

Universidad de Zaragoza



Centro Politécnico Superior

Proyecto fin de carrera

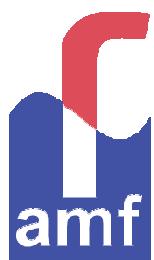
Ingeniería Química: Especialidad Medio Ambiente.

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA EN TÉRMINOS DE SUPERFICIE LIBRE DE ALGUNAS SUBCUENCAS PERTENECIENTES A LA CUENCA DEL EBRO

Autora: Marta Martínez Casas.

Directora: Pilar Brufau García.

Codirector: Guillermo Pérez Dolset.



Área de Mecánica de Fluidos.

Departamento de Ciencia y Tecnología

de Materiales y Fluidos

Zaragoza, Febrero 2011

AGRADECIMIENTOS:

En primer lugar quiero dar mi más sincero agradecimiento a mi coordinadora Pilar. Por darme la posibilidad de realizar este proyecto, por todas las atenciones, por el tiempo perdido conmigo y por su apoyo.

Agradecer también al codirector del proyecto, Guillermo Pérez, por el interés mostrado, por todas las dudas resueltas, por las revisiones realizadas y en general por la gran ayuda prestada.

Por su puesto quiero dar las gracias al Sistema Automático de Información Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Ebro por permitirme realizar este proyecto colaborando con la cesión de datos.

Tengo que dar las gracias también a mis compañeras de la carrera, amigas ante todo, por su apoyo en cada paso, desde el primer examen hasta el proyecto fin de carrera he podido contar con ellas.

Finalmente, no puedo dejar de agradecer la comprensión de mis familiares y amigos, puesto que ellos han sido los que más me han tenido que aguantar en mis malos momentos, enfados y demás sucesos que me han ocurrido a lo largo de este tiempo, en especial a mis hermanos por estar allí siempre y sobre todo a mis padres por su cariño, por apoyo y por su continuo esfuerzo para que yo tuviera siempre las mejores oportunidades.

A TODOS MUCHAS GRACIAS.

Marta Martínez.

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA EN TÉRMINOS DE SUPERFICIE LIBRE DE ALGUNAS SUBCUENCIAS PERTENECIENTES A LA CUENCA DEL EBRO

RESUMEN

Las crecidas de los ríos son un riesgo natural muy importante en muchas zonas del planeta y pueden provocar grandes pérdidas materiales y humanas. Este riesgo también se debe afrontar en muchas de las cuencas fluviales de España, en las cuales se producen lluvias torrenciales que pueden resultar catastróficas sin una adecuada planificación y ordenación del territorio.

En concreto, en la cuenca del Ebro debido a sus dimensiones y a su enorme diversidad altitudinal y climática existe una gran variedad de comportamientos hidrológicos que se ponen de manifiesto en las situaciones extremas y los procesos fluviales de crecida que se producen en sus diferentes subcuencas son muy abundantes.

En este sentido se realiza un análisis detallado de la respuesta hidrológica ante una precipitación para diferentes subcuencas que pertenecen a la cuenca del Ebro. El estudio surge de la necesidad de predecir rápidamente tiempos de llegada y caudales pico en episodios de avenida futuros apoyándonos en el análisis de episodios de avenida históricos y teniendo las subcuencas caracterizadas en función de su comportamiento.

En total se analizan diez subcuencas, éstas son la del Ulzama, la del Alcanadre, la del Bergantes, la del Susía, la del Omecillo, la del Manubles, la del Isábena, la del Leza, la del Cidacos y la del Sotón.

En el estudio de cada subcuenca se seleccionan episodios de avenida a partir del análisis de los datos históricos (desde 1997), recogidos a tiempo real, por estaciones de aforo y pluviométricas. El análisis de episodios se realiza teniendo en cuenta la pluviometría y los caudales de aforo, y a partir de este análisis se establecen relaciones entre estos dos factores. Para ello algunas de las variables estudiadas en cada episodio son:

El tiempo de tránsito (tiempo entre picos) entre el centro de gravedad del hietograma de precipitación y el pico del caudal medido en la estación de aforo, el umbral de precipitación necesario para que en la cuenca comience a generarse escorrentía superficial, el coeficiente de escorrentía, el cual muestra la relación entre el volumen de lluvia caído y el volumen de agua que llega a la estación de aforo, el caudal de pico y la relación con la intensidad de las precipitaciones, el tiempo de concentración, etc.

A partir del análisis de episodios se establecen como conclusiones unas pautas de comportamiento hidrológico en cada una de las subcuencas.

Por último, y teniendo en cuenta que la caracterización de las cuencas constituye un punto de partida perfecto en la calibración de modelos hidrológicos destinados a la modelización de su respuesta hidrológica, se comparan los valores reales de escorrentía y los tiempos de concentración obtenidos a partir del análisis con los valores teóricos estimados mediante el método del número de curva y la fórmula de Témez correspondiente.

MEMORIA

**ANÁLISIS DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA EN TÉRMINOS
DE SUPERFICIE LIBRE DE ALGUNAS SUBCUENCAS
PERTENECIENTES A LA CUENCA DEL EBRO.**

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	1
2 LA CUENCA DEL EBRO.....	4
3 SISTEMA AUTOMÁTICO DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA (SAIH).....	8
1.1 Introducción.....	8
1.2 El SAIH: Objetivos y funcionamiento	8
4 ESTUDIO DE EPISODIOS HISTÓRICOS EN LAS SUBCUENCAS DEL EBRO: Metodología.....	12
4.1 Selección de episodios	13
4.2 Análisis de episodios	14
5 MODELOS DE PREDICCIÓN	22
5.1 Introducción.....	22
5.2 Estimación teórica del tiempo de concentración.....	22
5.3 Estimación del número de curva	23
5.4 Análisis comparativo.....	28
6 CONCLUSIONES	36
7 BIBLIOGRAFÍA	40
ANEXO I: INTRODUCCIÓN A LA HIDROLOGÍA.	
ANEXOII: CUENCA DEL ULZAMA.	
ANEXO III: CUENCA DEL ALCANADRE.	
ANEXO IV: CUENCA DEL BERGANTES.	
ANEXO V: CUENCA DEL SUSÍA.	
ANEXO VI: CUENCA DEL OMECILLO.	
ANEXO VII: CUENCA DEL MANUBLES.	
ANEXO VIII: CUENCA DEL ISÁBENA.	
ANEXO IX: CUENCA DEL LEZA.	
ANEXO X: CUENCA DEL CIDACOS.	
ANEXO XI: CUENCA DEL SOTÓN.	
ANEXO XII: PERFIL LONGITUDIANAL Y ALTIMETRÍA DE LOS RÍOS.	
ANEXO XIII: MÉTODO SCS (Soil Conservation Service, Department of Agriculture).	

1. INTRODUCCIÓN

En el mes de mayo de 1997, la Dirección General de Protección Civil distribuyó una circular para la elaboración y actualización del Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas. El objetivo fundamental era la revisión, actualización y ampliación del Catálogo de Inundaciones Históricas que realizó la Comisión Técnica de Emergencias por Inundaciones entre 1983 y 1988, a fin de elaborar posteriormente la base nacional de datos sobre zonas inundables. Este es el punto de partida que nos ha impulsado a realizar este proyecto fin de carrera.

La realización de este trabajo supone un punto de partida para ampliar el conocimiento de las inundaciones en la cuenca del Ebro, su relación con la climatología (precipitaciones) de la zona, fundamentalmente mediante el estudio y análisis de la evolución histórica de las precipitaciones e inundaciones en las subcuenca que la forman; y de las relaciones que existen entre ambas variables. Dado el carácter de estudio regional y el gran volumen de datos que han sido analizados, puede constituir una buena base de información para posteriores estudios planteados en este mismo sentido. Los objetivos por tanto se han centrado en el análisis exhaustivo de inundaciones históricas caracterizándolas por parámetros cuantitativos hidrológicos y la interpretación de estos datos a nivel de subcuenca.

La hidrología abarca todas las fases del agua en la tierra y tiene una gran variedad de aplicaciones prácticas, entre ellas se pueden encontrar labores como el diseño y operación de estructuras hidráulicas, abastecimiento del agua, tratamiento y disposición de aguas residuales, irrigación, drenaje, generación hidroeléctrica, control de inundaciones, navegación, erosión y control de sedimentos y de salinidad, disminución de la contaminación, uso recreacional del agua y protección de la vida terrestre y acuática.

Los cambios en la distribución, la circulación o la temperatura de las aguas en la Tierra pueden tener efectos de largo alcance. La actividad humana también puede causar algunos cambios. Los humanos labran el suelo, riegan cultivos, fertilizan tierras, deforestan bosques, bombean aguas subterráneas, construyen presas, expulsan desechos en ríos y lagos, y realizan muchas otras actividades constructivas o destructivas que afectan a la circulación y a la calidad del agua en la naturaleza [Chow et al. 1994].

La hidrología fluvial se centra en el estudio de la dinámica de los ríos, una de las zonas donde más incidencias se pueden producir por los movimientos del agua en relación con la tierra es una cuenca fluvial siendo esta definida como un área drenada por ríos y afluentes y relacionando el movimiento del agua sobre la superficie mediante el término de escorrentía que en sentido amplio se puede definir como el movimiento de un flujo bajo la influencia de la gravedad [Llamas 1993].

La dinámica fluvial hace referencia a los complicados procesos mediante los cuales la acción de los ríos modifica de alguna manera el relieve terrestre y su propio trazado, es decir trata la metamorfosis de los sistemas fluviales (migraciones, cambios de trazado de los cauces, orillas erosionadas o con depósitos sedimentarios, etc.) tanto en su componente espacial como en su evolución temporal. Esto se puede entender como que existe un ajuste continuado de los sistemas fluviales tanto en el espacio como en el tiempo a las oscilaciones de los caudales de sólidos y líquidos, lo que se traduce en una movilidad, la cual es un mecanismo de regulación y el aspecto fundamental de una dinámica ecológica intensa, responsable de la riqueza y diversidad de estos sistemas naturales.

Las crecidas de los ríos (momentos en los que se producen aumentos bruscos del caudal) son eventos aceleradores del sistema de cambio en los sistemas fluviales pudiendo producir, en un

solo día, más modificaciones tanto en los paisajes como en la geomorfología que en una década de funcionamiento hidrológico normal. Así pues las crecidas son episodios absolutamente necesarios para el sistema. Sin crecidas la dinámica fluvial se reduce considerablemente y compromete con ello la supervivencia de todos los ecosistemas integrados en él [Brierley Fryirs 2005].

El problema surge en el progreso, que sobre todo se ha producido a lo largo del último siglo, en el que se ha originado un gran desarrollo agrícola, industrial y económico, que junto a un crecimiento demográfico acelerado ha provocado el asentamiento de poblaciones y la realización de obras sin tener en cuenta la dinámica fluvial de los ríos. Por lo tanto, además del cambio climático, la gestión inadecuada de los espacios fluviales, la construcción de edificios en zonas inundables y el aumento del número de personas en estas zonas, son factores que están haciendo aumentar los riesgos de inundaciones y los daños consiguientes [Llamas 1993].

En definitiva, la relación entre el hombre y el medio en torno al agua, hoy en día, presenta dos facetas, recurso-riesgo y con el paso del tiempo lejos de disminuir los riesgos naturales, han aumentado debido a la concentración de la población y su actividad en zonas expuestas al riesgo [Ayala-Carcedo y Olcino 2002].

La dinámica de un río está estrechamente relacionada con su régimen fluvial, los regímenes fluviales dependen en gran medida del factor climático, de la cuantía y tipo de precipitaciones que alimenta a nuestros ríos. Desde esta perspectiva se pueden distinguir ríos de alimentación pluvial, nival y mixta (nivo-pluvial o pluvio-nival). El régimen pluvial es el más abundante en España y está condicionado por precipitaciones en forma de lluvia. Dentro del régimen pluvial se diferencia entre régimen pluvial oceánico, característico de los ríos del norte de la Península Ibérica donde predomina el clima atlántico y se dan precipitaciones elevadas y regulares, y el régimen pluvial mediterráneo, en un contexto climático de precipitaciones irregulares, con una pronunciada sequía estival y frecuentes lluvias de carácter torrencial que presenta un acusado estiaje veraniego y aguas máximas equinocciales. Los ríos de régimen nival suelen encontrarse en las zonas montañosas y son alimentados con el agua de las nieves retenidas durante el invierno lo que provoca al final de la primavera o al principio del verano un aumento del caudal. Los regímenes mixtos combinan ambos tipos de alimentación nival y pluvial, nombrándose en primer lugar el tipo de precipitación que aporta más recursos.

Estos regímenes sencillos son propios de ríos de cuencas reducidas con unas condiciones uniformes. Pero los grandes ríos españoles se caracterizan por tener unos regímenes fluviales complejos, teniendo cambios y diversidad en el tipo y modelo de regímenes fluviales a lo largo de su recorrido. Concretamente en España y en el entorno mediterráneo de Europa, la dinámica fluvial y los riesgos hidrológicos y geomorfológicos que derivan de ella, constituyen un problema medioambiental y socioeconómico que se debe afrontar en un gran número de cuencas.

Las regiones mediterráneas se caracterizan por marcados contrastes estacionales. Sus cuencas fluviales se caracterizan por tener cursos semipermanentes o efímeros de agua, pero también por importantes crecidas ocasionales asociadas a lluvias torrenciales [Conacher y Sala 1998], que resultan catastróficas sin una adecuada planificación y ordenación del territorio. Pese a ello, actualmente aún existe una carencia importante de información sobre la dinámica fluvial de crecidas de los cursos de agua y, sobre todo, una carencia de metodologías de estudio global e integrado, lo cual dificulta la planificación y gestión del dominio público hidráulico. Además, el control de la dinámica de los ríos es todavía más incierto bajo un escenario de cambio climático y cambios acelerados de los usos del suelo [Burlando et. al 1997], con un abandono progresivo del medio rural.

La tragedia de Biescas [Batalla y Sala 1997; Batalla et al. 1999], por ejemplo, puso de manifiesto la necesidad de un mejor conocimiento de la dinámica fluvial como base para una gestión adecuada que permita prevenir los riesgos naturales e implicaciones ambientales que conllevan. En este sentido, en este proyecto, se va realizar un análisis pormenorizado de la respuesta hidrológica de algunas de las subcuencas pertenecientes a la cuenca del Ebro. Este estudio surge de la necesidad de predecir rápidamente tiempos de llegada y caudales máximos en episodios de avenida futuros apoyándonos en episodios de avenida históricos y se realiza con la colaboración del Sistema Automático de Información Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Ebro (SAIH Ebro).

La respuesta hidrológica de una cuenca de drenaje es la consecuencia de la entrada de precipitación al sistema y su transformación en escorrentía, de tal forma que, con el objeto de conocer mejor la respuesta hidrológica de algunas de las subcuencas que forman parte de la cuenca del Ebro, en primer lugar para cada subcuenca estudiada se seleccionan los episodios de crecida más relevantes acontecidos desde que existen datos del SAIH Ebro (1997) y se analizan, por un lado, los caudales observados por la estación de aforo y los datos de precipitación registrados en las redes pluviométricas. Debido a que la respuesta hidrológica de una cuenca se refleja en su hidrograma de salida, para el análisis de cada episodio se realizará la representación conjunta de los hidrogramas de caudal y de los hietogramas de precipitación. De esta manera se intentará apreciar la distribución temporal del caudal generado por el evento de precipitación y se hallarán diferentes variables tales como el caudal pico (Q_{\max}), el tiempo de llegada del pico (t_{pico}), los coeficientes de escorrentía, el tiempo de concentración de la subcuenca, etc.

En el capítulo 4 de la memoria se describe el proceso llevado a cabo para la selección de los episodios en cada subcuenca estudiada y la manera de abordar el análisis de estos, las diferentes variables estudiadas en cada episodio y la manera de obtenerlas. En total, se analizan diez subcuencas: la del río Ulzama, la del Alcanadre, la del Bergantes, la del Susía, la del Omejillo, la del Manubles, la del Isábena, la del Leza, la del Cidacos y la del río Sotón. A partir de dicho análisis, se trata de inferir unas pautas de comportamiento, desde el punto de vista hidrológico, las cuales ayudarán a evaluar la bondad de las predicciones hidrológicas llevadas a cabo por el Sistema de Ayuda de Decisión (SAD) del SAIH Ebro, a partir de unas lluvias previstas por los servicios meteorológicos, en episodios de crecida futuros. Cada subcuenca analizada se adjunta en un Anexo. En ellos se muestra el estudio realizado así como las conclusiones que caracterizan su comportamiento hidrológico, las cuales son extraídas en función de los resultados obtenidos del análisis de los episodios.

Por otro lado, debido a que estas caracterizaciones de las subcuencas se pueden considerar un punto de partida perfecto para la revisión de las pautas de comportamiento obtenidas a partir de modelos hidrológicos, en este sentido en el capítulo 5 de la memoria se caracteriza de forma teórica cada subcuenca, mediante el número de curva y el tiempo de concentración calculado según la fórmula de Témez y se contrastan estos datos teóricos con los obtenidos en el análisis.

Por último, las conclusiones a las que se ha llegado tras el análisis de las subcuencas y la comparación de los resultados teóricos obtenidos para poder utilizar modelos hidrológicos se muestran en el capítulo 6.

2. LA CUENCA DEL EBRO

La cuenca del Ebro es la cuenca hidrográfica más extensa de España. Está situada al noreste de la Península Ibérica, limitando por el norte con los montes Cantábricos y los Pirineos, por el sureste con el Sistema Ibérico y por el este con la cadena Costero-Catalana. En el centro queda deprimido el amplio sector correspondiente a la depresión del Ebro. Es la mayor cuenca mediterránea de la Península Ibérica. Se configuró durante el Terciario y el Cuaternario. Entre los datos básicos de la cuenca podemos destacar sus 600mm de precipitación media, su 65% de superficie no labrada, su población de 2,8 millones de habitantes, que implica una baja densidad de 32 hab/km², y una demanda de agua anual que supera los 7000Hm³, de los que más de 6300Hm³ se requieren para el regadío, siendo los restantes para usos urbanos e industriales [Ollero 2006]. Cuestión muy significativa es la gran disimetría existente entre los afluentes de ambas márgenes, tanto por sus longitudes, perfiles y extensión de sus cuencas, como por los volúmenes de agua circulantes siendo los de la margen izquierda procedentes de las alineaciones pirenaicas, los que aportan la mayor parte del agua al Ebro.

Tiene una forma aproximadamente triangular y ocupa una superficie total de 85.362 Km², de los cuales 502 Km² están en Francia, 445 Km² en Andorra y el resto en España. Está drenada por el río Ebro, que es el río más caudaloso de la Península Ibérica y el segundo más largo, con una longitud de 910 Km, que discurre en sentido noreste-sureste, desde las montañas Cantábricas (Picos de Europa) hasta el Mediterráneo donde desemboca formando un delta [<http://www.chebro.es>].

El Ebro atraviesa las comunidades autónomas españolas de Cantabria, Castilla y León, Castilla la Mancha, La Rioja, Navarra, Aragón y Cataluña. La cuenca hidrográfica del Ebro también abarca territorios del País Vasco y de La Comunidad Valenciana. La siguiente figura muestra la situación geográfica de la cuenca del Ebro dentro de la Península Ibérica así como una ampliación de la cuenca donde se puede observar entre otras cosas las comunidades autónomas que forman parte de la cuenca hidrográfica del Ebro.

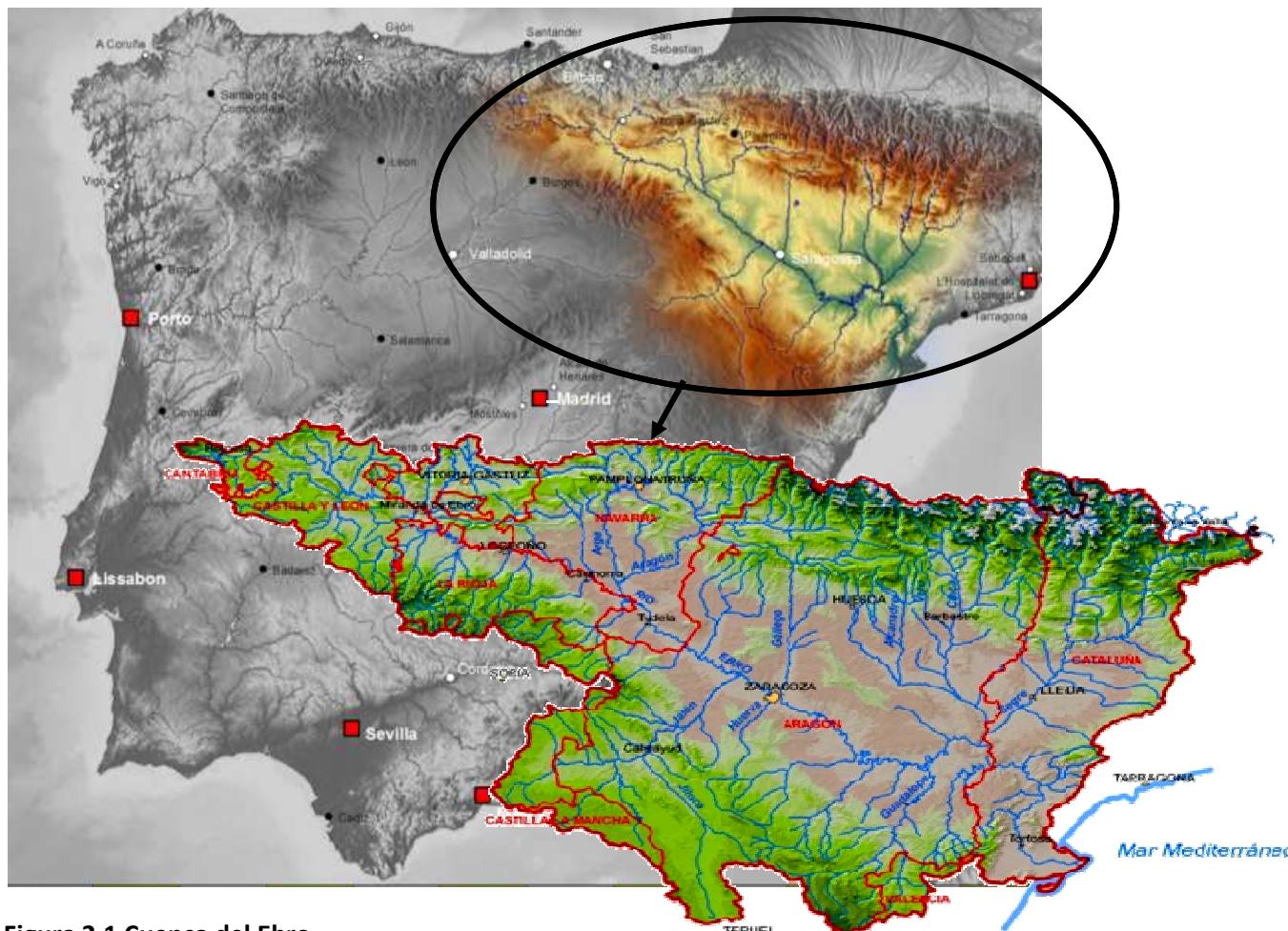


Figura 2.1 Cuenca del Ebro.

Debido a su gran extensión, en la cuenca del Ebro se tiene una geología muy variada y no existe un clima homogéneo, pudiéndose diferenciar grandes rasgos de tres zonas climáticas:

- Zona cantábrica con temperaturas suaves y precipitaciones abundantes y uniformes a lo largo de todo el año (Figura 2.2, clima húmedo u oceánico).
- Depresión central, en la cual se enmarca alrededor del 70% de la superficie de la cuenca y en la que se tiene un clima continental, semiárido en algunas zonas, con importantes variaciones térmicas y pluviales con los cambios de estación (Figura 2.2, clima semiárido y continental).
- Zona mediterránea que se caracteriza por suaves temperaturas y escasas precipitaciones medias (Figura 2.2, clima mediterráneo).

A estas tres zonas climáticas principales hay que superponer los efectos del clima de montaña en las áreas más elevadas de la cuenca, como en la totalidad de los Pirineos, buena parte de la Cordillera Ibérica (sobre todo en sus extremos occidental y oriental) y la parte más occidental de los Montes Cantábricos de la cuenca.

En la siguiente figura se ubican los diferentes climas con los que nos encontramos en la cuenca del Ebro:

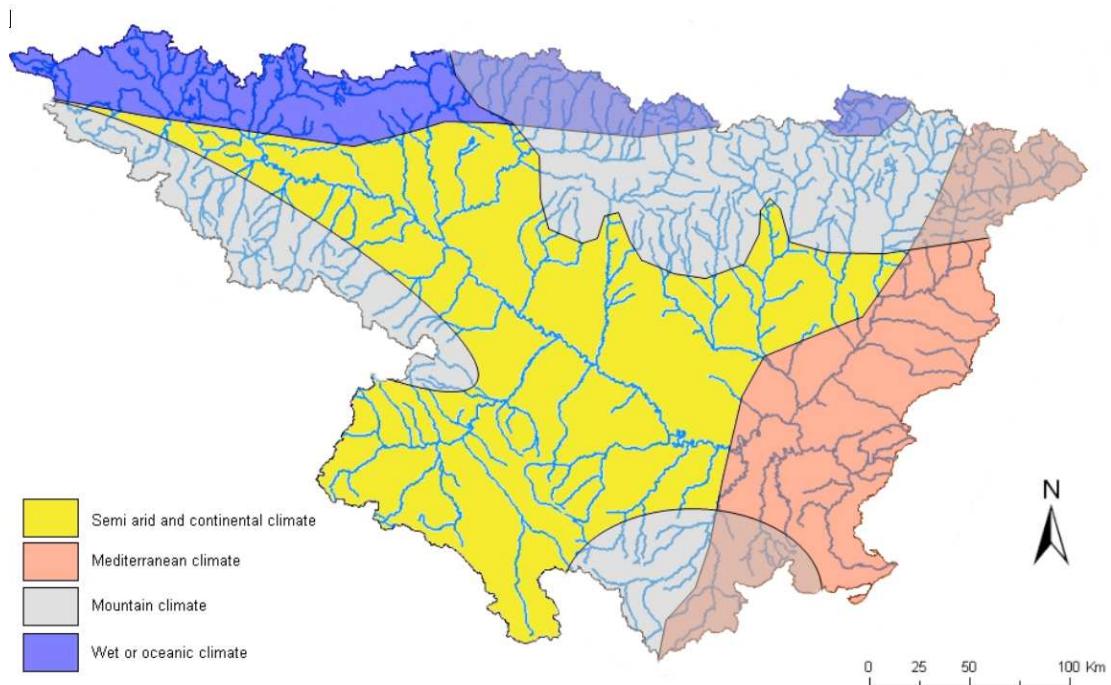


Figura 2.2 Mapa climático de la cuenca del Ebro.

El organismo de gestión, regulador y mantenedor de las aguas y riesgos en la cuenca del Ebro es la Confederación Hidrográfica del Ebro, la CHE, que es un organismo autónomo dependiente del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Sus funciones son muy variadas y se pueden englobar en los cinco puntos siguientes:

- Elaboración del plan hidrológico de la cuenca, así como su seguimiento y revisión.
- La administración y control del dominio público hidráulico.
- La administración y control de los aprovechamientos de interés general que afectan a más de una comunidad autónoma.
- El proyecto de construcción y de explotación de las obras realizadas con cargo a fondos propios del organismo y las que sean encomendadas por el Estado.
- Las que deriven de los convenios con comunidades autónomas, corporaciones locales y otras entidades públicas o privadas, o de los suscritos con los particulares [<http://www.oph.chebro.es>].

En el ámbito de actuación de la CHE está la parte Española de la cuenca del Ebro y del Garona, además de la cuenca endorreica de Gallocanta, lo que supone una superficie total de 85.534 Km².

Como en el resto de España, en la cuenca del Ebro las inundaciones son un riesgo muy extendido. Una de las muchas actuaciones que se han realizado a lo largo de los años para paliar esta problemática es la implantación de un Sistema Automático de Información Hidrológica (véase capítulo 3), SAIH Ebro, cuyas obras para su puesta en marcha comenzaron en 1989 y terminaron en 1997 aunque desde entonces se han seguido realizando obras para así mejorar la red de información [<http://www.chebro.es>].

El SAIH Ebro funciona como el resto de sistemas de información hidrológica a tiempo real (véase capítulo 3) y tiene repartidas por toda la cuenca, 210 aforos en ríos, 63 embalses, 322 pluviómetros, 185 medidores de temperatura ambiente, 37 estaciones meteorológicas, 234 aforos en canal en los sistemas de riego, 27 estaciones para determinar la calidad del agua y 35 estaciones dedicadas a otros usos. Estas estaciones envían información a la correspondiente estación repetidora (en total hay 93 en toda la cuenca), que a su vez los envían a los puntos de control (13 en toda la cuenca) para que al final lleguen al centro de proceso de la cuenca, situado en Zaragoza [<http://195.55.247.237/saihebro>].

3. SISTEMA AUTOMÁTICO DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA (SAIH)

3.1 Introducción

Las inundaciones son el riesgo natural de mayor impacto mundial y originan el mayor número de muertes y pérdida de bienes que cualquier otro desastre natural.

En el caso de las zonas mediterráneas, este hecho es particularmente importante debido al carácter repentino de las crecidas y la creciente ocupación humana de vegas y riveras fluviales. En España, según las estadísticas sobre los Riesgos Extraordinarios del Consorcio de Compensación de Seguros, los daños por inundaciones se estiman de media en 800 millones anuales [Ayala-Carcedo y Olcino 2002]. Por lo cual, debido a los cuantiosos costes económicos, humanos y sociales que provocan las crecidas, surge la necesidad de incorporar medidas eficaces de previsión, predicción y control de las mismas. Sin embargo, esta tarea no resulta sencilla tanto por la rápida respuesta de las cuencas que implica la disponibilidad de muy poco tiempo para avisar a la población expuesta al riesgo, como por la escasa información disponible en los momentos clave.

Ante esta situación, y tras las trágicas inundaciones en el Levante y el norte de España al principio de la década de los 80 del siglo pasado, aparece la necesidad de establecer Sistemas Automáticos de Información Hidrológica (SAIH) que permitan disponer de datos hidrológico-hidráulicos en tiempo real e incluso prever, mediante modelos de simulación convenientemente contrastados, el comportamiento futuro de las cuencas.

3.2 El SAIH: Objetivos y funcionamiento

Los Sistemas Automáticos de Información Hidrológica (SAIH) de las Confederaciones Hidrográficas son el resultado de un Programa de la Dirección General del Agua (DGA) del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Son sistemas de información a tiempo real que aportan información relativa a los niveles y caudales de los principales ríos y afluentes, lluvia en numerosos puntos, nivel y volumen embalsado en presas, etc. [<http://www.marm.es>].

A grandes rasgos se puede decir que los principales objetivos de los SAIH son:

- La mejora en la gestión de los recursos hídricos.
- El seguimiento y la previsión de las avenidas.
- La ayuda a la explotación de infraestructuras hidráulicas en situaciones de avenida.
- La mejora de la base de datos hidrometeorológicos.
- El seguimiento de variables medioambientales, por ejemplo la vigilancia de los niveles de contaminación de las aguas.

A lo largo de los años dentro de los sistemas SAIH se han implantado los Sistemas de Ayuda de Decisión (SAD). Estos sistemas surgen como una herramienta complementaria a los SAIH, que partiendo de los datos recogidos a tiempo real y de otros datos complementarios (previsiones meteorológicas, datos de nieve, etc.) y utilizando modelos matemáticos son capaces de modelizar la respuesta hidrológica de la cuenca ante la previsión de un fenómeno meteorológico adverso, con el fin de prevenir inundaciones.

Funcionamiento

Cada SAIH trabaja de manera autónoma en cada una de las Confederaciones Hidrográficas, las cuales disponen de una red de medida y control a distancia que transmite y procesa datos periódicamente.

Los elementos principales de un SAIH son: los puntos de control, el sistema de comunicaciones (repetidores y puntos de concentración) y el centro de proceso de cuenca. Los diferentes SAIH cuentan con estaciones de control posicionadas en diferentes sitios que recogen los datos de campo y que se dividen en los siguientes tipos de puntos de control:

- Aforos (en ríos y canales): Cuyo objetivo es el de calcular los caudales circulantes, en general a partir de medición de niveles.
- Embalses: Cuya función es conocer el agua embalsada, la situación de los sistemas de evacuación y el cálculo de los caudales desaguados.
- Pluviómetros: Los cuales proporcionan datos de precipitación.
- Medidores de temperatura ambiente, pluvionivómetros, telenivómetros: Que ayudan a conocer el tipo de precipitación (sólida o líquida) y a seguir el progreso de las reservas de nieve.
- Estaciones meteorológicas: Con objeto de medir fenómenos meteorológicos.
- Sistemas de riego: Cuya función es el control de los niveles y caudales circulantes solicitados por las comunidades de regantes en los diferentes sistemas de riego.
- Calidad del agua: Estaciones de alerta que realizan la medida de distintos parámetros físico-químicos.
- Otros usos: Control de piscifactorías, centrales hidroeléctricas y pozos piezométricos.

Las estaciones de control recolectan los datos de campo y periódicamente mediante repetidores se envían los datos a los puntos de concentración y posteriormente al centro de proceso de la cuenca que los almacena y procesa, soportando las acciones de configuración, mantenimiento, explotación y supervisión de toda la red. En la siguiente figura se muestra de manera esquemática el funcionamiento del SAIH.

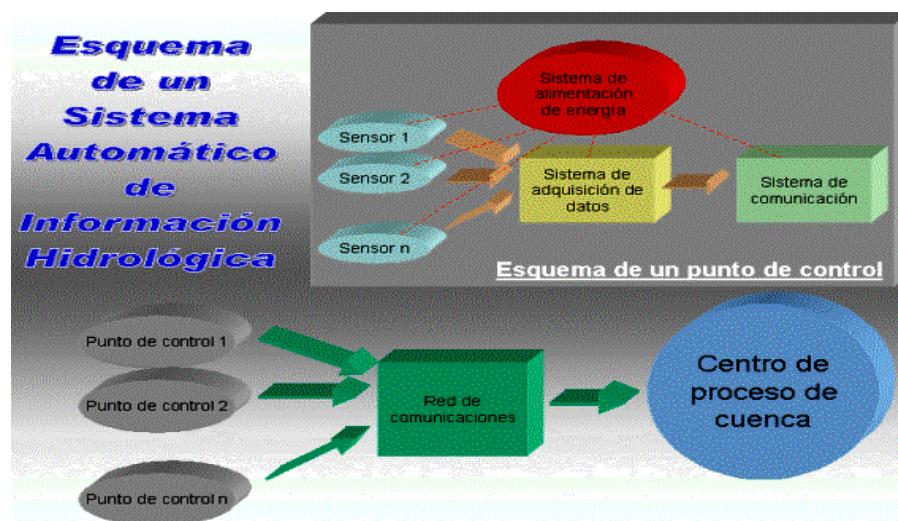


Figura 3.2.1 Esquema de funcionamiento del SAIH.

Para el estudio de los episodios de avenida, en este proyecto se han utilizado datos en aforos y en pluviómetros.

Los aforos son sistemas cuya función es medir el caudal circulante por un cauce. Para medir el caudal se pueden utilizar métodos directos que suelen ser muy costosos y difíciles por lo que habitualmente se utilizan métodos indirectos basados en el cálculo del caudal circulante a partir del nivel del agua que se tiene en la estación de aforo. Existen diferentes métodos para medir el nivel del agua siendo los más comunes los de boyas y contrapeso, los piezorresistivos, los de neumático compacto, los de ultrasonidos y los de radar [<http://www.marm.es>].

En la siguiente figura se muestra un aforo que mide el caudal de manera indirecta:

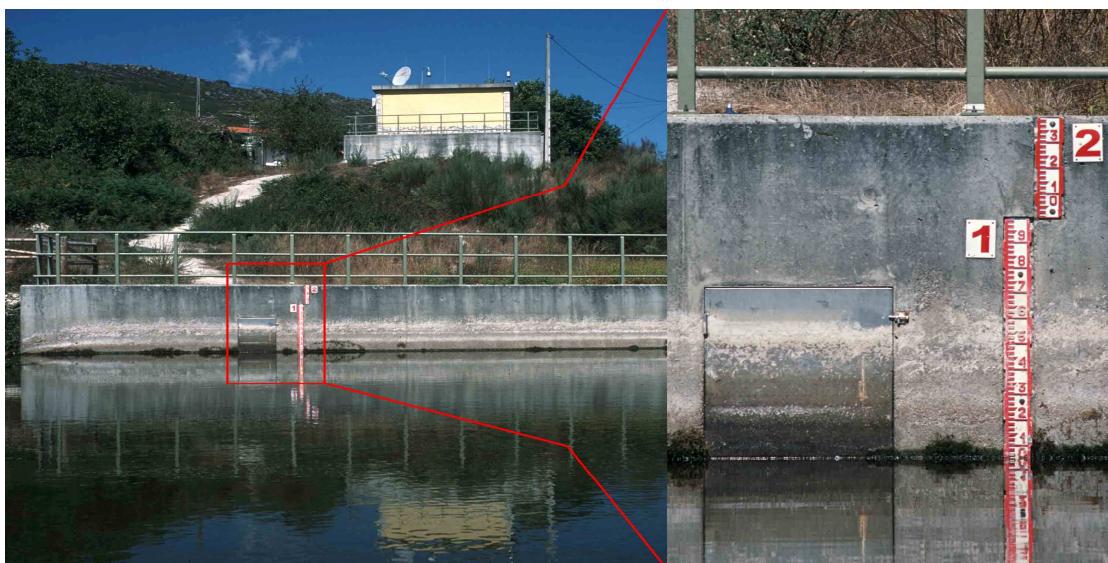


Figura 3.2.2 Aforo tipo usado por los SAIH.

Los datos de caudal utilizados para este proyecto proceden de estaciones de aforo que miden el nivel del agua mediante el sistema boyas y contrapeso. Los elementos que componen un sistema de este tipo son: un pozo tranquilizador donde se encuentra un flotador que permite el registro exacto del nivel del agua y un limnómetro que es un medidor accionado por el flotador y que está sobre la superficie del agua y que asciende o desciende con ella. La variación del nivel del agua es detectada por el limnómetro y envía la señal a la estación remota donde se almacena y las envía periódicamente a los puntos de concentración y de allí al centro de proceso de la cuenca.

Los pluviómetros son aparatos que sirven para medir la lluvia en un lugar determinado. Para ello, el agua de lluvia se recoge a través de una superficie cónica y pasa a través de un balancín con dos recipientes. Las gotas de agua caen en uno de los dos recipientes hasta que lo llena y vuela el balancín, dando un pulso, vaciando el agua y quedando preparado para comenzar el llenado del otro recipiente. La estación remota controla el número de impulsos periódicamente (por ejemplo, cada cinco minutos) y recogerá estos datos también periódicamente (por ejemplo, cada quince minutos) para enviarlos al centro de proceso de la cuenca [<http://195.55.247.237/saihebro>].

En la siguiente figura se muestra un pluviómetro:



Figura 3.2.3 Pluviómetro tipo usado por los SAIH.

Este proyecto se realiza con la colaboración del SAIH Ebro y se realiza el estudio de avenidas históricas, producidas en diferentes subcuencas de la cuenca del Ebro, con objeto de ayudar a reducir en episodios futuros los daños que podrían causar

4. ESTUDIO DE EPISODIOS HISTÓRICOS EN LAS SUBCUENCIAS DEL EBRO: Metodología

Los conceptos de partida para el estudio de las subcuenca son: escorrentía, hidrogramas e hietogramas.

En sentido amplio la escorrentía es la circulación de agua producida en un cauce superficial; La escorrentía consta de varios componentes y se puede decir que en un momento dado el caudal en una red de drenaje procede de: arroyamiento superficial (escorrentía superficial), precipitación sobre el propio cauce, flujo hipodérmico (parte de la precipitación que se infiltra en suelo y circula por él a una ligera profundidad) y aportaciones de flujo subterráneo [Ward y Robinson 1990] (véase Anexo I dónde se detallan estos conceptos).

La variación del caudal circulante con respecto al tiempo se determina en un punto de la corriente mediante estaciones de aforo (véase punto 3.2). Los hidrogramas son representaciones de la variación del caudal en el tiempo y en ellos se refleja el comportamiento y el estado de una cuenca. Los hidrogramas estudiados en este proyecto representan episodios en los que el caudal circulante por un aforo aumenta bruscamente como producto de un aguacero. Las precipitaciones varían en el espacio y en el tiempo y se miden a través de pluviómetros que registran datos periódicos de precipitación (véase punto 3.2). Un hietograma representa la lluvia acumulada o la lluvia incremental respecto a intervalos discretos de tiempo.

Uno de los objetivos de este trabajo es analizar la escorrentía que se genera al producirse una precipitación determinada (estudiar el hidrograma generado por un hietograma) para diferentes subcuenca del Ebro y así poder inferir unas pautas de comportamiento desde el punto de vista hidrológico.

Las subcuenca analizadas se han seleccionado teniendo en cuenta los datos existentes y la calidad de los mismos. En este sentido no se han analizado subcuenca en las que se han registrado pocos episodios de crecida, así como subcuenca en las que no se puede establecer una correlación adecuada entre los datos de precipitación y caudal, y tampoco aquellas en las que los fenómenos nivales son muy relevantes debido a que estos dificultan el análisis de los episodios, sobre todo si no se cuenta con datos de temperatura. En base a esto se han seleccionado diez subcuenca para analizarlas detalladamente, éstas son: la del Ulzama, la del Alcanadre, la del Bergantes, la del Susía, la del Omenillo, la del Manubles, la del Isábena, la del Leza, la del Cidacos y la del Sotón.

En esta sección se detalla el procedimiento llevado a cabo en el análisis de cada una de las subcuenca estudiadas.

Cada subcuenca analizada consta de una estación de aforo en la que se va registrando el caudal (m^3/s) y de al menos dos pluviómetros, en los que se registran precipitaciones (mm ó l/m^2).

4.1 Selección de episodios

Los datos de partida proceden de la base histórica del SAIH Ebro que desde su existencia, 1997, recoge los valores registrados en las diferentes estaciones cada 15 minutos y los va almacenando por años.

El primer paso en el análisis de una subcuenca es ubicar el total de episodios acontecidos para lo que se debe representar la evolución en el tiempo tanto del caudal como de las precipitaciones registradas en las correspondientes estaciones. Como los datos son recogidos cada 15 minutos, para cada año se tienen alrededor de 35.000 valores de caudal, y 35.000 valores de precipitación en cada uno de los pluviómetros situados en la determinada subcuenca y debido a que las representaciones se realizan con el programa Microsoft Office Excel, en el que el número máximo de datos que se pueden utilizar en una serie para un gráfico bidimensional es de 32.000; y a que si se realiza una división mayor del año no se pueden apreciar con claridad todos los episodios de crecida acaecidos en la subcuenca, una vez recibidos los datos por años se procede a la separación de estos por meses y se representa la evolución de los datos quince-minutales tanto del caudal como de las precipitaciones para cada mes.

Una vez realizadas todas las representaciones mensuales ya se puede situar el total de episodios de avenida que han sido registrados a lo largo de los años y de entre ellos se seleccionan los más relevantes para posteriormente analizarlos. El número de episodios analizados tiene que ser el suficiente como para poder obtener conclusiones sobre la respuesta hidrológica a la precipitación en esa determinada subcuenca.

En la siguiente figura, a modo de ejemplo, se muestra la representación obtenida (hidrograma e hietograma), para el mes de Abril del 2008 en la subcuenca de río Alcanadre, en el cual se produjeron diferentes crecidas y se seleccionó una de ellas para posteriormente analizarla detalladamente:

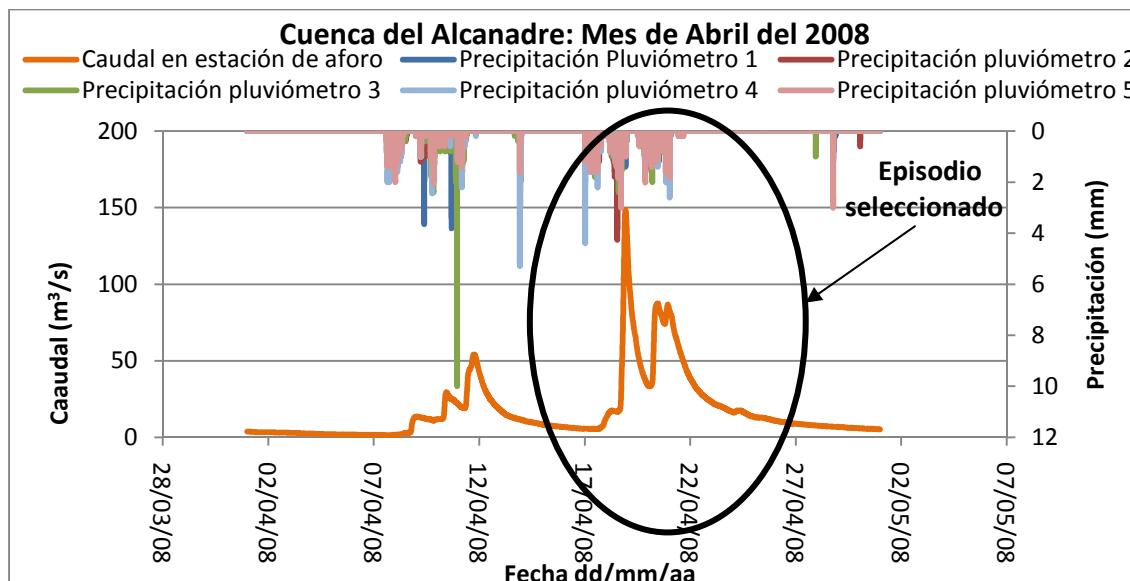


Figura 4.1.1 Caudal y precipitación registrados en las estaciones. Cuenca del Alcanadre, Abril del 2008.

Como se puede observar en la figura anterior, en Abril del 2008 se produjeron 2 episodios en el río Alcanadre de los cuales se selecciona el último para analizarlo por ser de mayor valor cuantitativo el caudal registrado en la estación de aforo.

4.2 Análisis de episodios

Para cada subcuenca, una vez ubicados en el tiempo los episodios más relevantes, y así poder analizar cada episodio, se separan los datos registrados en las estaciones para el intervalo de tiempo en el que se produjo y se representa conjuntamente el hidrograma y el hietograma del episodio.

En general, se suelen obtener dos tipos diferentes de hidrogramas: hidrogramas simples (véase figura 4.2.1) en los que sólo se produce un máximo de caudal e hidrogramas complejos, los cuales tienen varios máximos (véase figura 4.2.3) y para su análisis se procede a la separación en hidrogramas simples.

Análisis de hidrogramas simples

Una vez aislados los episodios a analizar, el caudal registrado en las estaciones de aforo está en unidades de m^3/s y las precipitaciones registradas en los pluviómetros en mm (lo que es lo mismo que l/m^2). Para poder trabajar con el caudal registrado en la estación de aforo, en primer lugar hay que calcular el volumen, en Hm^3 , que circula por la estación de aforo cada 15 minutos. Para ello se multiplica el dato quince-minutal registrado en la estación de aforo por el tiempo en segundos, 60×15 , y se divide por 1000000 para pasar a Hm^3 . Por ejemplo, si el caudal registrado en la estación de aforo es de $30 \text{ m}^3/\text{s}$ la operación realizada es:

$$\text{Volumen } [\text{Hm}^3] = \frac{30 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot (60 \cdot 15) [\text{s}]}{1000000 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{Hm}^3} \right]} = 0,027 \text{ Hm}^3$$

Luego, se suman todos los volúmenes quince-minutales para calcular el volumen total registrado en la estación de aforo durante ese episodio.

A la hora de trabajar con las precipitaciones, se comienza calculando la precipitación acumulada en cada pluviómetro durante todo el episodio; es decir, el total de milímetros de lluvia (causantes de la avenida) que ha registrado cada pluviómetro. En este caso, para cada pluviómetro se suman todos los datos quince-minutales de la precipitación registrada.

Una vez que se tienen las precipitaciones acumuladas, se procede a calcular la lluvia media para toda la subcuenca durante el episodio. Para ello, se multiplica la precipitación total registrada en cada pluviómetro por un coeficiente de proporcionalidad, el cual en general varía en función del área cubierta por cada pluviómetro, considerando como el 100 % la superficie total de la subcuenca.

Una vez calculada la lluvia media se obtiene el volumen total de precipitación caído sobre la subcuenca durante el episodio en cuestión. Para ello, se multiplica la lluvia media, l/m^2 , por la superficie de la subcuenca en m^2 y se divide entre 0,00000001 para obtener el volumen en Hm^3 .

Una vez realizados estos cálculos se procede a calcular y a estimar las variables más significativas en un episodio de avenida.

Para facilitar su compresión, a continuación se detalla paso por paso los cálculos explicados anteriormente, qué variables son estudiadas y el procedimiento mediante el cual son obtenidas para uno de los episodios analizados en la subcuenca del Alcanadre, y en el cual al representar el caudal registrado en la estación de aforo se obtiene un hidrograma simple, episodio ocurrido en Julio del 2001.

La subcuenca del Alcanadre en Julio del 2001 contaba con una estación de aforo a la salida de la misma, en Peralta de Alcofea (A033) y de cinco pluviómetros situados dentro de la subcuenca o en sus proximidades, en Barbastro (A095), en Coscollar (P028), en Boltaña (A040), en el embalse de Vadiello (E041) y en Alcofea (A032) [<http://195.55.247.237/saihebro>].

El volumen registrado en la estación de aforo y la precipitación registrada en cada pluviómetro, calculados como se ha indicado anteriormente son:

Precipitaciones acumuladas:

- En Barbastro (A095) → 1mm
- En Coscollar (P028) → 66,6mm
- En Boltaña (A040) → 183,2mm
- En el embalse de Vadiello (E041) → 70,5mm
- En Alcofea (A032) → 10,5mm

Volumen total: En Peralta de Alcofea (A033) → 5,47Hm³

Debido a que en esta subcuenca se considera que el área cubierta por cada pluviómetro es similar, se calcula la lluvia media de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Lluvia media} = & [\text{Precip. A095(mm)} + \text{Precip. P028(mm)} + \text{Precip. A040(mm)} \\ & + \text{Precip. E041(mm)} + \text{Precip. A032(mm)}] \cdot \frac{1}{5} \end{aligned}$$

Siendo:

- Precip.A095 (mm): Precipitación total, en mm (l/m²) registrada en el pluviómetro en Barbastro (A095).
- Precip.P028 (mm): Precipitación total, en mm (l/m²) registrada en el pluviómetro en Coscollar (P028).
- Precip.A040 (mm): Precipitación total, en mm (l/m²) registrada en el pluviómetro situado en Boltaña (A040).
- Precip.E041 (mm): Precipitación total, en mm (l/m²) registrada en el pluviómetro situado en el embalse de Vadiello (E041).
- Precip.A032 (mm): Precipitación total, en mm (l/m²) registrada en el pluviómetro situado en Alcofea (A032).

-1/5: El coeficiente de proporcionalidad utilizado para cada pluviómetro que depende del área cubierta por cada pluviómetro.

Sustituyendo los datos en la fórmula anterior se obtiene una lluvia media para toda la subcuenca de 66,36 mm.

A partir de la lluvia media se calcula el volumen de precipitación medio. Para ello, es necesario conocer la superficie de la subcuenca, que en este caso es de 783,038 Km² [<http://www.chebro.es>], por lo cual según se ha indicado anteriormente, el volumen de precipitación medio para toda la subcuenca es:

$$\text{Volumen de precipitación}(Hm^3) = 783038000[m^2] \cdot 0,000000001 \left[\frac{Hm^3}{l} \right] \cdot 66,36 \left[\frac{l}{m^2} \right]$$

Realizando los cálculos se obtiene un volumen de precipitación para toda la cuenca de 51,96 Hm³.

A continuación se muestra una de las gráficas obtenidas para la crecida producida en Julio del 2001 en la cuenca del Alcanadre, indicando en ella alguna de las variables calculadas para así facilitar su compresión.

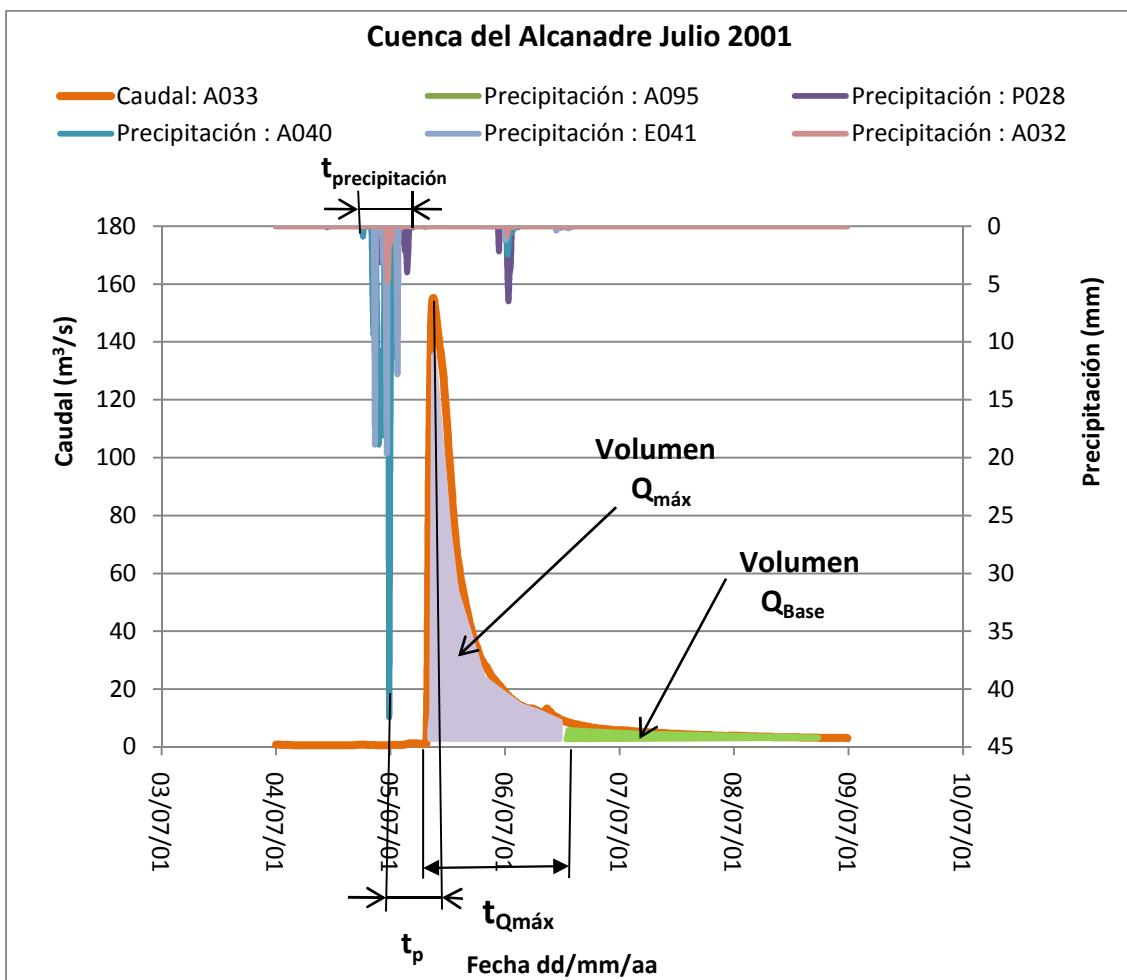


Figura 4.2.1 Caudal y precipitación registrados en las estaciones. Episodio de Julio del 2001, Cuenca del Alcanadre. Ejemplo de cálculos, hidrograma simple.

Las variables estudiadas son:

$Q_{\text{máx}}$: Caudal máximo registrado en la estación de aforo.

En este caso se puede ver en la gráfica que rondará los $160 \text{ m}^3/\text{s}$. Para obtener el caudal exacto es necesario fijarse en los datos de partida con los cuales se ha dibujado la gráfica, y se comprueba que el $Q_{\text{máx}}$ registrado en la estación de aforo fue $155,25 \text{ m}^3/\text{s}$.

Duración $Q_{\text{máx}}$ ($t_{Q_{\text{máx}}}$): Intervalo de tiempo transcurrido entre el comienzo del aumento del caudal y el punto teórico de máxima curvatura del hidrograma en la rama de bajada. Es decir el tiempo transcurrido entre el comienzo de la subida del caudal y el fin de la escorrentía de superficie [Llamas 1993]. Para calcular exactamente la duración del caudal máximo es también necesario apoyarse en los datos de partida con los cuales se realizó la gráfica anterior. De este modo, se obtiene que el caudal máximo se prolongó desde el 5 de Julio a las 2:15h hasta el 6 a las 0:30h. Por lo tanto, la duración del caudal máximo fue de 7 horas y 15 minutos.

Volumen total: Volumen contenido por el total del hidrograma de la avenida, en Hm^3 . Es decir, el volumen total de agua registrado en la estación de aforo desde el inicio del episodio hasta que se recupera el caudal que existía antes de este. Es el área bajo la curva del hidrograma, que para este episodio, le corresponde un volumen de $5,47 \text{ Hm}^3$.

Volumen de escorrentía: Corresponde a la cantidad de volumen de agua registrada en la estación de aforo a causa de las precipitaciones que han provocado la crecida; es decir, el volumen total bajo la curva del hidrograma menos el volumen que se registraría en la estación de aforo si no se hubieran producido las precipitaciones que han provocado el episodio en cuestión. En el episodio producido en Julio de 2001, en la cuenca del Alcanadre, el volumen de escorrentía es prácticamente el mismo que el volumen total ya que el volumen que se registra en la estación de aforo antes del comienzo del episodio es prácticamente nulo, siendo el volumen de escorrentía $5,23 \text{ Hm}^3$. Existen muchos casos en los que esto no es así y existe gran diferencia entre el volumen total y el volumen de escorrentía; por ejemplo, en casos en los que cuando comienza el episodio estudiado, el caudal que se va registrando en la estación de aforo va descendiendo debido a que se ha producido un episodio anteriormente y el río está en proceso de recuperar su flujo base. Un claro ejemplo de estos caso se da a la hora de analizar los sub-episodios que componen una avenida definida por un hidrograma complejo (véase figura 4.2.3).

Volumen de $Q_{\text{máx}}$: Corresponde a la cantidad de volumen de escorrentía calculado en el intervalo de tiempo de la duración de $Q_{\text{máx}}$, en Hm^3 . Para calcular el volumen de caudal máximo se debe calcular la parte del volumen de escorrentía que corresponde al intervalo de duración del caudal máximo. Para el caso de la gráfica se trata del área coloreada en lila, que le corresponde un volumen de $3,87 \text{ Hm}^3$.

Volumen base (Volumen Q_{Base}): Corresponde a la cantidad de volumen de escorrentía calculado desde que se considera que finaliza el $Q_{\text{máx}}$ hasta que se recupera el caudal que existía antes de las precipitaciones, en Hm^3 . En el caso de este episodio corresponde al área de la gráfica coloreada en verde, la cual corresponde a un volumen de $1,36 \text{ Hm}^3$.

Tiempo entre picos (tp): Intervalo de tiempo transcurrido desde el punto medio del hietograma (centro de gravedad) y el momento en el que tiene lugar $Q_{\text{máx}}$, en horas. Para calcular exactamente el tiempo entre picos es necesario apoyarse en los datos de partida con los cuales se realizó la gráfica. De este modo, para este episodio, se obtiene que el caudal máximo se registró el 5 de Julio a las 9:00h y se estima que el centro de gravedad del hietograma se dio el día 4 a las 23:45 horas; por lo que el tiempo entre picos fue de 9 horas y 15 minutos.

Para cada episodio analizado también se obtiene la representación de los datos quince-minutales del caudal medido en la estación de aforo y de las precipitaciones acumuladas en cada uno de los pluviómetros durante este episodio. La siguiente gráfica muestra esta representación para el episodio de Julio del 2001 producido en la subcuenca del Alcanadre.

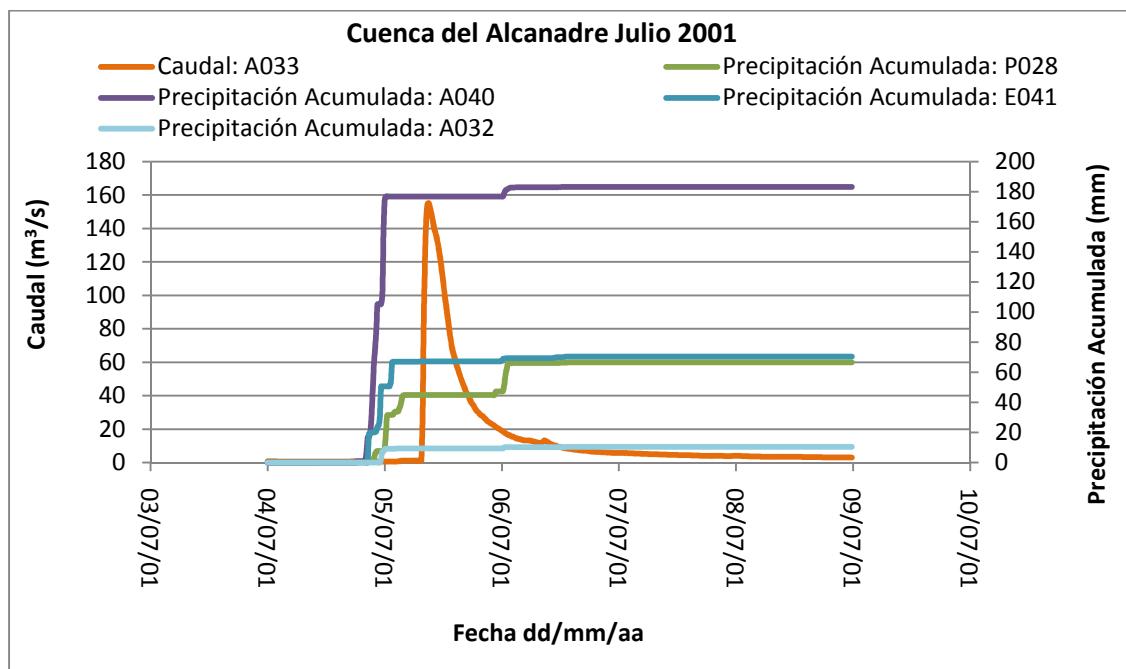


Figura 4.2.2 Caudal y precipitación acumulada registrados en las estaciones. Cuenca del Alcanadre, episodio Julio del 2001, ejemplo de cálculos, hidrograma simple.

Esta última representación sirve para comprobar visualmente el total de precipitación registrada en cada pluviómetro y en muchos de los episodios analizados también se utiliza para calcular el tiempo entre picos, debido a que en muchos casos se puede obtener con mayor facilidad a partir de esta representación.

Además para cada episodio estudiado también se busca:

-El **umbral de precipitación**; es decir, la precipitación a partir de la cual se suele producir movimiento en la estación de aforo. Para calcular el umbral de precipitación es necesario diferenciar entre episodios provocados por lluvias de alta intensidad, las cuales tienen una intensidad superior a la capacidad de infiltración del suelo (véase anexo I) y episodios provocados por lluvias continuadas e uniformes.

El episodio de Julio del 2001 producido en la subcuenca del Alcanadre, es provocado por una lluvia de alta intensidad y a partir de los datos de partida se comprueba que dicha lluvia se va registrando en los pluviómetros P028, A040 y E041 en diferentes instantes, alcanzando su máxima intensidad en la zona del pluviómetro de Boltaña (A040) en el que se registran 42,2 mm en tan sólo 15 minutos. De esta forma se concluye en que este aguacero tiene la intensidad suficiente para provocar cambios en el caudal registrado en la estación de aforo.

Para calcular el umbral de precipitación en los episodios provocados por lluvias uniformes, es necesario haber estimado con anterioridad el tiempo entre picos. De esta manera, a partir de este valor y teniendo en cuenta el instante en el que el caudal registrado en la estación de aforo comienza a aumentar, se puede determinar el instante a partir del cual las precipitaciones comienzan a producir escorrentía; y a partir de las precipitaciones registradas en los pluviómetros hasta este instante, calcular la lluvia media en la cuenca hasta entonces, la cual corresponderá al umbral de precipitación para el episodio analizado en cuestión. A partir de los umbrales de precipitación estimados en todos los episodios analizados, para cada subcuenca se estimará un umbral de precipitación, teniendo en cuenta que este parámetro es muy variable, dependiendo esencialmente de la intensidad de la precipitación y de las condiciones iniciales, secas o húmedas.

-Calcular el **coeficiente de escorrentía global** como el porcentaje del volumen de escorrentía registrado en la estación de aforo dividido entre el volumen de precipitación estimado para toda la cuenca. Para el episodio de Julio del 2001, en la cuenca del Alcanadre se obtiene:

$$\text{Escorrentía (\%)} = \frac{5,23}{51,96} \cdot 100 = 10,06 \%$$

-Tratar de **diferenciar el volumen** asociado a **escorrentías directas (flujos superficiales)** y el asociado a **flujos subterráneos e hipodérmicos (escorrentías indirectas)** y calcular los correspondientes coeficientes de escorrentía. Se estima que el volumen correspondiente a flujos superficiales corresponde al volumen del caudal máximo. Por lo tanto, para el ejemplo analizado, se obtendrá el siguiente coeficiente de escorrentía directa:

$$\text{Escorrentía directa (\%)} = \frac{3,87}{51,96} \cdot 100 = 7,45 \%$$

De la misma manera, se estima que el volumen correspondiente a flujos subterráneos e hipodérmicos se puede aproximar al volumen base. Para el ejemplo analizado se obtiene como escorrentía indirecta:

$$\text{Escorrentía indirecta (\%)} = \frac{1,36}{51,96} \cdot 100 = 2,61 \%$$

-A partir de una lluvia uniforme en la subcuenca intentar calcular **un coeficiente de escorrentía medio** para toda la subcuenca. Para ello, una vez analizados todos los episodios seleccionados para la subcuenca en cuestión, se selecciona aquel en el que las precipitaciones registradas en todos los pluviómetros son más parecidas y la escorrentía calculada para este episodio será la que se estimará como coeficiente de escorrentía medio para toda la subcuenca.

El episodio que se está usando como ejemplo, Julio del 2001, no sería el indicado para calcular el coeficiente de escorrentía medio en la cuenca ya que las precipitaciones registradas en los diferentes pluviómetros difieren mucho.

-Estimar el **tiempo de concentración** de la subcuenca siendo éste el tiempo que tarda una gota de agua caída en el punto más alejado de la estación de aforo en llegar a esta [Llamas 1993].

Una vez analizados todos los episodios a partir de los cuales se caracterizará la subcuenca, se estimará a partir del tiempo entre picos calculado en un episodio en el que la mayoría de la precipitación es registrada en los pluviómetros que se encuentran más alejados de la estación de aforo.

Análisis de hidrogramas complejos

Este tipo de episodios, como se muestra en la figura 4.2.3, se caracterizan porque pueden ser divididos a su vez en varios sub-episodios, es decir casos en los que el hidrograma observado está compuesto por la superposición de varios episodios de crecida como consecuencia de lluvias intermitentes con varios máximos en el tiempo.

La siguiente figura muestra el hidrograma y los hietogramas obtenido para el episodio producido en Abril del 2008 en la cuenca del Alcanadre.

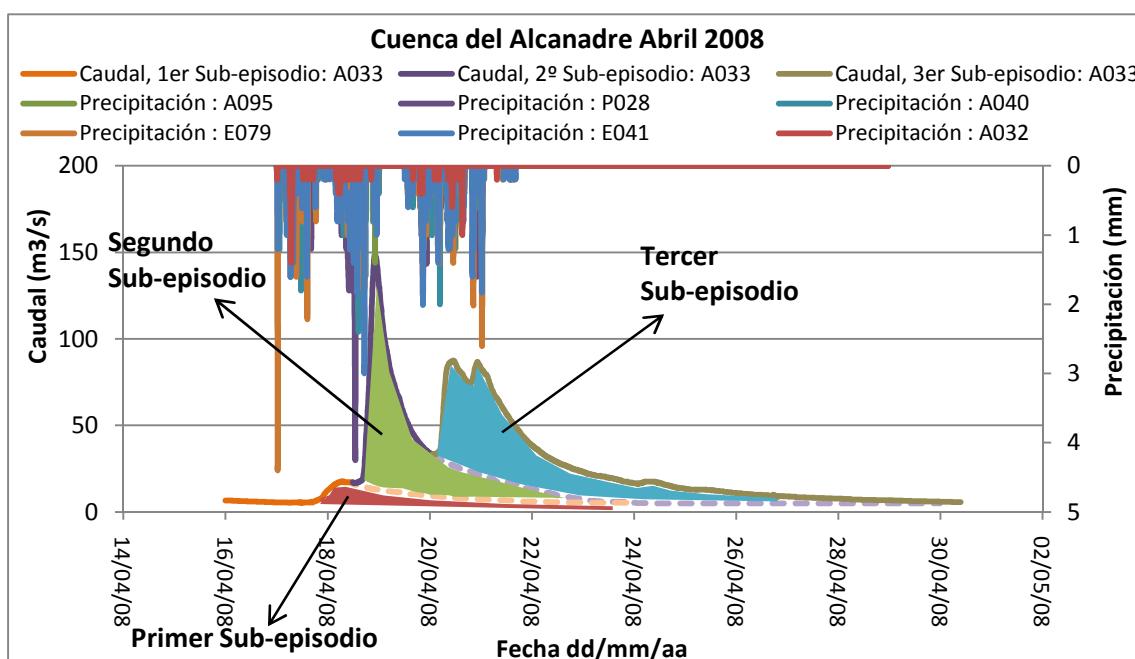


Figura 4.2.3 Episodio de Abril del 2008, Cuenca del Alcanadre; Ejemplo de cálculos, hidrograma complejo.

Como se puede ver en la figura anterior, se pueden diferenciar tres sub-episodios.

Lo que se realiza con este tipo de hidrogramas, es aislar los sub-episodios de caudal y las precipitaciones que los producen entonces se analizan independientemente siguiendo los pasos indicados con anterioridad.

Como se puede observar en la anterior figura, el caudal de bajada de los dos primeros sub-episodios se debe suponer, en general esto se realiza teniendo en cuenta la rama de bajada del último sub-episodio del episodio completo o teniendo en cuenta la rama de bajada del hidrograma del sub-episodio en cuestión.

Es importante mencionar que existen episodios que también son analizados en sub-episodios, pero debido a que existen sub-episodios de lluvias muy bien diferenciados y aunque alguno no provoque un pico de caudal se cree oportuno analizarlos separadamente. En la siguiente figura se muestra un episodio que se analizaría de esta manera:

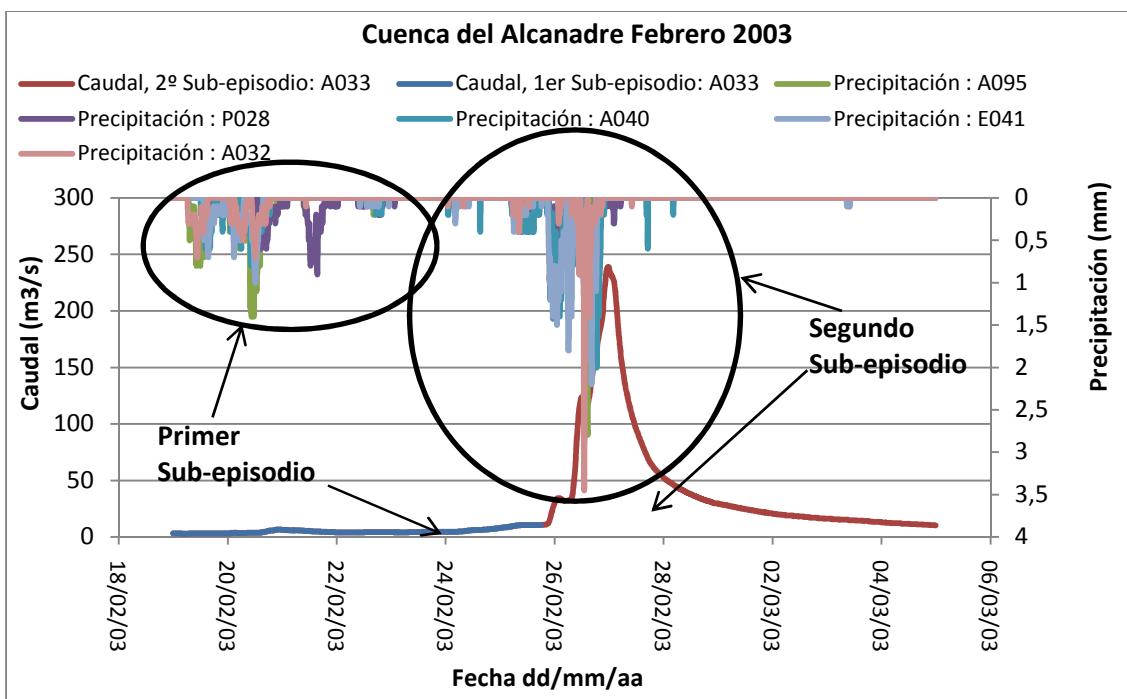


Figura 4.2.4 Episodio de Febrero del 2003, Cuenca del Alcanadre; Ejemplo de cálculos, sub-episodios de precipitación.

Como ya se ha dicho, en total se han analizado diez subcuenca pertenecientes a la cuenca del Ebro y en todas ellas se ha seguido este procedimiento a la hora de la selección de los episodios más relevantes y el estudio de estos. En general el número de episodios analizados en cada subcuenca está entre ocho y diez, siendo muchos caracterizados por hidrogramas complejos y a su vez divididos en sub-episodios que se analizan de manera independiente.

Para cada subcuenca una vez obtenidos los resultados procedentes del análisis de los episodios se determinan unas pautas de comportamiento con respecto a su respuesta hidrológica ante una precipitación.

Los estudios realizados en cada subcuenca se encuentran en los anexos.

5. MODELOS DE PREDICCIÓN

5.1 Introducción

Un modelo hidrológico es una representación física o matemática de los procesos hidrológicos reales que ocurren dentro de una cuenca. En este capítulo se procede a realizar un contraste entre las escorrentías y los tiempos de concentración obtenidos a partir del análisis de los episodios históricos y una estimación teórica de estos a partir de modelos hidrológicos. La caracterización teórica se realiza con la ayuda de datos proporcionados por el SAIH Ebro, y mediante ella se estiman los tiempos de concentración de las diferentes subcuenca utilizando la fórmula de Témez (la cual se muestra en el siguiente punto del capítulo) y las escorrentías definidas a través del número de curva del SCS. Se utilizan estos modelos porque fueron los utilizados por el SAIH Ebro para la estimación inicial de los parámetros de modelización, los cuales sirvieron de base para las simulaciones más complejas que actualmente llevan a cabo.

5.2 Estimación teórica del tiempo de concentración

El tiempo de concentración en una cuenca depende del espacio recorrido (longitud y forma de la cuenca) y de la "velocidad" de las escorrentías (altura de la escorrentía, pendiente de la cuenca y del cauce principal, rugosidad de la superficie). Se puede estimar a través de fórmulas empíricas. Existen muchas fórmulas utilizadas para el cálculo de este tiempo, la de Kirpich (1940), la de Izzard (1946), la de Federal Aviation Administration (1970), etc. [Chow et al. 1994]. Como se ha dicho anteriormente, en este estudio la estimación del tiempo de concentración se realiza mediante la fórmula de Témez, la cual tiene la siguiente expresión:

$$T_c = 0,3 \cdot \left(\frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0,76}$$

donde:

T_c : es el tiempo de concentración en horas.

L: es la longitud del cauce principal en km.

J: es la pendiente media del cauce principal en m/m.

Como se puede apreciar en la anterior expresión, el tiempo de concentración se calcula en base a la longitud del cauce principal y a la pendiente media del cauce principal. Por lo que para su cálculo en cada subcuenca se necesita elaborar un perfil longitudinal del río en el que podamos evaluar las pendientes en cada tramo. La longitud del río con la que se trabaja es la que transcurre desde su nacimiento hasta la estación de aforo. Por ejemplo, para la subcuenca del Ulzama, a partir de los valores que se muestran en la siguiente tabla, donde aparece su altimetría en diferentes puntos, se procede a calcular el tiempo de concentración.

Distancia al nacimiento (km)	Altitud (msnm)	
0Km	991 msnm	→ Nacimiento
2,3Km	887 msnm	
4,6Km	671 msnm	
6,7Km	600 msnm	
9Km	533 msnm	
17,5Km	512 msnm	
27,5Km	487 msnm	→ Estación de aforo A067

Tabla 5.2.1 Altimetría de diferentes puntos del cauce principal del Ulzama.

A partir de estos valores se puede calcular el tiempo de concentración:

$$J = \frac{991 - 487}{27,5 \cdot 1000} = 0,0183 \text{ m/m} \rightarrow Tc = 0,3 \cdot \left(\frac{27,5}{0,0183^{1/4}} \right)^{0,76} = 7,96 \text{ h.}$$

De igual manera se calculan los tiempos de concentración para todas las subcuencas. Los datos de partida para estos cálculos se encuentran adjuntos en el Anexo XII.

5.3 Estimación del número de curva

Para estimar inicialmente la relación precipitación-escorrentía en una cuenca uno de los parámetros más utilizados es el Número de Curva (NC) del Soil Conservation Service de Estados Unidos (SCS). La metodología del número de curva para determinar la relación precipitación-escorrentía se basa en un balance de agua el cuál se encuentra detallado en el Anexo XIII. Es una metodología simple y empírica que permite obtener una aproximación adecuada y que se desarrolló a partir de la observación del fenómeno hidrológico precipitación-escorrentía en diferentes tipos de suelo y para diferentes condiciones de humedad antecedente.

El número de curva presenta valores de $0 \leq NC \leq 100$. A mayor número de curva las condiciones de escorrentía son más críticas (mayor coeficiente de escorrentía), determinando menor infiltración [Gaspari et al. 2007]. Es decir, un número de curva igual a 100 define un terreno totalmente impermeable en el cual se genera una escorrentía del 100% y cuanto más pequeño es el valor del número de curva, más permeable es el terreno y menor escorrentía se genera para cualquier lluvia. En una cuenca, a partir del número de curva, no le podemos asociar directamente un valor exacto del coeficiente de escorrentía pero sí que en base a él se le puede asociar un coeficiente de escorrentía teórico: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto.

Antes de pasar a realizar la comparación de los números de curva de cada subcuenca con los coeficientes de escorrentía calculados en el análisis, se procede a realizar un estudio en el que se obtiene un rango aproximado de la variación del número de curva en cada subcuenca, para así poder hacerse una idea de cuál es el rango general de variación del número de curva. El número de curva se calcula en función de la humedad inicial del suelo, las características litológicas y edafológicas del suelo, las características de la cubierta vegetal, el uso al que se destina el suelo y la pendiente de este.

Humedad Inicial:

Los números de curva se aplican en diferentes condiciones de humedad antecedente. Se consideran tres condiciones, denominadas AMC I, II, III. De ellas, la condición I equivale a un suelo muy seco, y no es en absoluto habitual en estudios de avenida, ya que reduce extraordinariamente el coeficiente de escorrentía. En general, los análisis se centran en condiciones de humedad II, que responden a una humedad media. Existen expresiones que relacionan las tres condiciones de humedad (véase Anexo XIII). Este análisis se realiza a partir de condiciones de humedad II.

Características del suelo:

Desde el punto de vista hidrológico, el método del número de curva del SCS considera cuatro tipos de sustratos distintos, según su grado de permeabilidad: suelos tipo A (agrupa los sustratos permeables, es decir con un potencial de escorrentía mínimo), suelos tipo B (sustratos algo menos permeables que los del tipo anterior y, por lo tanto, con un mayor potencial de escorrentía), suelos tipo C (sustratos que varían entre límites menos permeables a algo impermeables, con un potencial de escorrentía entre valores medio y alto), suelos tipo D (agrupa los sustratos con mayor impermeabilidad y, por tanto, mayor potencial de escorrentía) [Franquet-Bernis 2005].

En la siguiente figura se adjunta un mapa de clasificación de los usos del suelo de la cuenca del Ebro, según el SCS:

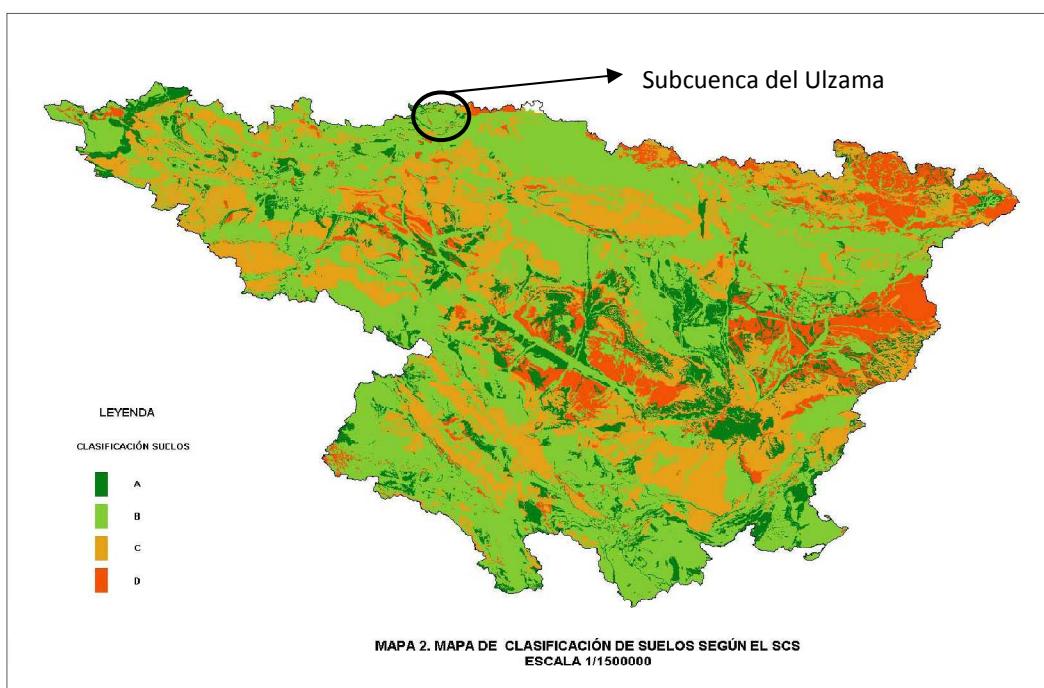


Figura 5.3.1 Mapa de suelos de la cuenca del Ebro según el SCS.

Situando las subcuenas en el mapa se obtendría el tipo o tipos de suelo con los que nos podemos encontrar. Por ejemplo, la subcuenca del Ulzama, la cual se encuentra localizada en la zona donde se indica en la figura anterior, se caracteriza por tener un tipo de suelo B aunque en pequeñas parcelas del terreno nos podemos encontrar con suelos del tipo A, en muy pequeñas parcelas del terreno suelos tipo C y en aún más pequeñas parcelas con suelo tipo D.

Cubierta vegetal y usos del suelo:

De acuerdo a la metodología propuesta por el SCS a la hora de determinar el NC de un determinado terreno, se debe tener en cuenta la siguiente calificación de usos del suelo:

Cultivos en hilera, cereales de invierno, rotación de cultivos pobres, rotación de cultivos densos, praderas, plantaciones regulares, masas forestales, rocas permeables, improductivos

impermeables (pavimentados y asimilados) y por último con suelo residencial impermeable al 65%, con suelo residencial impermeable al 25% y con aprovechamientos mineros.

En la siguiente figura se muestra un mapa de clasificación de usos del suelo según el SCS para la cuenca del Ebro.

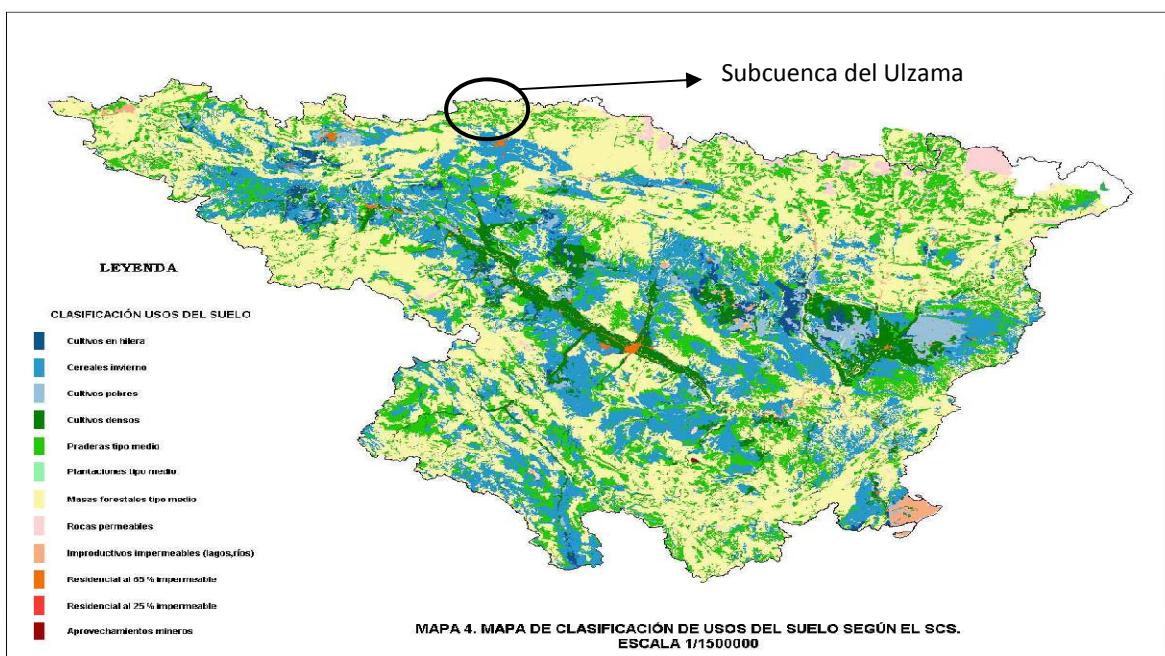


Figura 5.3.2 Mapa de usos del suelo de la cuenca del Ebro según el SCS.

Y una vez situadas las subcuenca se puede determinar el uso del suelo según el SCS en cada una. En la subcuenca del Ulzama nos encontramos con masas forestales tipo medio y praderas tipo medio.

Análisis de la pendiente:

El último factor que se considera que tiene incidencia en el NC de un determinado territorio es la pendiente del terreno y se considera al respecto dos clases diferentes: pendiente inferior o pendiente superior al 3%. Situando las subcuenca analizadas en el mapa de clasificación de las pendientes, según el SCS, se obtiene este factor. En la subcuenca del Ulzama, se observa que en la mayoría del terreno la pendiente es mayor del 3% y que en muy pequeñas parcelas del terreno nos podemos encontrar con pendientes menores al 3%.

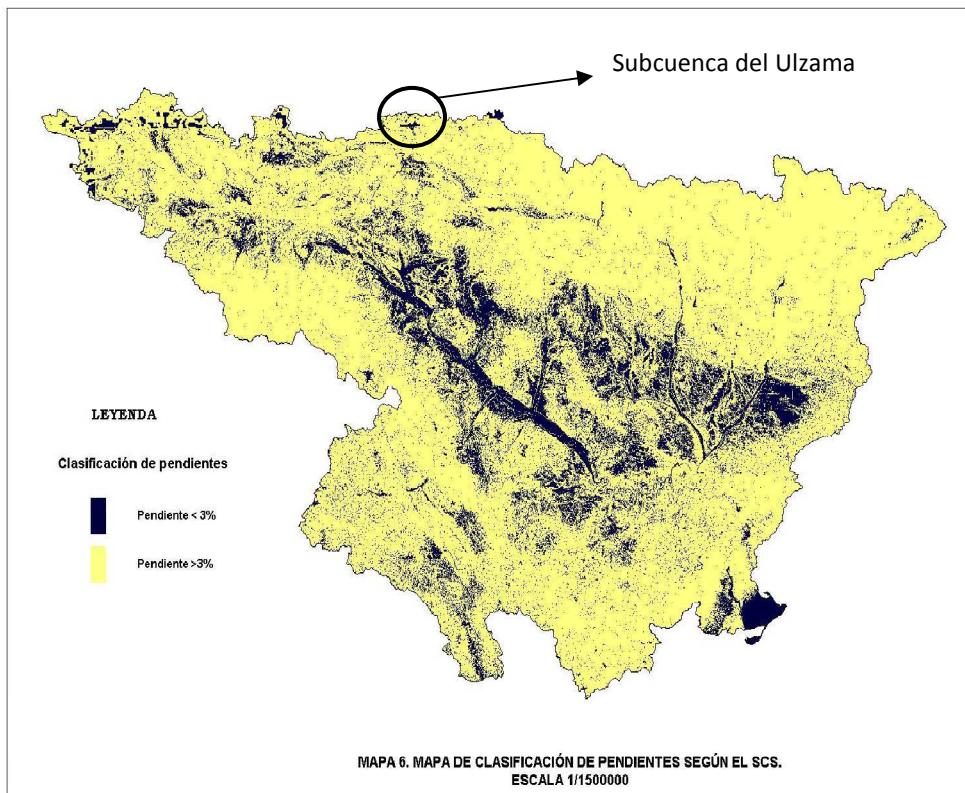


Figura 5.3.3 Mapa de clasificación de pendientes en la cuenca del Ebro según el SCS.

A partir de los tres últimos mapas se puede obtener un mapa de evolución del número de curva del SCS en la cuenca del Ebro aplicando los valores contenidos en la siguiente tabla (tabla 5.3.1). Dichos valores corresponden a la condición antecedente de humedad II.

VALORES DEL NUMERO DE CURVA PARA DIFERENTES COMBINACIONES SUELO-CUBIERTA.							
CONDICION ANTECEDENTE DE HUMEDAD AMC-II		TIPO DE CUBIERTA	PENDIENTE <3% ó ≥3%	TIPO DE SUELO			
				A	B	C	D
Cultivos en hilera		Cultivos en hilera	≥	68	79	86	89
			<	67	76	82	86
Cereales de invierno		Cereales de invierno	≥	63	75	83	86
			<	61	72	81	83
Cultivos pobres		Cultivos pobres	≥	66	/ /	85	89
			<	64	75	82	86
Cultivos densos		Cultivos densos	≥	57	71	81	85
			<	54	68	78	82
Praderas tipo medio		Praderas tipo medio	≥	49	68	78	85
			<	38	59	75	83
Plantaciones tipo medio		Plantaciones tipo medio	≥	38	60	72	78
			<	34	54	69	77
Masas forestales tipo medio		Masas forestales tipo medio	≥	40	60	69	76
			<	40	60	69	76
Rocas permeables		Rocas permeables	≥	94	94	94	94
			<	91	91	91	91
Improductivo		Improductivo	≥ y <	98	98	98	98
			≥ y <	77	85	90	92
Residencial al 65% impermeable		Residencial al 65% impermeable	≥ y <	54	70	80	85
			≥ y <	51	68	/ 9	84

Tabla 5.3.1 Números de curva, en función del tipo y usos del suelo y la pendiente. Condiciones de humedad II.

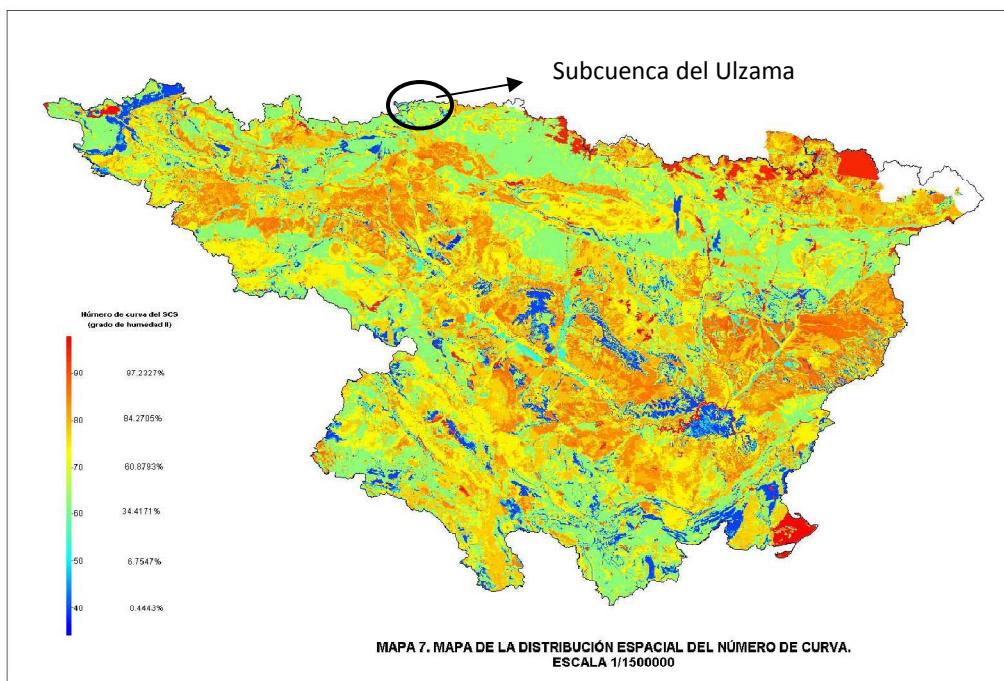


Figura 5.3.4 Mapa de la distribución espacial del número de curva en la cuenca del Ebro.

Directamente a partir de este último mapa o situando en los mapas de las figuras 5.3.1, 5.3.2 y 5.3.3 las subcuencas analizadas y entrando en la tabla 5.3.1 de triple entrada, podemos encontrar el rango de variación del número de curva para cada una de las subcuencas. Por ejemplo, para la subcuenca del Ulzama nos encontraríamos con pequeñas zonas en las que el número de curva toma valores más bajos, NC=40, zonas en las que los números de curva son más altos llegando a alcanzar valores de NC=85; aunque estos valores extremos nos los encontraríamos en pequeñas parcelas del terreno y el número de curva que más predomina en toda la subcuenca es cercano a NC=60.

Realizando este proceso para todas las subcuencas obtenemos que los números de curva más bajos que nos encontramos están en torno al 40 y los más altos son iguales a 94, pero para todas ellas el número de curva predominante en la mayoría de su superficie toma valores entre 60 y 70, por lo que antes de realizar un análisis más específico, se concluye que, en general, los números de curva en las subcuencas toman valores muy similares, por lo que un buen funcionamiento del modelo implicaría que los coeficientes de escorrentía calculados en las diferentes subcuencas analizadas no se diferenciaran mucho.

En el análisis de episodios, los coeficientes de escorrentía se calculan a partir de la lluvia media, la cual se calcula teniendo en cuenta la lluvia registrada en todos los pluviómetros existentes distribuidos por toda la superficie de la cuenca. En general, a la hora de estimar el coeficiente de escorrentía medio se analiza el episodio en el que la lluvia es más uniforme en la cuenca y se tiene en mente los coeficientes de escorrentía calculados para el resto de episodios. De esta forma, para realizar este análisis se compara el coeficiente de escorrentía medio de la subcuenca con el valor promedio del número de curva.

5.4 Análisis Comparativo

Cuenca del Ulzama

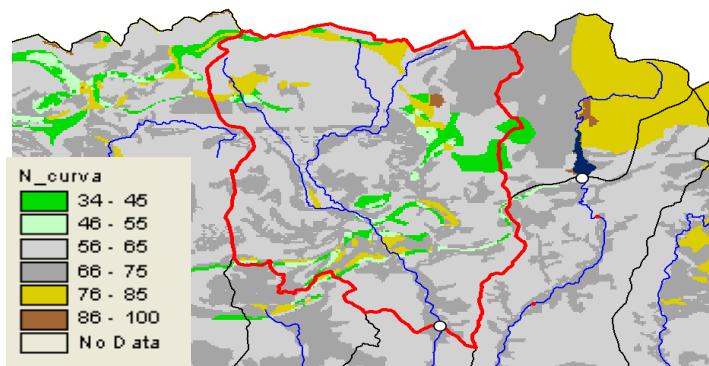


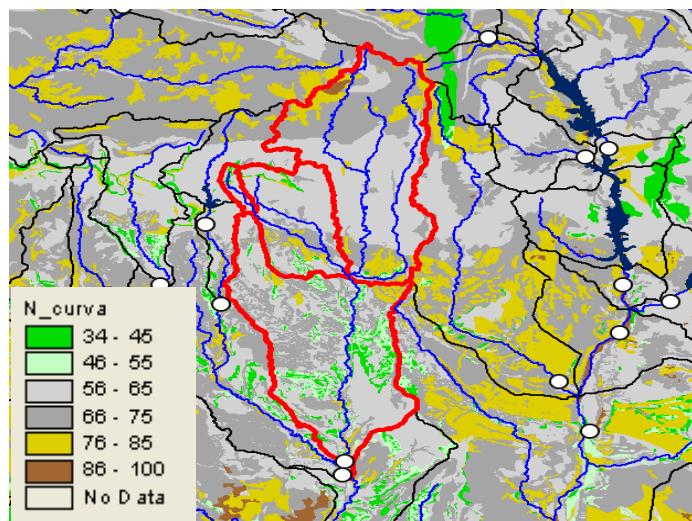
Figura 5.4.1 Número de curva; Cuenca del Ulzama.

Caracterización teórica

- El NC=61±8.
- El $T_c=7,96h$.

Valores obtenidos en el análisis

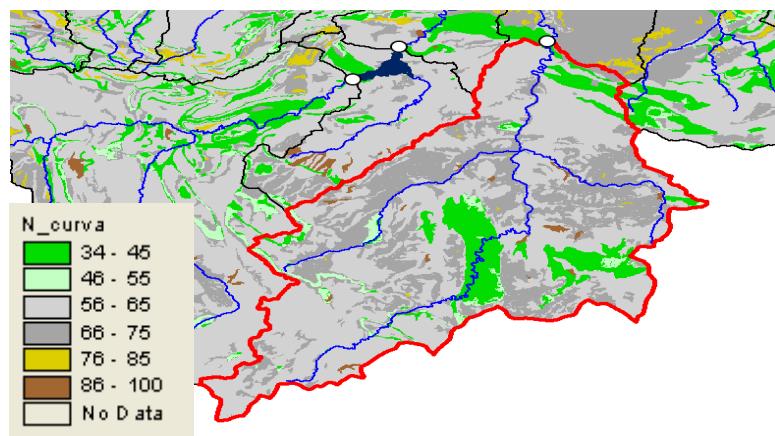
- Escorrentía media =0,38.
- $T_c \approx 8h$.

Cuenca del Alcanadre**Figura 5.4.2 Número de curva; Cuenca del Alcanadre.**Caracterización teórica

- El $NC=62 \pm 8$.
- El $T_c=18,1h$.

Valores obtenidos en el análisis

- Escorrentía media =0,27.
- $T_c \approx 17,5h$.

Cuenca del Bergantes**Figura 5.4.3 Número de curva; Cuenca del Bergantes.**Caracterización teórica

- El $NC=60 \pm 9$.
- El $T_c=20,07h$.

Valores obtenidos en el análisis

- Escorrentía media =0,2.
- $T_c \geq 14h$.

Cuenca del Susía

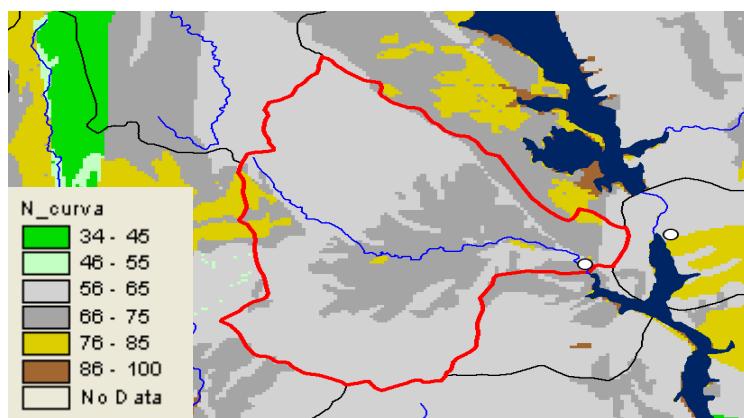


Figura 5.4.4 Número de curva; Cuenca del Susía.

Caracterización teórica

- El $NC=64 \pm 7$.
- El $T_c=4,35h$.

Valores obtenidos en el análisis

- Escorrentía media =0,32.
- $T_c \approx 4h$.

Cuenca del Omeccillo

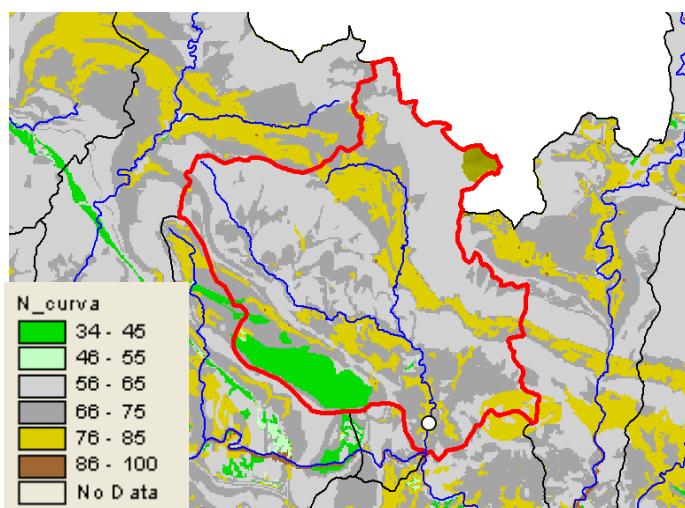


Figura 5.4.5 Número de curva; Cuenca del Omeccillo.

Caracterización teórica

- El $NC=65 \pm 7$.
- El $T_c=9,68h$.

Valores obtenidos en el análisis

- Escorrentía media =0,142.
- $T_c \geq 7h$.

Cuenca del Manubles

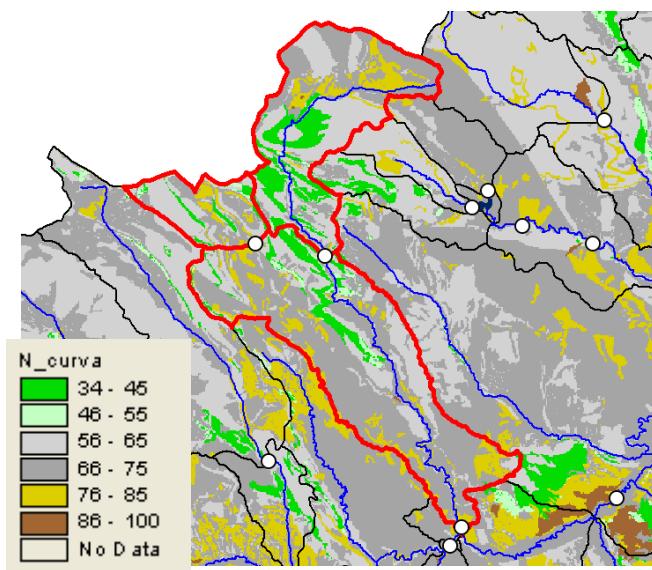


Figura 5.4.6 Número de curva; Cuenca del Manubles.

Caracterización teórica

- El $NC=64 \pm 11$.
- El $T_c=16,62\text{h}$.

Valores obtenidos en el análisis

- Escorrentía media =0,36.
- $T_c \approx 11-14\text{h}$.

Cuenca del Isábena

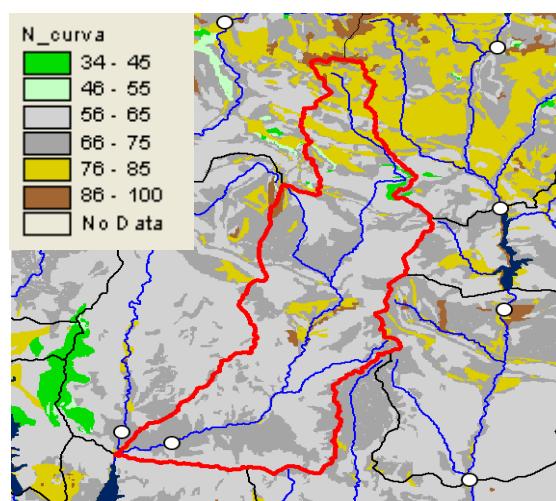


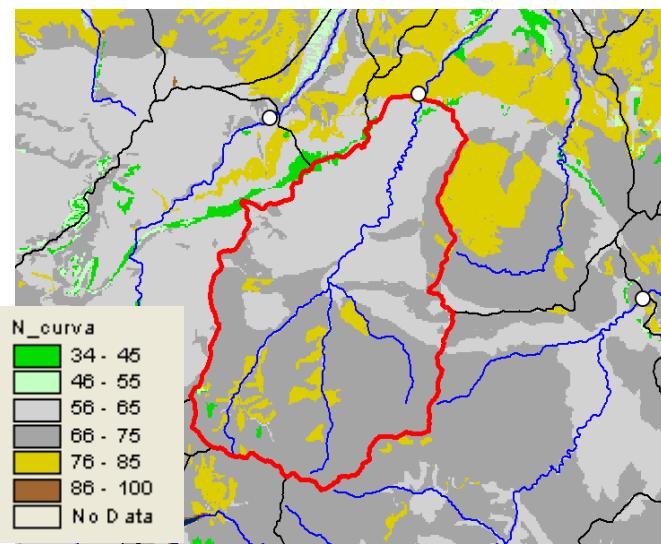
Figura 5.4.7 Número de curva; Cuenca del Isábena.

Caracterización teórica

- El $NC=65 \pm 8$.
- El $T_c=13,77\text{h}$.

Valores obtenidos en el análisis

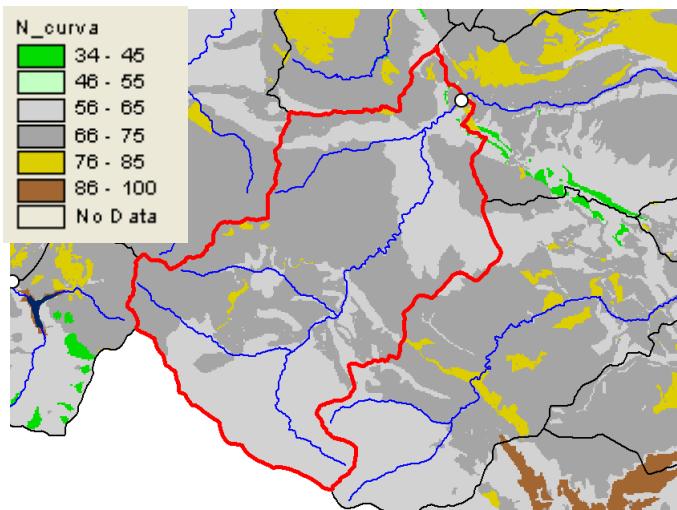
- Escorrentía media =0,195.
- $T_c \approx 13\text{h}$.

Cuenca del Leza**Figura 5.4.8 Número de curva; Cuenca del Leza.**Caracterización teórica

- El NC= 65 ± 10 .
- El $T_c = 8,67\text{h}$.

Valores obtenidos en el análisis

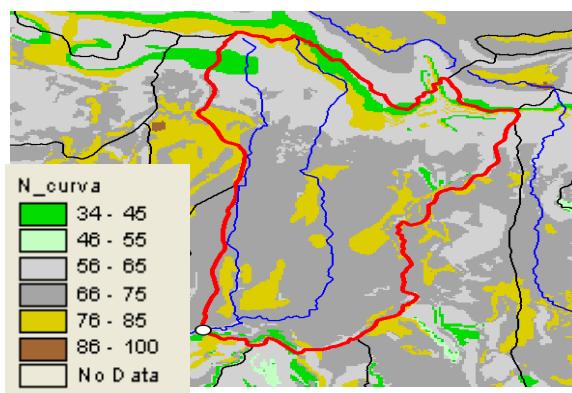
- Escorrentía media =0,3248.
- $T_c \approx 7-9\text{h}$.

Cuenca del Cidacos**Figura 5.4.9 Número de curva; Cuenca del Cidacos.**Caracterización teórica

- El NC= 65 ± 5 .
- El $T_c = 10,9\text{h}$.

Valores obtenidos en el análisis

- Escorrentía media =0,34.
- $T_c \approx 11\text{h}$.

Cuenca del Sotón**Figura 5.4.10 Número de curva; Cuenca del Sotón.**Caracterización teórica

- El $NC=69 \pm 10$.
- El $T_c=7,66h$.

Valores obtenidos en el análisis

- Escorrentía media =0,479.
- $T_c \approx 7h$

En la siguiente tabla, para facilitar el análisis, se reúnen todos los valores indicados anteriormente:

Subcuenca	Caracterización teórica		Valores obtenidos del análisis	
	Número de Curva	Tiempo de concentración(h)	Escorrentía media	Tiempo de concentración(h)
Urzama	61	7,96	0,38	8
Alcanadre	62	18,1	0,27	17,5
Bergantes	60	20,07	0,2	≥14
Susía	64	4,35	0,32	4
Omejillo	65	9,68	0,3376	≥7
Manubles	64	16,62	0,36	11-14
Isábena	65	13,77	0,195	13
Leza	65	8,67	0,3248	7-9
Cidacos	65	10,9	0,34	11
Sotón	69	7,66	0,479	7

Tabla 5.4.1 Resumen de resultados; Caracterización teórica y valores obtenidos en episodios.

Al observar los datos presentados en la tabla anterior, a simple vista se puede concluir que en general en todas las subcuenca los modelos hidrológicos se ajustan bastante bien con respecto a lo que realmente ocurre en las subcuenca (valores obtenidos a partir del análisis).

Los tiempos de concentración, calculados con la fórmula de Témez, se ajustan muy bien a los hallados a partir del análisis de episodios de crecida y la diferencia que existe con el tiempo de concentración determinado teóricamente es mínima.

En cuanto a la relación precipitación-escorrentía, como se ha dicho anteriormente, debido a que el número de curva medio en todas las subcuenca analizadas se encuentra entre 60-70, el primer paso a la hora de constatar la fiabilidad del método es comprobar que los coeficientes de escorrentía en las diferentes subcuenca no sean muy diferentes, como podemos observar en la tabla 5.4.1, siendo un 33% el mayor rango de variación entre los coeficientes.

Como se ha apuntado anteriormente, cuanto mayor es el valor del número de curva en una determinada superficie mayor tendría que ser la escorrentía que se produjese y, en general, es esto lo que ocurre en las subcuenca analizadas. Diferenciando entre:

- Subcuenca con números de curva más próximos a 60, en las que los coeficientes de escorrentía hallados tienen valores en torno al 0,2.
- Subcuenca con números de curva próximos a 65, en las que los coeficientes de escorrentía se acercan más a valores del 0,33.
- Subcuenca con un número de curva más próximo a 70, en la que el coeficiente de escorrentía toma un valor de prácticamente el 0,5.

Cabe destacar y analizar independientemente las siguientes subcuenca.

- Subcuenca del Urdaz: En comparación con los valores asignados al resto de subcuenca, el coeficiente de escorrentía medio es algo alto para el valor medio del número de curva con el que se la define. Esto también ocurre si comparamos los coeficientes de escorrentía calculados en la mayoría de los episodios analizados ya que en general son muy altos (véase Anexo II, tabla II.29). Esto es debido a que sobre esta subcuenca se producen muchas precipitaciones a lo largo del año por lo que se obtienen coeficientes de escorrentía más altos a causa de que en los episodios analizados casi siempre las condiciones iniciales del terreno son de humedad elevada. Por esto se concluye que el número de curva en esta subcuenca debería ser calculado a partir de condiciones de humedad III.
- Subcuenca del Isábena: A simple vista parece que es la que menos se ajusta al modelo del número de curva. Esto puede ser porque en esta subcuenca el coeficiente de escorrentía medio no ha sido determinado mediante un episodio en el que las lluvias que lo provocan están repartidas por toda la superficie de la subcuenca y aunque sí que es el episodio en el que las lluvias registradas en todos los pluviómetros situados en los alrededores de la subcuenca eran las más parecidas, existe una diferencia considerable entre los mm de lluvia registrados en cada uno, por lo que el coeficiente de escorrentía media determinado para esta subcuenca no es demasiado fiable. En este sentido para estimar un valor de escorrentía media en la subcuenca también se

tiene en cuenta el episodio acaecido en Abril del 2009 en el que las lluvias registradas en los pluviómetros son también relativamente similares y en el que se ha estimado un coeficiente de escorrentía de 0,388. De esta forma a partir de un promedio entre los dos coeficientes citados se puede determinar un valor más fiable para la escorrentía media en esta subcuenca, siendo este algo mayor de 0,29, el cual se ajusta mucho mejor al modelo del número de curva.

- Subcuenca del Sotón: Aunque esta subcuenca sí que se ajusta perfectamente la escorrentía media estimada al valor del número de curva (mayor número de curva → mayor coeficiente de escorrentía), al observar el resto de episodios cabe destacar que las escorrentías de los episodios analizados quedan definidas por coeficientes de escorrentía menores al 0,479, por lo que en realidad el coeficiente de escorrentía media para toda la subcuenca que mejor se ajustaría a todos los episodios analizados debería ser algo menor que 0,479. En este sentido, a esta subcuenca se le asigna una escorrentía media a partir del coeficiente de escorrentía del episodio de Marzo del 2001, 0,479 y del coeficiente de Enero de 1998 en el que las precipitaciones registradas en los pluviómetros también son relativamente homogéneas y en el que se estima un coeficiente de escorrentía de 0,2864 (véase Anexo XI). De esta forma, la escorrentía media se calcula promediando estos dos valores y obteniendo un valor de 0,3827, el cual representa mejor lo que en realidad ocurre en esta subcuenca y se sigue ajustando al modelo del número de curva.

6. CONCLUSIONES

En este estudio se ha realizado un análisis pormenorizado de la respuesta hidrológica a la precipitación de una selección de diez subcuenca de tamaño medio (entre 1052 y 78 km²) todas ellas pertenecientes a la cuenca hidrográfica del río Ebro. Para cada subcuenca se han estudiado episodios de crecida analizando los datos de precipitación y de caudal correspondientes y a partir de ellos, se han calculado los parámetros hidrológicos característicos que definen el comportamiento hidrológico de cada subcuenca. En la última parte del proyecto, los parámetros calculados a partir de análisis de datos se han comparado con otros parámetros teóricos de caracterización obtenidos a partir de métodos basados únicamente en aspectos físicos y geológicos. En concreto con las escorrentías estimadas por el método del número de curva y con los tiempos de concentración calculados mediante la fórmula desarrollada por Témez. De esta manera, se ha comprobado si estos modelos teóricos se ajustan al comportamiento real observado en las subcuenca seleccionadas.

Los datos de precipitación y caudal analizados han sido suministrados por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) y fueron captados por el Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de dicho organismo. La selección de las cuencas estuvo condicionada por la existencia de datos y la calidad de los mismos. En este sentido se evitó seleccionar subcuenca donde no hubiese suficientes episodios de crecida para analizar, así como subcuenca en las que no se pudiera establecer una correlación adecuada entre los datos de precipitación y caudal, y también subcuenca en las que los fenómenos nivales fuesen muy relevantes (ya que esto dificulta en gran medida el análisis de episodios sobre todo si no se dispone de datos de temperatura apropiados).

Una vez elegidas las subcuenca y una vez analizados los datos registrados a lo largo de los años en las estaciones de aforo y pluviométricas situadas en las diferentes subcuenca, las podemos clasificar en base al régimen hidrológico dominante en cada una de ellas en cuatro grupos:

- Cuencas de régimen de alimentación pluvial de clima oceánico: Caracterizadas por precipitaciones medias anuales de entre 800 y 1200 l/m² bastante regulares todos los años con dos estaciones más húmedas, la primavera y el otoño, y veranos secos con no demasiada actividad convectiva. Esto conlleva caudales específicos elevados durante todo el año, salvo en verano y crecidas importantes en otoño, invierno y primavera asociadas a los sistemas frontales oceánicos. A este tipo corresponden las cuencas del Omenillo y el Ulzama.
- Cuencas de régimen de alimentación pluvial de clima continental de montaña: Caracterizadas por precipitaciones medias anuales de entre 800 y 1200 l/m² bastante regulares todos los años con otoños y primaveras algo más húmedos, pero con episodios de precipitación convectiva que pueden ser muy importantes durante los meses más calurosos del año. Esto supone caudales específicos medios-altos y en los que aunque pueden registrarse crecidas todo el año, las más importantes suelen tener lugar durante el final de la primavera, el verano y el principio del otoño como consecuencia de fenómenos convectivos. A este tipo corresponden las cuencas del Leza, Cidacos, Alcanadre, Sotón, Isábena y Susía.

- Cuencas de régimen de alimentación pluvial de clima continental semiárido: Caracterizadas por precipitaciones medias anuales de entre 400 y 500 l/m² con una irregularidad alta de unos años a otros. Tienen gran importancia los episodios de precipitación convectiva que pueden ser muy importantes durante los meses más calurosos del año, aunque tienen lugar con una frecuencia baja. La influencia de los sistemas frontales es pequeña en relación con los anteriores. Esto supone caudales específicos bajos y en general grandes períodos de estiaje interrumpidos por episodios aislados de crecidas asociados a tormentas. Estas crecidas pueden ser de gran magnitud sobre todo en primavera y otoño, pero pueden pasar años sin que haya eventos destacados. A este tipo corresponde la cuenca del Manubles.
- Cuencas de régimen de alimentación pluvial de clima mediterráneo de montaña: Caracterizadas por precipitaciones medias anuales de entre 500 y 700 l/m² con una irregularidad alta de unos años a otros. Tienen gran importancia los episodios de precipitación convectiva que pueden ser muy importantes (más de 300 l/m² en 24 horas) en la primavera y el otoño. Tanto la intensidad de estos fenómenos, como su frecuencia, es mayor que en el clima semiárido. La influencia de los sistemas frontales es pequeña. Esto supone caudales específicos bajos y en general largos períodos de estiaje interrumpidos por episodios aislados de crecidas asociados a sistemas convectivos de diversa magnitud. Estas crecidas pueden ser de gran magnitud sobre todo en primavera y otoño, pero puede pasar tiempo sin que se produzcan eventos destacados. A este tipo corresponde la cuenca del Bergantes.

Del análisis de la respuesta hidrológica de las cuencas analizadas se concluye que existe una gran diversidad en el comportamiento hidrológico de las subcuencas que forman parte de la cuenca del Ebro en relación a la zona climática en la que se ubican, diversidad que seguramente hubiera sido más notoria si se hubieran estudiado subcuencas situadas en zonas más altas del Pirineo (Zonas de alta montaña). Esta diversidad climática da lugar al alto nivel de complejidad que manifiesta la cuenca del Ebro en cuanto a comportamiento hidrológico, y se explica por la disposición geográfica de la cuenca, ubicada a caballo entre el océano Atlántico y el mar Mediterráneo y constituida por una depresión central (entre 0 y 400 msnm en un 80%) delimitada por los Pirineos al norte (hasta 3000 msnm), por la cordillera Ibérica al sur (hasta 2000 msnm) y por la cordillera Costero Catalana al este (hasta 1000 msnm).

Del análisis de los episodios de crecida más relevantes se concluye que:

- Las principales características de las riadas, su duración, la cantidad de volumen que suponen y el caudal punta que se alcanza, están claramente influenciadas por el tipo de precipitaciones que las provocan, en este sentido se pueden diferenciar entre:
 - Lluvias intensas y concentradas en el tiempo, las cuales producen riadas de corta duración y bajo volumen pero con caudales de punta altos. Los hidrogramas que representan este tipo de crecidas son los más puntiagudos. Este tipo de eventos se relacionan normalmente con fenómenos convectivos, y aunque pueden darse en cualquier punto de la subcuenca son más típicos de climas mediterráneos y climas de montaña, lo que se corresponde con el

cuadrante suroriental de la cuenca del Ebro y con la cordillera Pirenaica y Prepirenaica.

- Lluvias uniformes y de baja intensidad, este tipo de lluvias sólo producen escorrentía si son muy prolongadas en el tiempo y si se llega a superar la capacidad de infiltración del suelo. En general estas lluvias, aunque recargan los acuíferos y pueden incrementar el caudal circulante, no suelen generar grandes crecidas. Sin embargo, a veces su importancia reside en que sirven para aumentar el estado de humedad del terreno, favoreciendo la generación de escorrentía en episodios posteriores. Este tipo de lluvias se asocia normalmente a sistemas frontales de procedencia oceánica que, aunque pueden afectar a cualquier punto de la cuenca del Ebro, tienen una incidencia mayor en el cuadrante noroccidental de la cuenca.

- Lluvias de intensidad considerable y prolongadas en el tiempo, que provocan las riadas de mayor duración y, volumen y altos caudales de punta. En comparación con los hidrogramas obtenidos a partir de precipitaciones intensas y concentradas en el tiempo se puede decir que estos son más achabados en cuanto a forma, aunque pueden alcanzar caudales máximos tan elevados como los anteriores. Este tipo de precipitaciones son propias de climas oceánicos y son más frecuentes cuanto mayor sea la proximidad al mar, cosa que ocurre en el cuadrante noroccidental de la cuenca del Ebro. Los sistemas frontales también pueden reactivarse al llegar a una cordillera montañosa que hace un efecto de "trampolín", sobreelevando rápidamente las masas nubosas e incrementando la inestabilidad atmosférica. Esto suele ocurrir en la cuenca del Ebro cuando sistemas frontales procedentes del suroeste chocan con la cara sur de los Pirineos.

- Los umbrales de precipitación necesarios en una cuenca para que su suelo se sature y comience a generar escorrentía dependen del estado de humedad del suelo, de sus características geológicas, de la intensidad de las precipitaciones y de la cobertura vegetal de la cuenca. A mayor saturación e impermeabilidad del terreno, mayor intensidad de precipitación, y menor cobertura vegetal, le corresponden umbrales de precipitación menores (pueden incluso llegar a ser nulos). En general si partimos de condiciones de terreno seco y las precipitaciones son uniformes, los umbrales de precipitación en las diferentes subcuenca varían entre valores 10 mm (cuenca del Susía) y 30 mm (Bergantes y Ulzama).
- El valor de los coeficientes de escorrentía calculados en cada episodio depende claramente de la intensidad de las precipitaciones y de las condiciones de humedad del terreno. En general menores coeficientes de escorrentía se obtienen cuanto más intensa y concentrada en el tiempo es la precipitación y cuanto más elevado es el estado inicial de humedad, mayores son los coeficientes de escorrentía.
- Los tiempos de concentración dependen tanto de la superficie (que se relaciona con la longitud del cauce) de la subcuenca como de la pendiente media de la misma, siendo

la superficie de la cuenca el factor más influyente. En general cuanto mayor es la superficie y menor la pendiente de la cuenca, mayor es este tiempo.

- Para todas las subcuenca, analizando sus hidrogramas de avenida, el volumen asociado a escorrentías directas es mucho mayor que el asociado a flujos subterráneos e hipodérmicos, lo que implica que para que se genere una riada es necesario que existan escorrentías directas grandes.

Por último, de la comparación entre los parámetros hidrológicos obtenidos a partir del análisis de datos reales (los obtenidos a partir del análisis de los episodios) y los parámetros hidrológicos teóricos estimados se concluye que el método del número de curva refleja muy bien la escorrentía que se produce en cada subcuenca y que mediante la fórmula de Témez se estiman unos valores teóricos de los tiempos de concentración que también se ajustan muy bien a lo observado en los episodios.

Como trabajo futuro se plantea seguir en la línea de analizar más episodios históricos en otras subcuenca de la cuenca del Ebro. De esta forma se podrá disponer de una buena base de datos de episodios de avenida ocurridos en el pasado. En el caso de que las previsiones de la agencia estatal de meteorología den algún suceso de precipitación extrema, el SAIH registrará en sus aforos los primeros síntomas de crecida de caudal. Es entonces cuando el sistema de previsión se pone en alerta y se realizan simulaciones a tiempo futuro para poder caracterizar y prevenir la avenida que puede tener lugar aguas abajo. En este punto es cuando la base de datos de episodios históricos es útil para poder tener una información previa y de primera mano de cómo va a reaccionar la subcuenca ante un evento de las características previstas, asociado a todas las variables que se han analizado. En otra línea de trabajo, una vez que se ha comprobado que los valores de los números de curva en el modelo hidrológico del SCS se ajustan a lo que ocurre en la realidad y se ha venido observando en los episodios históricos; se va a proceder a simular los episodios relevantes con este modelo hidrológico para comprobar que el caudal de escorrentía en las estaciones de aforo es similar al que se midió y de esta forma calibrar bien los modelos para tener una buena herramienta de simulación. Siguiendo esta línea, el siguiente paso será acoplar a un modelo hidrológico de este tipo, SCS u otro, un modelo hidráulico que permita predecir a tiempo real lo que ocurrirá en un episodio de crecida. Otro paso importante será analizar otros aspectos que condicionen el hecho de que se generen o no avenidas, como las características geomorfológicas de la cuenca. Para ello habrá que hacer estudios de regresión y correlación no sólo de los caudales con la precipitación, sino también con los parámetros geomorfológicos de la cuenca.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [Ayala-Carcedo y Olcino 2002] Ayala-Carcedo F.J. y Olcino J., *Riesgos Naturales*. Ariel, S.A., 2002.
- [Batalla et al. 1999] Batalla, R.J., De Jong, C., Ergenzinger, P., Sala, M., *Field observations on hyperconcentrated flows in mountain torrents. Earth Surface Processes and Landforms*, 24: 247-253, 1999.
- [Batalla y Sala 1997] Batalla, R.J., Sala, M., *Estimaciones hidrológicas y de movimiento de sedimento en la crecida del 7 de agosto de 1996 en la cuenca del Barranco de Arás (Pirineo aragonés)*. Acta Geológica Hispánica, 30:(4): 51-59, 1997.
- [Brierley et al. 2005] Brierley, G.J. y Fryirs K.A., *Geomorphology and river management: Applications of the River Styles Framework*. Blackwell Pub., Oxford, U.K., 2005.
- [Brufau y Garcia-Navarro 2000] Brufau, P. y Garcia-Navarro, P. *Conceptos Básicos de hidrodinámica de superficie*. Copycenter 2000.
- [Burlando et. al 1997] Burlando, P., Mancini, M. y Rosso, R., *Impact of climate change on hydrological modelling and flood risk assessment, RIBAMOD, River basin modelling management and flood mitigation*. EU Commission, IV EU Programme on Environment and Climate, Proceedings of the First Expert Meeting, Brussels, 1997.
- [Chow et al. 1994] Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays, L.W., *Hidrologia aplicada*. McGraw-Hill Interamericana, S. A., 1994.
- [Conacher y Sala 1998] Conacher, A. y Sala, M., *Land degradation in mediterranean of the world*. John Wiley & Sons, 1998.
- [Franquet-Bernis 2005] Franquet-Bernis J.M., *Cálculos Hidráulicos de las conducciones libres y forzadas, una aproximación de los métodos estadísticos*. Copyrapid, 2005.
- [Gaspari et al. 2007] Gaspari, F.J., Senisterra, G.E. y Marlats, R.M., *Relación precipitación-escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo*. Rev. FCA UNCuyo. Tomo XXXIX: 21-28, 2007.
- [Llamas 1993] Llamas J., *Hidrología Aplicada, Principios y Aplicaciones*. Ed Gaetan Morin éditeur, 1993.
- [Maderey-Rascón 2005] Maderey-Rascón L.E., *Principios de hidrogeografía. Estudio del Ciclo hidrológico*. Serie de Tetos Universitarios.1-11, 2005.
- [Ollero 2006] Ollero A., Inundaciones y ordenación del territorio fluvial en la cuenca del Ebro, *Riesgo de inundaciones en el Mediterráneo Occidental*, Casa de Velázquez, Univ. de Alicante, 239-272, 2006.

- [Tenreiro 2003] Dal-Ré-Tenreiro, R., *Pequeños embalses de uso agrícola*, Mundiprensa, 2003.
- [Ward y Robinson 1990] Ward, R.C. y Robinson, M., *Principles of Hydrology*, McGraw-Hill Book Company Europe, 1990.
- <http://195.55.247.237/saihebro> (25/01/2011)
- <http://www.chebro.es> (03/02/2010)
- <http://www.ciclohidrologico.com> (20/12/2010)
- <http://www.encyclopedia.navarra.com> (9/12/2010)
- <http://es.wikipedia.org> (1/12/2010)
- <http://hedatuz.euskomedia.org> (5/11/2010)
- <http://www.larioja.org> (04/10/2010)
- <http://www.marm.es> (10/01/2011)
- <http://www.oph.chebro.es> (2/02/2011)
- <http://portal.aragon.es> (05/12/2010)
- <http://www.riosusia.com> (28/12/2010)