

INFLUENCIA DE LAS CARACTERISTICAS FISICAS DE LAS CUENCAS HIDROGRAFICAS EN LA FRECUENCIA E INTENSIDAD DE CRECIDAS

José M.^a García-Ruiz*
Juan Puigdefábregas-Tomás**
José Creus-Novau***

SUMMARY

INFLUENCE OF THE PHYSICAL CHARACTERISTICS OF RIVER BASINS IN THE FREQUENCY AND INTENSITY OF FLOODS.— Several river basins in the central part of the Spanish Pyrenees have been selected to study the relative influence of some physical characteristics (slope, height, radiation, litology and snow retention) in the generation of floods. From the correlations we have done it can be gathered that the importance of the highest rainfalls relegate to a really secondary place the environmental variables of a basin. The frequency of floods —above all in winter— is the result of such components as slope, height and the surface covered with snow.

En numerosas ocasiones se ha resaltado el carácter sintético de los cursos de agua. El caudal medio de un río se ha concebido así como resultado de una serie de variables físicas, algunas directa y otras indirectamente implicadas en el fenómeno. De entre ellas las precipitaciones se consideran las más importantes, muy por encima

* Departamento de Geografía. Colegio Universitario de La Rioja. Logroño.

** Centro pirenaico de Biología experimental. Jaca (Huesca).

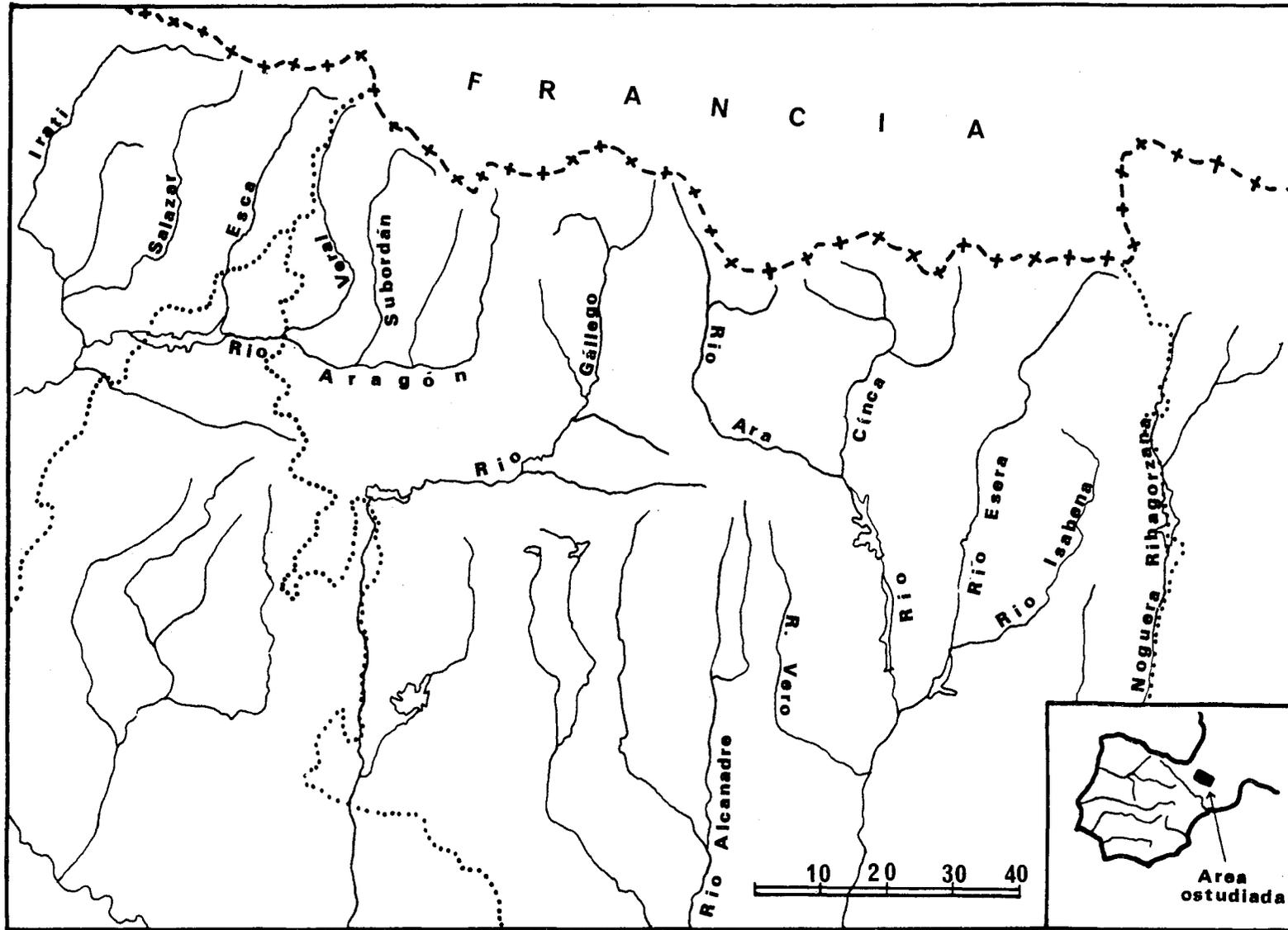
*** Departamento de Geografía. Universidad de Navarra.

de, por ejemplo, la litología, el trazado de la red o la pendiente. Lo cierto es que la relación llega a ser tan estrecha que las estimaciones acerca del caudal en cuencas no aforadas se realizan precisamente a partir de esas características físicas.

La bibliografía existente sobre el tema es relativamente numerosa, sobre todo en los 10 últimos años y dentro del área anglosajona. Sin embargo, su volumen se reduce lógicamente si se analizan aspectos más concretos de la escorrentía, como crecidas o estiajes. Es nuestro propósito en el presente trabajo analizar las relaciones existentes entre la intensidad y frecuencia de avenidas y el marco físico de una cuenca. Para ello localizamos el estudio en el Pirineo Central español, donde la importancia relativa de las crecidas presenta notables diferencias entre unas cuencas y otras y donde además existe una rápida variación espacial de sus componentes físicos. La conclusión del estudio debe ser la definición de las cuencas hidrográficas más torrenciales, es decir, de aquellas más sensibles a las grandes pulsaciones de caudal. Por otra parte, es indudable que de los resultados obtenidos se deducen cuáles son los factores ambientales más susceptibles de favorecer la generación de crecidas.

I. EL AREA OBJETO DE ESTUDIO

El estudio se localiza en el Pirineo Central español, fundamentalmente dentro de los confines de la provincia de Huesca. Una serie de ríos, caudalosos y de importante influencia nival, cortan las estructuras pirenaicas de forma transversal originando una serie de cañones y depresiones en función de la resistencia litológica diferencial. El nacimiento de los ríos principales tiene lugar dentro de lo que llamamos Pirineo axil, entre macizos con notable herencia glacial y altitudes que rozan o superan los 3.000 m. De oeste a este el relieve tiende a adquirir mayor consistencia, sobre todo en los macizos de Monte Perdido (3.355 m) y Aneto (3.404 m), donde aún se mantienen pequeños glaciares en equilibrio climático inestable. Su posición relativamente elevada en latitud y la importancia del relieve hacen de los Pirineos un área de precipitaciones abundantes, sobre todo a occidente, donde se deja sentir la influencia atlántica. En las sierras interiores y en el Pirineo axil se superan los 1.000 mm de media anual, con volúmenes muy superiores a partir de 1600-1800 m.



Red hidrográfica básica del Pirineo central español.

Es evidente que, desde un punto de vista hidrológico, el resultado no puede ser otro que la presencia de unos ríos caudalosos que se incorporan al Ebro por su margen izquierda y contribuyen a hacer de este último río es más caudaloso de la Península; con la particularidad de que el ritmo de precipitaciones queda en gran parte matizado por el ritmo retención/fusión nival, que —según su importancia— determina la aparición de unos modelos de esorrentía muy peculiares.

Para el presente estudio nos centramos en las llamadas cuencas básicas altoaragonesas, es decir en los ríos Aragón, Gállego, Ara, Cinca, Esera y Noguera Ribagorzana. Además, añadimos por su interés comparativo otra cuenca más bien prepirenáica, la del Isábena, y otras cuatro estaciones de aforo situadas en la cuenca del Aragón, con objeto de disponer de una gama más amplia de datos. No obstante, estos cuatro aforos sólo se utilizaron en el análisis de la intensidad de crecidas, al no disponer en ellos de datos de frecuencias. Las estaciones de aforo utilizadas, la dimensión de la cuenca y el período considerado aparecen en el cuadro n.º 1.

En definitiva, el complejo Cinca-Ara se constituye en el río más importante del Pirineo Central y más todavía cuando se le une el Esera. El Aragón, al drenar un importante sector altopirenáico, es el segundo río en importancia, mientras el Gállego y el Noguera Ribagorzana quedan muy lejos. En el Aragón y en el Gállego el invierno es un período de aguas altas, con ascenso aún mayor en mayo al coincidir con la fusión de nieve, mientras que en verano soportan estiajes relativamente intensos, sobre todo el Aragón. Hacia el este la esorrentía invernal se hace cada vez más pobre ante el proceso de retención nival junto a un descenso estacional de las precipitaciones; el máximo se alcanza en junio y el estiaje es poco pronunciado, especialmente en el río Esera.

II. METODOS

Se han estudiado diferentes características físicas referidas al marco espacial de cuencas hidrográficas. Para ello se han seleccionado aquellas que a priori parecen presentar una mayor incidencia en el desencadenamiento de crecidas. Asimismo, estas últimas han recibido un tratamiento estadístico que homogeneice las series y las haga comparables entre sí y relacionables con las características físicas.

CRECIDAS Y CARACTERISTICAS DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

1. Pendiente y altitud

Se utilizó como base el Mapa Militar de España a escala 1:50.000, que dispone de cuadrícula UTM de 1 km de lado. Para cada cuadrado se midió la altitud del punto central y la pendiente más representativa. A partir de ahí se pudieron determinar los valores de altitud y pendiente de cada cuenca hidrográfica. Tras varias pruebas decidimos utilizar la mediana de pendiente y el porcentaje de superficie situada por encima de 1600 m de altitud; este último límite está relacionado con la isoterma invernal de 0°. En ambos casos los valores más elevados se presentan en los ríos Ara, Cinca, Esera y Noguera Ribagorzana, es decir, en los sectores centrales del Pirineo, en torno a los macizos de Monte Perdido-Marboré y de Aneto-Maladeta. El mínimo se alcanza en el Isábena, en el Gállego y en el Aragón, que incluyen en sus cuencas notables extensiones prepirenaicas y de la depresión media.

Cuadro n.º 1. Datos básicos de las estaciones de aforo utilizadas

Río	Estación de aforo	Período utilizado	Dimensión de la cuenca (km ²)	Caudal medio anual (m ³ /sg)
Aragón	Yesa	1947-1973	2.191	50,01
Gállego	Santa Eulalia	1947-1973	1.901	30,70
Ara	Boltaña	1959-1973	626	21,61
Cinca	Ainsa	1959-1973	835	33,09
Esera	Graus	1947-1973	893	21,39
Isábena	Capella	1947-1973	426	6,24
N. Ribagorzana	Pont de Suert	1952-1973	558	17,58
Esca	Sigüés	1947-1973	506	11,16
Veral	Biniés	1947-1971	161	4,49
Subordán	Javierregay	1956-1973	348	13,37
Aragón	Jaca	1947-1973	238	8,27

2. Radiación

En las cuadrículas citadas anteriormente se señaló también la orientación de la pendiente más representativa. De ahí que se pudiera asignar a cada cuadrado un porcentaje de radiación potencial incidente respecto a una superficie llana situada a la misma latitud.

Para ello utilizamos las tablas de FRANK y LEE¹, que indican los valores de radiación potencial incidente en función de la latitud, exposición y pendiente. De esta manera, para cada cuenca, obtuvimos un valor medio de soleamiento.

En términos generales no existen grandes diferencias entre unas cuencas y otras, si bien destaca el Noguera Ribagorzana por su carácter más umbrío, seguido por el Cinca y el Ara. El Aragón —con casi todos sus afluentes, especialmente el Subordán—, el Esera y el Isábena son los que reciben mayor radiación.

3. Litología

En este apartado nos interesaba especialmente el porcentaje de superficie ocupado en cada cuenca por rocas impermeables. Para ello se elaboró un mapa litológico a escala 1:200.000 a partir de los mapas que ha publicado el Instituto Geológico y Minero de España a esa misma escala. No obstante, tuvimos que recurrir a una reelaboración propia, con información fragmentada de otros autores o de nuestras observaciones sobre el terreno, pues los citados mapas son esencialmente estratigráficos y tectónicos. Una vez elaborado el mapa se evaluó la superficie ocupada por rocas impermeables. Por razones que más adelante veremos, elaboramos dos tipos de datos: en unos se incluyeron las arcillas, margas y arcillas con areniscas, y en otro se añadió además el flysch.

Si no se incluye el flysch, las rocas impermeables ocupan importantes superficies en las cuencas del Aragón (hasta Yesa) y del Gállego, donde afloran las margas de la depresión media y las arcillas prepirenáicas; en menor medida se extienden por la cuenca del Isábena y por la cabecera del mismo río Aragón hasta Jaca. En el extremo opuesto se hallan las cuencas del Cinca y Noguera Ribagorzana y las de los ríos Esca, Veral y Subordán. Si el flysch se considera como roca impermeable, toda la cuenca del Aragón pasa a primer plano, como asimismo la cuenca del Ara, mientras Cinca, Esera, Isábena y Noguera Ribagorzana apenas ven cómo varían sus porcentajes.

1. Frank, E.C. y Lee, R., 1966.- *Potential solar beam irradiation on slopes*. U.S. Forest Services Res. Paper, Rm-18, 116 pp.

4. Retención nival

Para estimar el coeficiente de retención nival (porcentaje que representa el volumen de nieve acumulado en invierno con respecto al volumen de precipitación total) fue necesario calcular en primer lugar la cantidad de agua caída en cada una de las cuencas. Se utilizaron diversas estaciones meteorológicas y se calcularon regresiones entre la precipitación y distintas variables topográficas, tal como se detalla en otro trabajo².

El volumen de nieve se calculó suponiendo que toda precipitación caída durante la estación fría por encima de la isoterma de cero grados lo hace en forma sólida y se constituye temporalmente en reserva en espera de su fusión primaveral. Se establecieron, por ello, correlaciones entre temperatura y altitud, para localizar la situación de la isoterma de 0° entre diciembre y marzo, ambos inclusive, por ser esa la época de máxima retención nival. Como disponíamos de los datos de altitud en cuadrículas de 1 km de lado, el volumen de agua precipitado en forma de nieve se evaluó aplicando las regresiones empleadas para el cálculo de las precipitaciones en todos aquellos sectores situados por encima de la isoterma de 0°.

Las diferencias de retención nival entre unas cuencas y otras son muy significativas. Las cuencas del Noguera Ribagorzana, Cinca, Ara y Esera son las que presentan las cifras más elevadas, como corresponde a la mayor altitud media del relieve. Entre ellas se sitúan también los ríos Aragón (hasta Jaca) y Subordán, cuyas cuencas poseen una superficie menor y cuentan también con sectores elevados. La retención nival es sensiblemente menor en el Gállego y aún más en el Aragón (hasta Yesa), donde —tengámoslo en cuenta— sólo el 5,34 por 100 de la cuenca supera los 2.000 m de altitud. Por otra parte conviene precisar ahora que la fusión comienza y termina antes en los valles occidentales de la provincia de Huesca que en los centrales y orientales. Por supuesto, la nieve apenas influye en la cuenca del Isábena por su carácter más bien prepirenaico y en la del Esca por su escasa superficie por encima de 1600 m.

2. García-Ruiz, J.M.^a, Puigdefabregas-Tomás, J. y Creus-Novau, J. (en prensa).- *Los recursos hídricos de la provincia de Huesca*. Diputación Provincial, Huesca.

5. Métodos para cuantificar la intensidad y frecuencia de crecidas

Para cada cuenca era necesario disponer de datos sobre la intensidad de crecidas que fueran comparables entre sí y relacionables con las características físicas. Evidentemente no podía utilizarse la máxima crecida registrada durante el período analizado, en primer lugar porque no todas las estaciones de aforo abarcan el mismo espacio de tiempo y, en segundo lugar, porque el máximo registro puede deberse a alguna situación meteorológica excepcional que se repite sólo en un período de retorno muy largo que no tiene por qué ser similar para cada cuenca. Por ello, hemos tomado la serie de caudales máximos registrados cada año y le hemos aplicado una doble exponencial del tipo de Gumbel, lo que permitió estimar los caudales de avenida para diversos períodos de retorno. La bondad del ajuste de la ley de Gumbel se comprobó en cada caso mediante un test de Kolmogorov³. Para nuestros objetivos tomamos de cada recta la cifra correspondiente al período de retorno de 5 años.

Para el estudio de la frecuencia de crecidas acudimos a los datos diarios, por lo que previamente establecimos un límite cuantitativo a partir del cual puede hablarse de crecidas. Dicho límite se puso en $5 Q_m$, es decir en aquellos caudales que excedieran en 5 veces el caudal medio (o módulo) anual, siguiendo la pauta utilizada por otros autores para el estudio de ríos no muy torrenciales. Por otra parte, consideramos como una sola crecida aquellos días consecutivos en que se superan el umbral de $5 Q_m$. A partir de ahí obtuvimos en número total de crecidas durante el período estudiado e inmediatamente el número de crecidas por año, lo que da una idea de su frecuencia media. Asimismo, separamos las crecidas que tuvieron lugar durante la estación fría, de enero a abril, y obtuvimos una media anual de ocurrencia de crecidas invernales.

III. MAGNITUD Y FRECUENCIA DE LAS CRECIDAS EN EL PIRINEO CENTRAL

En el cuadro número 2 se incluye para cada aforo básico la cre-

3. Custodio, E. y Llamas, M., 1976.- *Hidrología subterránea*. Omega, 1.144 pp., Barcelona.

CRECIDAS Y CARACTERISTICAS DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

cida correspondiente a un período de retorno de 5 años y la frecuencia de avenidas. Se ha calculado también el módulo relativo de las avenidas máximas pues es evidente que los datos absolutos están muy influidos por la superficie de las cuencas, lo que impide toda comparación. Esta información aparece en lts/sg/km^2 . Todo ello se basa en datos máximos diarios, pero no instantáneos al faltar éstos en algunos aforos. Por otra parte, las series empleadas son aquellas incluidas en el cuadro n.º 1, si bien los Anuarios Hidrológicos incluyen datos más antiguos correspondientes bien a años aislados que carecen en la mayor parte de los casos de continuidad o bien a crecidas excepcionales de las que se ha podido recoger algún tipo de referencia.

Con toda la información reunida hemos comprobado que el fenómeno de las crecidas es relativamente frecuente, sobre todo en algunos ríos, y que los grandes máximos suponen aportaciones auténticamente excepcionales. Entre estos cabe citar la crecida del 23 de octubre de 1907 ($1.800 \text{ m}^3/\text{sg}$ en el Noguera Ribagorzana cerca de su desembocadura; $1.300 \text{ m}^3/\text{sg}$ en el Esera a la altura de Graus; $2.300 \text{ m}^3/\text{sg}$ para el Cinca en El Grado y $1.200 \text{ m}^3/\text{sg}$ para el Gállego en Santa Eulalia); y la de los días 26 y 27 de octubre de 1907 ($2.000 \text{ m}^3/\text{sg}$ para el Cinca en El Grado; $1.310 \text{ m}^3/\text{sg}$ para el Aragón en Yesa).

Cuadro n.º 2. Intensidad y frecuencia de crecidas

Río	Estación de aforo	Magnitud de crecidas (1) (en m^3/sg)	Módulo relativo lts/sg/km^2	Número de crecidas por año	Número de crecidas por invierno
Aragón	Yesa	606,0	276,5	2,2	1,2
Gállego	Santa Eulalia	371,2	195,3	2,8	1,3
Ara	Boltaña	351,1	560,9	2,9	0,9
Cinca	Ainsa	436,8	523,1	2,3	0,5
Esera	Graus	368,2	412,3	1,4	0,2
Isábena	Capella	176,9	415,3	3,1	0,9
N. Ribag.	Pont de Suert	214,5	384,4	0,9	0,1
Esca	Sigüés	203,2	401,6	---	---
Veral	Biniés	63,5	394,4	---	---
Subordán	Javierregay	187,7	539,4	---	---
Aragón	Jaca	113,5	476,9	---	---

(1) Correspondientes a un período de retorno de 5 años.

Es indudable que si atendemos a los datos absolutos de crecidas los más elevados coinciden con las cuencas de mayor extensión, si bien los resultados pueden matizarse en función de toda la serie de características ambientales. Así, las avenidas más espectaculares para el período de retorno estudiado corresponden a la cuenca del río Aragón en Yesa, seguidas por las del Cinca en Ainsa, mientras que la pequeña cuenca del río Veral proporciona cifras mucho más modestas en función de su reducida superficie.

Realizando un análisis más detallado acerca de la intensidad de crecidas concluimos los siguientes puntos:

a) Las cuencas pequeñas responden más rápida e intensamente a las precipitaciones máximas. Sin ser tales cuencas las que proporcionan las mayores cifras de caudal, sí son las que más disparan su aportación con respecto a su caudal medio. Sin duda, las grandes precipitaciones torrenciales suelen afectar en su máxima intensidad a espacios reducidos, cuencas pequeñas en definitiva, mientras que se diluyen en el conjunto de una gran cuenca.

b) Desde el año hidrológico de 1947-48 las mayores crecidas se han registrado en la estación de aforos de Fraga, que asimismo ocupa el primer lugar en el escalafón dimensional de las cuencas oscenses. Sin embargo, a continuación las máximas avenidas son las aportadas por el río Ara en Boltaña, con máximos instantáneos que se acercan a los $2.200 \text{ m}^3/\text{sg}$, a pesar de que la superficie drenada es bien reducida (626 km^2), aunque en caudales máximos diarios para un período de retorno de 5 años el río Ara queda por detrás de los ríos Aragón, Esera y Gállego.

c) Los mayores caudales específicos no se dan nunca en las cuencas grandes. Citemos, por ejemplo, que los $3.900 \text{ m}^3/\text{sg}$ registrados en Fraga (río Cinca) el 23 de octubre de 1907 representan sólo $405,7 \text{ lts}/\text{sg}/\text{km}^2$, o que la máxima avenida del Gállego en Santa Eulalia supone $631,2 \text{ lts}/\text{sg}/\text{km}^2$. Con ser importantes estas cifras, son las cuencas más pequeñas las que pueden originar una escorrentía más espectacular. Y así, para el Veral en Zuriza se ha llegado a estimar un caudal específico de $2.253 \text{ lts}/\text{sg}/\text{km}^2$ en la crecida de noviembre de 1968 o, más aún, en Boltaña (río Ara) se registraron $3.076,6 \text{ lts}/\text{sg}/\text{km}^2$ en noviembre de 1966.

Para nuestros objetivos es indudable que no podemos trabajar con datos absolutos de crecidas, por la influencia decisiva que ejerce el factor superficie. Para eliminar este factor hemos optado por

CRECIDAS Y CARACTERISTICAS DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

utilizar sólo el módulo relativo de la crecida correspondiente al período de retorno de 5 años, tal como aparece en el cuadro número 2. Las conclusiones son evidentes: el río Ara aparece como el más afectado por las crecidas en términos relativos, seguido por el Cinca y, ya más lejos, el Isábena y el Esera. Los más moderados son el Aragón y, sobre todo, el Gállego, a pesar de que el primero ha proporcionado caudales espectaculares en términos absolutos. Parece, pues, como si la intensidad de las crecidas tendiera a aumentar en el sector central del Pirineo, donde se alcanzan los más elevados valores alimétricos, mientras que hacia el este y, más aún, hacia el oeste tiende a disminuir sensiblemente.

Por lo que respecta a la frecuencia de crecidas, disponemos de una cifra media con el número de crecidas por año. Destaca el hecho de que el río con mayor frecuencia sea el prepirenáico Isábena, en el que se registran más de tres avenidas por año. En el conjunto de los ríos altopirenáicos la máxima frecuencia corresponde al río Ara, seguido por el Gállego. El Esera y el Noguera Ribagorzana presentan pocas pulsaciones importantes de caudal.

Con objeto de analizar las relaciones que pudieran existir entre características físicas y estacionalidad de las crecidas, decidimos separar las desencadenadas durante la estación fría, marcada hidrológicamente por la presencia de nieve en la cabecera. Cifrándonos a las crecidas de enero, febrero, marzo y abril, resulta que las mayores frecuencias corresponden a los ríos occidentales, Aragón y Gállego, menos en el Ara y en el Cinca y apenas en el Esera o en el Noguera Ribagorzana, donde se registra una crecida de estación fría cada cinco o cada diez años. Así, pues, se aprecia un claro gradiente decreciente de la frecuencia invernal de crecidas conforme se avanza de oeste a este y disminuye la influencia oceánica.

IV. RELACIONES ENTRE CARACTERISTICAS FISICAS Y MAGNITUD DE CRECIDAS

En el cuadro n.º 3 se incluyen los resultados obtenidos en el estudio de las características físicas de cada una de las cuencas básicas. A partir de ahí realizamos una serie de correlaciones lineales entre el módulo relativo de las crecidas (cuadro n.º 2) y los datos físicos, con objeto de llegar a algunas conclusiones acerca de cuáles son los factores físicos que favorecen la intensidad de

Cuadro n.º 3. Características físicas de las cuencas hidrográficas

Río	Aforo	Mediana pendiente	Altitud (1)	Radiación (2)	% rocas impermeables (3)	(4)	Coefficiente retención nival
Aragón	Yesa	27,4	15,15	88,49	28,6	71,31	9
Gállego	Sta. Eulalia	25,4	17,36	87,80	38,4	51,30	12
Ara	Boltaña	41,1	36,26	87,80	7,7	52,84	16
Cinca	Ainsa	44,8	52,10	87,53	2,8	17,40	18
Esera	Graus	39,1	41,21	88,16	15,7	15,70	15
Isábena	Capella	24,6	9,86	88,43	21,4	21,40	3
Nog. Ribagor.	Pont de Suert	46,3	66,31	85,05	3,3	3,3	21
Esca	Sigüés	29,5	7,30	88,48	0,4	57,35	4,4
Veral	Biniés	35,9	29,95	87,42	0	50,85	12
Subordán	Javierregay	34,7	32,76	89,99	0,9	60,60	16,2
Aragón	Jaca	36,5	48,32	87,85	16,2	52,05	20,8

(1) Porcentaje, con respecto al total de la cuenca, de superficie situada por encima de 1.600 m.

(2) Porcentaje de radiación recibida por una cuenca con respecto a la que recibiría una superficie horizontal.

(3) Arcillas, margas y arcillas con areniscas.

(4) Arcillas, margas, arcillas con areniscas y flysch.

CRECIDAS Y CARACTERISTICAS DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

avenidas. Digamos en principio que los resultados fueron en buena parte de los casos muy pobres, lo que nos llevó a concluir que el origen de las crecidas es ante todo complejo, con varios factores que en conjunto favorecen su magnitud, pero que en algunas cuencas carecen de importancia o son negativos, por lo que la correlación no puede ser elevada. De ahí la conveniencia de aplicar esquemas de correlación múltiple, cuyos resultados no han sido mucho más positivos. En cualquier caso, se ha trabajado con 11 datos para cada una de las variables físicas.

La única correlación significativa se alcanza con la superficie ocupada por rocas impermeables, aunque de signo negativo. La pendiente se acerca al umbral de significación, mientras que altitud, radiación y retención nival se muestran como variables físicas sin aparente influencia sobre la magnitud de las crecidas. Es interesante señalar ahora que la correlación con las rocas impermeables exige la exclusión del flysch.

Cuando la correlación es múltiple, el coeficiente más elevado se obtiene incorporando la retención nival a las rocas impermeables, y el resultado sigue siendo significativo por sí mismo aunque no lo es el incremento. Si incorporamos una nueva variable, la correlación más alta se halla añadiendo la altitud, perdiéndose entonces toda significación. Todo ello supone que tanto la retención nival como la altitud explican poco más que las rocas impermeables, si bien lo importante es que este último factor cambia de signo al analizarse en combinación con la retención nival.

V. RELACIONES ENTRE CARACTERISTICAS FISICAS Y FRECUENCIA DE CRECIDAS

A diferencia de la intensidad de crecidas, aquí hemos utilizado siete datos para cada variable pues el número anual e invernal de crecidas se evaluó sólo para las llamadas cuencas básicas.

En este caso, ninguna de las correlaciones simples efectuadas alcanza el umbral requerido de significación, si bien la obtenida con la altitud está rozando ese umbral⁴. La radiación y la retención nival se sitúan muy cerca, con datos que si no alcanzan el nivel de

4. La correlación es, sin embargo, significativa para un nivel del 90 por 100.

significación, están por encima de los obtenidos para la intensidad de crecidas.

Introduciendo mayor número de variables en la correlación el resultado más elevado se obtiene incorporando la pendiente a la altitud, alcanzándose así un coeficiente significativo por sí mismo para un nivel del 90 por 100. Con tres variables el coeficiente más alto se halla añadiendo a las anteriores la radiación, perdiéndose ya toda significación. En cualquier caso, es indiferente la consideración del flysch como roca impermeable o no.

Al separar la frecuencia de crecidas invernales se obtuvieron las correlaciones más elevadas del trabajo. La mejor se alcanza con la altitud ($r = -0.849$), siendo también significativa la conseguida con la pendiente ($r = -0.799$). En este caso, al trabajar con las rocas impermeables las mejores correlaciones se alcanzaban si se incluía entre ellas al flysch.

Al correlacionar la frecuencia de crecidas invernales con pares de variables, el resultado más elevado es el obtenido con la pendiente y las rocas impermeables, con un incremento no significativo aunque el dato sí lo es por sí mismo. Incorporando la radiación se mantiene el coeficiente por encima del umbral de significación.

Cuadro n.º 4. Correlaciones entre las características de las crecidas y los atributos físicos de las cuencas

Variables depend.	Variables independ.	Mediana de pendiente	Altitud	Radiación	Rocas impermeab.	Coef. de reten. nival
Intensidad de crecidas		0,585	0,419	0,178	-0,715*	0,378
Frecuencia anual de crecidas		-0,605	-0,742	0,670	0,421	-0,648
Frecuencia invernal de crecidas		-0,799*	-0,849*	0,610	0,325(1)	-0,640

* Significativos para un nivel del 95 por 100.

(1) Incluyendo al flysch dentro de las rocas impermeables.

CRECIDAS Y CARACTERISTICAS DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

Cuadro n.º 5. Análisis de regresión múltiple paso a paso
Contribución de las variables ordenadas

INTENSIDAD DE CRECIDAS

<u>Variables independientes ordenadas</u>	<u>Varianza explic. parcial</u>	<u>Varianza explic. total</u>
% Rocas impermeables	0,511	0,511*
Retención nival	0,041	0,552*
Altitud	0,011	0,563

FRECUENCIA ANUAL DE CRECIDAS

Altitud	0,551	0,551 ⁺
Pendiente	0,137	0,688 ⁺
Radiación	0,042	0,730

FRECUENCIA INVERNAL DE CRECIDAS

Pendiente	0,638	0,638*
% Rocas impermeables	0,258	0,896*
Radiación	0,015	0,911*

* Significativos para un nivel del 95 por 100.

+ Significativos para un nivel del 90 por 100.

VI. INTERPRETACION DE RESULTADOS

Del estudio de los resultados se desprenden inicialmente dos conclusiones:

a) La escasa o nula relación existente entre la intensidad de crecidas y las variables físicas aquí analizadas.

b) La aparición de numerosas crecidas de invierno o a lo largo del año responde a una serie de factores que, aparentemente, no tienen mucho que ver con los que afectan a la intensidad de crecidas.

En nuestra opinión, la influencia de las precipitaciones máximas

sobre la magnitud de las crecidas es tan grande que las demás variables físicas quedan relegadas a un plano muy secundario y apenas pueden reflejar por sí solas alguna influencia en las grandes crecidas. Tales variables no explican más que una pequeña parte de la intensidad y su variabilidad espacial. En todo caso, deben contribuir a aumentar o reducir el valor instantáneo de la crecida. Por otra parte, no conviene olvidar que el río con mayores crecidas —el Ara— posee valores muy destacados en cuanto a pendiente y altitudes y que la parte prepirenáica de su cuenca se encuentra ocupada en parte por rocas impermeables, con escasa vegetación y sometida a precipitaciones de carácter torrencial.

De todas formas, resulta sorprendente que la única correlación significativa con la intensidad de crecidas se alcance con las rocas impermeables, pero con signo negativo; es decir, que de acuerdo con este resultado las cuencas con mayor superficie de rocas impermeables son las que experimentan menores crecidas. Es indudable que este dato es totalmente contrario de lo esperado, pues la impermeabilidad dificulta la infiltración y favorece una rápida y mayoritaria escorrentía superficial.

Para explicar esta contradicción hay que recurrir a la distribución espacial de las precipitaciones máximas. Estas alcanzan una elevada intensidad en los tramos medios del Ara y Cinca lo que implica la gestación de grandes crecidas, precisamente en cuencas donde las rocas impermeables presentan una menor importancia. Sin embargo, interesa recordar que en unión de otras variables el factor litológico se comporta de forma positiva.

Por lo que respecta a la frecuencia anual de crecidas, tampoco se aprecia la incidencia decisiva de uno o varios factores, aunque la superficie por encima de 1600 m parece ejercer una cierta influencia. De todas formas, los resultados no acaban de ser convincentes, quizás porque muchas de las variables físicas tienen una incidencia esencialmente estacional. Partiendo de esta hipótesis separamos la frecuencia de crecidas invernales y ello demostró la validez de tal planteamiento. De los datos obtenidos cabe extraer las siguientes conclusiones:

a) La frecuencia invernal de crecidas viene determinada por dos variables muy relacionadas entre sí: la altitud y la pendiente; las cuencas con macizos más elevados son las menos susceptibles de experimentar frecuentes pulsaciones de caudal (Ara, Cinca,

CRECIDAS Y CARACTERISTICAS DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

Esera y Noguera Ribagorzana). Hay que tener en cuenta que tales cuencas coinciden con las áreas más continentales del Pirineo central, donde las precipitaciones invernales (tanto en intensidad como en frecuencia) disminuyen considerablemente. Pero también hay que añadir otro factor: la existencia en los macizos más elevados de grandes extensiones de calizas muy karstificadas que actúan a modo de esponjas que retienen siquiera sea momentáneamente la precipitación⁵.

b) Muy relacionada con la conclusión anterior, puede afirmarse que la nieve desempeña un papel de primera importancia; es decir, las cuencas que reciben una mayor innivación son menos propensas a aumentar su caudal durante el invierno. Ello no deja de ser lógico si se tiene en cuenta que la precipitación sólida se constituye en reserva, al menos durante varios días y cuando funde lo hace con relativa lentitud; por otra parte, en caso de precipitaciones líquidas la nieve hace las veces de gran esponja que absorbe la casi totalidad de la lluvia; que incluso se hiela y se incorpora a aquella durante la noche. En las cuencas poco o nada nivales la esorrentía es más inmediata, de forma que pueden acusar más directa e instantáneamente la incidencia de precipitaciones máximas.

Esta conclusión, sin embargo, no se deduce de la correlación obtenida entre frecuencia de crecidas y coeficiente de retención nival. Y es que la retención no es un índice real de la superficie ocupada por la nieve, sino una relación entre precipitación total anual y precipitación caída por encima de la isoterma de cero grados en invierno. En las cuencas que concentran más sus precipitaciones en primavera y otoño e incluso en verano (Ara, Cinca, Esera y Noguera Ribagorzana) el coeficiente tiende a ser más bajo al disminuir las lluvias invernales; y, sin embargo, cuando llueve en ellas, siempre lo hace en forma sólida por encima de una determinada altitud, quedando el suelo recubierto por un manto de nieve que durante buena parte del invierno no es tan potente como en las cuencas occidentales. Por esta razón, la frecuencia invernal de crecidas se correlaciona tanto con la altitud, mucho mejor que con la retención nival, porque de hecho aquella expresa mejor la superficie que recibe precipitación en forma de nieve.

La importancia del manto nival se deduce, por otra parte, de la

5. Por ejemplo, en los complejos kársticos de Góriz y Marboré en las cuencas altas del Ara y Cinca, o en los del alto Esera (Aigualluts).

regularidad de caudales durante los meses invernales en las cuencas más afectadas. El caudal se mantiene a niveles muy bajos (a veces inferiores a los estivales) y las precipitaciones registradas apenas suponen en el mejor de los casos un ligerísimo y breve aumento de caudal.

c) En tercer lugar, puede apreciarse, siquiera sea de forma incipiente, la incidencia de las rocas impermeables. Y así, estas últimas son las que con la pendiente obtienen una mejor correlación múltiple con la frecuencia invernal de crecidas. En todo caso, comprobamos que las rocas impermeables ofrecían una correlación múltiple más elevada si se les incluía el flysch. A priori era de esperar la importancia de esta variable, sobre todo si se analiza que la mayoría de las arcillas, margas y flysch se encuentran en los tramos medios y bajos de las cuencas estudiadas, por lo que están libres de manto nival durante el invierno y favorecen así aún más la escorrentía inmediata. Evidentemente, el flysch, con escasa capacidad de infiltración por su estructura hojaldrada de arcillas y areniscas, favorece durante el invierno la aparición de mayor número de crecidas⁶, que sin embargo ven reducida su intensidad por la capacidad de retención de las areniscas.

En definitiva, las cuencas con menor innivación, con mayor proporción de rocas impermeables y con un paisaje más degradado por erosión —fenómeno directamente ligado a la litología— son las más proclives a oscilaciones rápidas de caudal. En el caso de la magnitud de las crecidas el factor fundamental es la intensidad de las precipitaciones, matizadas por algunas variables físicas en un sentido u otro según la época del año. Lo cierto es que puede darse —como en la cuenca del Ara— la aparente contradicción de sufrir crecidas de gran violencia (debido al carácter torrencial de las precipitaciones en su cuenca media y baja en situaciones atmosféricas excepcionales) y pocas pulsaciones de caudal durante el invierno (debido al papel moderador de la nieve). En sentido contrario el Gállego —y algo menos el Aragón— ven subir su caudal con relativa frecuencia mientras sus crecidas son mucho más moderadas que las del Pirineo Central.

6. Y más si se piensa que su capacidad de absorción de agua se ve fácilmente saturada en invierno.