorológico de los procesos, se pueden hacer distinciones entre los causados principalmente por:

- Incidencia directa del chorro circumpolar en altura y de las ondas cortas en su seno (Circulación)
- Actividad ciclónica
- Actividad frontal

Al primer tipo, circulación, pertenecen aquellas situaciones causadas por la circulación baja en latitud del chorro circumpolar en niveles altos. Por tanto, a este tipo pertenecen las situaciones 1, 3, 6, 13, 14, 20 y la primera fase de la 22, pero también la situación 7, producida por las pequeñas ondulaciones de un chorro del sur sobre las sierras exteriores del Pirineo.

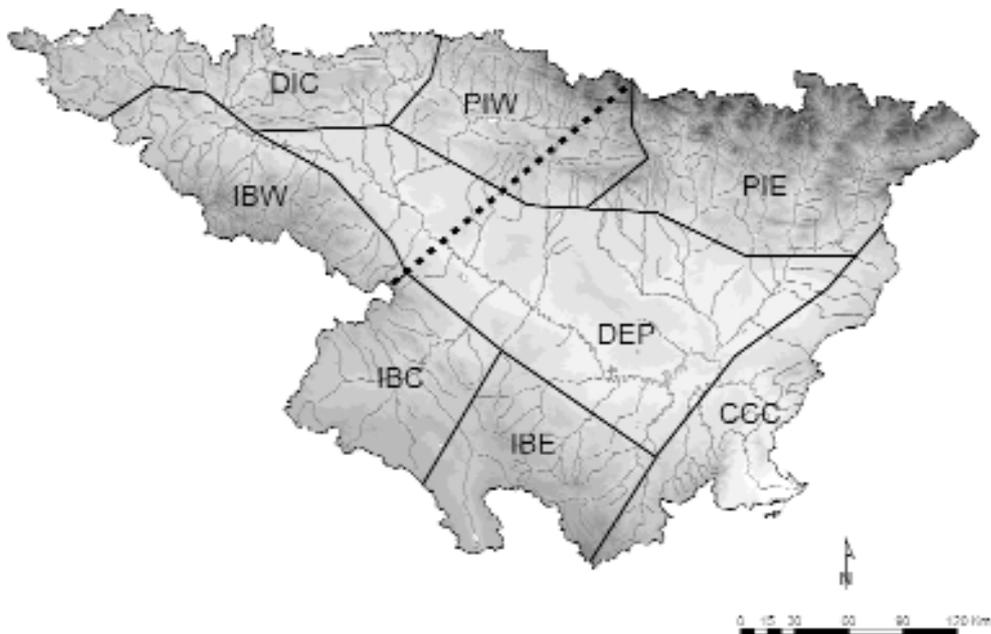
Las situaciones generadas por actividad ciclónica comprenden las derivadas de depresiones y sus sucesivos sistemas frontales asociados en las proximidades del área de estudio, comprendiendo entre ellas las depresiones frías y las depresiones en niveles altos, así como los procesos de generación de las mismas y de transición entre unas y otras. En general se caracterizan por la elevada curvatura de la circulación sobre la cuenca. Pertenecen a este tipo las situaciones 2, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 18, 19 y la segunda fase de la situación 22.

Las situaciones generadas por actividad frontal incluyen los pasos de frentes y de vaguadas, diferenciándose del anterior tipo por la menor curvatura de la circulación, que sólo suele experimentar variaciones de una componente dominante a otra –por ejemplo, de SW a NE-. Es decir, las líneas de corriente en las situaciones ciclónicas se cierran en altura y, eventualmente, en superficie, mientras que en las situaciones de este último tipo meteorológico las líneas de corriente no se cierran en ningún nivel.

El contraste entre masas de aire de características diferentes es lo que predomina en estas situaciones y muchas situaciones convectivas tienen su origen en el paso de vaguadas en altura, que desata el desarrollo de las células. En este trabajo las situaciones 15, 16, 17 y 21 pertenecen a esta categoría.

d. Por último, las situaciones se pueden clasificar según las partes de la cuenca afectadas. La posibilidad más reduccionista hace referencia a la división elemental de la cuenca en secciones superior e inferior (ver apartado 2). Otra permitiría diferenciar entre las secciones de las unidades de relieve principales. Así, señalaremos la divisoria ibérico-cantábrica, el Pirineo occidental, el Pirineo oriental, las Cordilleras Costeras, la Ibérica oriental, la Ibérica central y la Ibérica occidental (Mapa 3).

- Las crecidas clasificables como del sector superior de la cuenca son los casos 1, 6, 9, 13, 14, 20 y 22.
- Las clasificables como del sector inferior son las 2, 3, 5, 7, 8, 11, 15, 16, 18 y 19.
- Los casos 4, 10, 12, 17 y 21 no se pueden clasificar en ninguna de las dos categorías anteriores.



Mapa 3. División espacial de las unidades de la cuenca. DIC: Divisoria Ibérico-Cantábrica, PIW: Pirineo occidental, PIE: Pirineo oriental, CCC: Cordilleras Costeras, IBE: Ibérica oriental, IBC: Ibérica central, IBW: Ibérica occidental, DEP: depresión central. La línea gruesa discontinua distingue los denominados sectores superior e inferior de la cuenca (Elaboración propia).

Es llamativo que todas las crecidas del sector superior sean, salvo una equinoccial, invernales. Las 10 crecidas del sector inferior se dividen en 5 equinocciales, 4 estivales y 1 invernales y las crecidas no clasificables, por distribuirse equitativamente entre ambos sectores, son 4 equinocciales y 1 estival. Las crecidas invernales predominan en el sector superior, que tiene características más oceánicas, mientras que las crecidas estivales lo hacen en el inferior, con características más mediterráneas o continentales. Existe un reparto de las crecidas equinocciales entre el sector inferior y las zonas más occidentales del sector superior.

Otra distribución simple y elemental permite distinguir entre las crecidas de las subcuencas de la margen izquierda y derecha del Ebro:

- Las situaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 16, 20 y 22 son de crecida en las subcuencas de la margen izquierda.
- Las situaciones 10, 12, 18, 19 y 21 son de crecida en las subcuencas de la margen derecha.
- Las situaciones 15 y 17 no se pueden clasificar con claridad según este criterio.

Es decir, las situaciones de crecida en la margen derecha son todas equinocciales salvo una estival. Las situaciones no clasificables también son estivales, como corresponde al patrón de los procesos convectivos en la Cuenca del Ebro, que se suele originar en la margen derecha y se desplaza en la margen izquierda (Espejo, 2007), por lo que las crecidas de este tipo pueden aparecer indistintamente en una margen o en otra, dependiendo de dónde se desarrollen las células más activas en cada caso. No se puede generalizar ninguna de estas conclusiones debido a que la población de casos de estudio no ha sido elegida aleatoriamente, pero se puede constatar que no hay ninguna crecida invernales predominante en las cuencas de la margen derecha y que son las equinocciales las que tienden a afectar más a estas subcuencas. En la Tabla 3 figuran, asimismo, las unidades de la cuenca más afectadas por cada situación.

9. Conclusiones

A través del estudio pormenorizado de las fases atmosféricas de situaciones de inundación diferentes es posible alcanzar algunas conclusiones, unas acerca del estudio de las situaciones en sí y otras acerca de la metodología a utilizar en este tipo de trabajos.

La primera conclusión sobre el estudio de las situaciones es que, pese a lo delicado del intento de establecer taxonomías en situaciones con un número inabarcable

de variables atmosféricas, hidrológicas, relacionadas con el relieve, el terreno y otras, entre la que la gestión antrópica de las redes fluviales en procesos de crecida no es la de menor importancia, resulta posible obtener algunos resultados que permiten arrojar más luz sobre la fase atmosférica de las situaciones de inundación. Los resultados se han expuesto en la forma de una clasificación de las crecidas consideradas que han permitido alcanzar generalizaciones. Además, en el estudio de cada uno de los casos se han ido describiendo las situaciones con un nivel de detalle espacial y temporal razonable como para permitir una comprensión individualizada y generalizable de cada uno de esos procesos. Esta clasificación según diferentes criterios permite establecer relaciones entre tipos de procesos atmosféricos, su mayor probabilidad estacional de ocurrencia y las zonas de la cuenca que se ven más frecuentemente afectadas por las mismas, que viene a enriquecer la clasificación clásica entre crecidas de pequeñas cuencas y crecidas de los cursos medio y bajo del Ebro (Camarasa, 2002). Así, en el denominado sector superior de la cuenca son de esperar preferentemente crecidas invernales producidas por la incidencia directa de la circulación ligada al chorro circumpolar, con una duración-tipo del orden de dos semanas que pueden producir crecidas importantes en el tramo medio del curso principal y las subcuencas superiores al mismo. Sin embargo, en el sector inferior son más frecuentes las crecidas durante las estaciones equinocciales producidas por depresiones y con duraciones del orden de una semana, que pueden producir –especialmente– crecidas en las subcuencas ibéricas y en la del Cinca-Segre. Las crecidas estivales son mucho más repentinas y pueden aparecer en cualquier punto de la cuenca, aunque son más frecuentes en las zonas de montaña del sector inferior.

Otra conclusión alude al establecimiento de las bases para un estudio sistemático de todos los procesos de crecida de la cuenca en función de sus causas atmosféricas que valide estas clasificaciones y las relaciones entre ellas, así como que permita realizar estudios de frecuencias de unos tipos u otros, la evolución temporal de las mismas, etc. La mejor comprensión de la fase atmosférica de estos procesos permite orientar la búsqueda de campos atmosféricos que resulten significativos para afrontar ese estudio, útil para la mejora de la predicción de estos procesos, para la gestión de la red hidrológica y de los riesgos naturales y la comprensión del funcionamiento de los sistemas fluviales.

Se puede alcanzar una conclusión adicional sobre la metodología utilizada hasta ahora para la descripción de la fase atmosférica de los procesos de inundación. En los casos en los que se ha utilizado cartografía meteorológica, que no son mayoría (ver apartado 3), normalmente se recurre a mapas sinópticos con la presión en superficie y las superficies frontales y, en ocasiones, a mapas de topografías en altura que suele ser la de 500 hPa. Aunque esta representación es útil para obtener de forma rápida e inteligible información sobre una situación, además de que suele ser la de más fácil acceso para los investigadores, resulta insuficiente para interpretar comple-

tamente procesos como las advecciones térmicas o los procesos evolutivos de los sistemas activos. Es mucho más objetivo y realista utilizar diferentes campos de modelos a varios niveles combinados con imágenes de satélite para obtener una visión más completa de los procesos involucrados. El uso y abuso de los mapas de frentes ha conducido a excesivos simplismos que han enmascarado la realidad. Entre ellos, por ejemplo, está el que las situaciones que más precipitación producen en la Cuenca del Ebro son las del noroeste, cuando la realidad es que lo único que procede de esa dirección es la superficie frontal fría en su desplazamiento de traslación, pero el flujo delante del mismo, el que produce nubosidad y precipitaciones, procede del suroeste y es por esa razón por lo que se pueden producir grandes cantidades de precipitación e inundaciones en las caras sur de los Pirineos. En el caso de las superficies frontales cálidas es el flujo del sureste en su parte delantera el que produce ocasionalmente grandes acumulaciones de precipitación.

10. Agradecimiento

A los medios humanos y técnicos del Centro Meteorológico Territorial en Aragón, La Rioja y Navarra, en especial a Evelio Álvarez por las ideas aportadas que han enriquecido y mejorado el manuscrito original.

11. Bibliografía

- Ascaso, A. (1978) *Meteorología de Zaragoza VI: las riadas del Ebro*. Zaragoza, Servicio Meteorológico Nacional, Centro del Ebro.
- Ayala-Carcedo, F.J., Olcina, J. y Vilaplana, J.M. (2003) *Impacto social y económico de los riesgos naturales en España en el periodo 1990-2000*. Disponible en línea en <http://www.inforiesgos.es/ficheros_comunes/documentos/4.pdf> (consulta 03.11.2007)
- Barry, R.G. y Carleton, A.M. (2001) *Synoptic and Dynamic Climatology*. Londres y Nueva York, Routledge.
- Beguera S., Vicente, S.M. (2006) Mapping the hazard of extreme rainfall by peaks over threshold extreme value analysis and spatial regression techniques. *Journal of Applied Meteorology*, 45-1, 108-124.
- Bescós, A. (2003) *Las inundaciones en el Río Arga. Estudio hidrogeomorfológico*. Tesis doctoral. Alcalá de Henares, Universidad de Alcalá.
- Bluestein, H.B. (1993) *Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Volume II: Observations and Theory of Weather Systems*. Oxford y Nueva York, Oxford University Press.
- C.C.S. (2006) *Estadística de Riesgos Extraordinarios. Serie 1971-2005*. Madrid, Consorcio de Compensación de Seguros,

- Ministerio de Economía y Hacienda. Disponible en línea en <http://www.con-seguros.es/textos/datos/pdf/extra/Esta-distica-R_extraordinarios.pdf> (consulta 03.11.2007).
- C.H.E. (1996) *Plan Hidrológico de la Cuenca del Ebro*. Zaragoza, Confederación Hidrográfica del Ebro. Disponible en línea en <<http://oph.chebro.es/planh.htm>> (consulta 04.2007).
- Camarasa, A.M. (2002) Crecidas e inundaciones. En Ayala-Carcedo, F.J. y Olcina, J. (coords.) *Riesgos naturales*. Barcelona, Editorial Ariel, p. 859-877.
- Cuadrat, J.M. (1999) *El clima de Aragón*. Zaragoza, Caja de Ahorros de la Inmaculada.
- Davy, L. (1978) *L'Ebre, Étude Hydrologique*. Lille, Atelier Reproduction des Thèses.
- Díez, A. (2002) Condicionantes geomorfológicos de las avenidas y cálculo de caudales y calados. En Ayala-Carcedo, F.J. y Olcina, J. (coords.) *Riesgos naturales*. Barcelona, Editorial Ariel, p. 921-952.
- Embid, A., Albiac, J. y Tortajada, C. (2007) La gestión del agua en Aragón. Editorial en Embid, A., Albiac, J. y Tortajada, C. (dirs.) *Gestión del agua en Aragón*. Pamplona, Gobierno de Aragón y Ed. Thomson-Aranzadi, p. 9-12.
- Espejo, F. (2007) Granizo y convección severa. En López, F. y Cuadrat, J.M. (coords.) *Atlas Climático de Aragón*. Zaragoza, Gobierno de Aragón, p. 73-79.
- Font, I. (2000) *Climatología de España y Portugal*. Salamanca, Ediciones Universidad de Salamanca.
- Frigola, J.; Orga, I. (2002) Inondacions d'octubre de 2000. Situació general i anàlisi local a la Conca del Matarranya. *Revista Penell*, 13.
- Fujita, T. T. (1986) Mesoscale classifications: their history and their application to forecasting. En Ray, P. S. (ed.) *Mesoscale Meteorology and Forecasting*. Boston, American Meteorological Society, p. 18-35.
- I.N.M. (2007) *Estudio sobre precipitaciones máximas diarias y periodos de retorno para un conjunto de estaciones pluviométricas seleccionadas de España*. Madrid, Instituto Nacional de Meteorología.
- Ibáñez, A. (2004) *Las crecidas fluviales en el Zadorra: procesos, riesgos y propuestas de ordenación*. Tesis doctoral. Vitoria, Universidad del País Vasco.
- I.G.N., (2005) *Atlas Nacional de España: Climatología. Sección II, Grupo 9*. Madrid, Instituto Geográfico Nacional.
- Jansá, A. (2004) ¿Qué es la gota fría? *Ambienta*, 36, 59-62.
- Maddox, R.A. (1980) Mesoscale convective complexes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 123, 600-621.
- Marín, J.M. (1987) *Hidrología de la Cuenca Alta y Media del Gállego*. Tesis doctoral. Zaragoza, Universidad de Zaragoza.
- Martín Vide, J. (1987) *Interpretación de los mapas del tiempo*. Barcelona, Ketres Editora.
- Martín Vide, J. y Olcina, J. (2001) *Climas y tiempos de España*. Madrid, Alianza Editorial.
- Ollero, A. (1996) *El curso medio del Ebro*. Zaragoza, Publicaciones del Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón.
- Ollero, A. (2000) Crecidas fluviales en la Cuenca del Ebro desde 1980: estado de la cuestión, principales eventos y sistemas de prevención. En *Serie Geográfica*, 9, 151-162.
- Ollero, A. (2007) *Territorio fluvial: Diagnóstico y propuesta para la gestión ambiental y de riego en el Ebro y en los cursos bajos de sus afluentes*. Bilbao, Editorial Bakeaz.

- Orlanski, I. (1975) A rational subdivision for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 56- 5, 527-530.
- Parsons, D.B., Redelsperger, J.L. y Yoneyama, K. (1998) A "New" Mechanism for the Diurnal Variation of Convection over the Tropical Western Pacific Ocean. *Proceedings of the Eighth ARM Science Team Meeting*. Tucson, Atmospheric Radiation Measurement Program. p. 569-573.
- Pellicer, F. y Echeverría, M.T. (1989) *Formas de relieve del interior de la Depresión del Ebro*. Zaragoza, Institución Fernando el Católico.
- Riosalido, R.; Ferraz, J.; Álvarez, E.; Cansado, A.; Martín, F.; Elizaga, F.; Martín, A.; Camacho, J.L.; Mestre, A. (1998) *Estudio meteorológico de la situación del 7 de agosto de 1996 (Biescas)*. Madrid, Instituto Nacional de Meteorología.
- Ruiz de Urrestarazu, E. (1982) *La transición climática del Cantábrico oriental al valle medio del Ebro*. Vitoria, Ediciones de la Diputación Foral de Álava.
- Uppala, S.M. (coord.) (2005) The ERA-40 reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131, 2961-3012.
- Valle, J. del (1996) *El clima del Prepirineo central y occidental aragonés y sus somontanos*. Zaragoza, Publicaciones del Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón.
- W.M.O. (1969) *Estimation of maximum floods: Technical note No. 98*. Ginebra, World Meteorological Organization.