

# Metodología y normas de cálculo de crecidas de proyecto

Por RAFAEL HERAS

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

## 1 PLANTEAMIENTO GENERAL

Tiene un gran interés conocer los caudales de máximas crecidas para dimensionar los sistemas de desagüe y evitar o reducir los daños que pueden producirse en cauces fluviales o en zonas regables y núcleos urbanos.

Por otra parte, y por los perjuicios que produce en terrenos inundables, es, a veces, económico reducir los riesgos mediante obras de encauzamiento, corrección de cauces, defensa de márgenes y sistemas de drenaje. Para estudiar las obras de laminación, desagüe y defensa contra crecidas es necesario conocer lo más profundamente posible los caudales máximos previsibles, alturas alcanzadas por las aguas, la frecuencia de crecidas y el hidrograma completo de crecida para diferentes tiempos de recurrencia.

La existencia de un gran número de procedimientos de cálculo de crecidas de proyecto, sin que ninguno de ellos haya sido adoptado unánimamente, indica la magnitud y complejidad del problema y las diferentes actitudes o posiciones, a menudo contradictorias, que los especialistas sostienen sobre el tema. Ello es consecuencia de la no suficiente extensión de las series hidrometeorológicas utilizables y de la falta de garantía de los datos, particularmente de los valores extremos, además de la oposición de criterios y resultados que supone la consideración de los dos elementos primordiales dados al proyecto de toda obra: seguridad y economía.

Incluimos prescripciones de carácter general, que se debe cumplir en el proyecto de estructuras hidráulicas importantes, así como una descripción sumaria de los diferentes métodos potencialmente utilizables, señalando en cada caso su grado de aplicabilidad y/o garantía. Estos métodos son utilizables en otro tipo de proyectos, vías de comunicación, redes de drenaje, saneamientos, etcétera, cambiando únicamente los tiempos de recurrencia y completando, en algunos casos, la metodología de

cálculo. En contra de antiguos criterios, hay que considerar que el problema de supradimensionar los órganos de desagüe puede tener la misma o mayor gravedad que el infradimensionar, puesto que se pueden provocar artificialmente crecidas muy superiores a las naturales.

Especialmente en el caso del estudio de máximas crecidas para el proyecto de grandes presas, debe considerarse el problema de la seguridad de la presa y las modificaciones que produzcan los embalses en el régimen natural de las crecidas. Es decir:

- Máxima crecida de cálculo que debe ser adoptada para que su evacuación no ponga en peligro la estabilidad de la obra.
- Ponderación de los riesgos consecuentes al establecimiento de la obra, en cuanto a la creación o modificación de las crecidas en su recorrido a lo largo del cauce aguas abajo.

Respecto al primer punto hay que tener en cuenta que el fenómeno de la máxima crecida es muy complejo y depende de muchas variables, cuya probabilidad de coincidencia caracteriza el riesgo. Debido a esta complejidad, resulta no sólo recomendable, sino absolutamente necesario, el estudio del problema por los distintos métodos conocidos: directos, empíricos, estadísticos, hidrológicos y correlación hidrológica, siendo los hidrológicos los que tienen un mayor sentido físico y en los que cabe la posibilidad de estudiar bastante aceptablemente el fenómeno complejo de la máxima crecida. Los métodos estadísticos, cuyos resultados a nivel de cuantificar el caudal máximo serían los de mayor garantía, presentan el inconveniente de que, en general, no existen series suficientemente extensas que les proporcione la adecuada representatividad.

Las normas existentes para el dimensionamiento de aliviaderos utilizan tiempos de recurrencia muy altos —500 y hasta 1.000 años— de acuerdo con la idea de que así se logra un coeficiente de seguridad alto, justificado por los problemas, incluso catastróficos, producidos por insuficiencia de aliviadero. Por

ello, en algunos países se llegan a calcular máximas crecidas de tiempo de recurrencia de hasta 10.000 años, aunque este criterio no tiene hoy mucho sentido, ni hidráulico ni hidrológico. Los tiempos de recurrencia demasiado altos son absolutamente incontrolables en general, pues los cálculos obligan a extrapolaciones excesivas, y aun en el caso de que los valores teóricos sean sobrepasados por valores medidos durante el período de explotación, siempre podría justificarse estimando que dichos valores corresponden a un tiempo de recurrencia todavía más alto. Por otra parte, la vida media de utilización de una presa es del orden de 150 años a escala mundial, superior a la media en España e inferior a los 100 años en muchos países.

Parece lógico en el caso de grandes presas que, sin perjuicio de que el valor de la máxima crecida venga fijado para un tiempo de recurrencia amplio, éste debería variar en función de las condiciones hidrológicas y de acuerdo con los riesgos previsibles, que dependen, fundamentalmente, del tipo de presa, situación y problemas actuales y futuros aguas abajo.

Un criterio realista podría ser el realizar un estudio completo del hidrograma de máximas crecidas para un tiempo de recurrencia que tenga un sentido real y no teórico —del orden de cien años—, siempre en función de los datos que puedan utilizarse en cada caso y de las características hidrológicas de la cuenca. En el cálculo es difícil extrapolar con suficiente ajuste a tiempos de recurrencia superiores a dos o tres veces la extensión de la serie, aunque dependerá del tipo y grado de ajuste de las leyes de distribución de valores extremos. Después se estiman los coeficientes de seguridad necesarios, en función de las características de la presa y de los problemas aguas abajo, en cada hipótesis de tiempo de recurrencia y en base a los hidrogramas reales calculados.

Respecto al segundo punto, precisamente por la falta de niveles altos de garantía en la determinación de la máxima crecida se trata de evitar que puedan producirse situaciones provocadas artificialmente, más perjudiciales que las que sucederían de no existir la presa. Por tal motivo, es lógico que la suma de los caudales que puedan ser evacuados por todos los dispositivos sujetos a control no sea superior al caudal de la crecida de tiempo de recurrencia entre veinticinco y cien años, es decir, una crecida que no altere, al menos de modo esencial, las condiciones de riesgo preexistentes. La evacuación de la crecida máxima debe realizarse, en consecuencia, mediante una sobreelevación del ni-

vel del embalse sobre el máximo nivel normal, para lo cual la altura de presa asegurará el resguardo correspondiente. Las normas de explotación de los aliviaderos imponen que se actúe sobre las compuertas de manera que el nivel del embalse no se eleve sobre su máximo normal antes de que las compuertas queden totalmente abiertas.

Para otro tipo de estudios el planteamiento general es el mismo, aunque en vías de comunicación los tiempos de recurrencia a estudiar variarán entre veinticinco y cien años, y en drenajes y saneamientos de cero a veinticinco años, estando el valor medio del tiempo a considerar más cerca del extremo inferior del intervalo, salvo en casos especiales.

El primer problema que se plantea es el de la definición de «crecida de proyecto». La instrucción española para el proyecto, construcción y explotación de grandes presas establece que la capacidad total de desagüe ha de calcularse para la crecida normal  $T = 50$  años, pero indica simultáneamente que la altura de la presa ha de asegurar un resguardo que permita la laminación de la crecida máxima  $T = 500$  años, y su evacuación con los desagües disponibles. Como, por otra parte, es preceptivo el estudio del desagüe de crecida  $T = 100$  años para el aliviadero con una compuerta cerrada, parece evidente que, según se trate del proyecto del aliviadero o de la presa, se precisará conocer:

Para obtener la capacidad de desgüe controlado:

$Q_{\max. T = 50}$  años.

Para la presa, hidrograma de la crecida:

$T = 100$  años y  $T = 500$  años.

Considerando la extensión de las series de precipitaciones y caudales disponibles, parece aventurado y peligroso pretender extrapolar estos datos, con una cierta garantía, hasta obtener el hidrograma correspondiente a la crecida  $T = 500$  años. No así para la crecida  $T = 100$  años, por lo que esta crecida debería ser siempre la preceptiva. Para el estudio de la estabilidad y funcionamiento de la presa y sus órganos de desagüe se aplicaría un coeficiente de mayoración del hidrograma  $T = 100$  años, función de las características propias de la obra y de los daños potenciales aguas abajo, que, en una primera aproximación, puede obtenerse de la relación de caudales máximos para tiempos de recurrencia superiores comparados con el hidrograma de 100 años.

Debido al número de datos generalmente utili-

Los, nó parece correcto extrapolar directamente a tiempos de recurrencia superiores a 100 años; en cualquier caso, no debería pasarse de tiempos de días a tres veces la extensión media de las series utilizadas, que para ser representativas deben tener un mínimo del orden de 20 años.

Por tanto, debe calcularse, en general, el hidrograma correspondiente a un tiempo de recurrencia  $T = 100$  años, y a partir de este valor obtener los coeficientes de seguridad que dan los valores del hidrograma para tiempos de recurrencia superiores, en función de las características hidrológicas de la cuenca, y del tipo de obras y condiciones aguas abajo. En caso de vías de comunicación y drenajes y saneamientos se tomaran  $T = 25$  años en el primer caso, y  $T = 5$  años en el segundo, pudiendo duplicarse estos tiempos de recurrencia en casos especialmente desfavorables.

Independientemente de los preceptos establecidos, es indudable que en algunos casos puede ser obligado o interesar aumentar los tiempos de recurrencia anteriormente citados, por razones de seguridad, factores humanos, sociopolíticos y económicos.

El criterio económico —salvo en casos de posible riesgo catastrófico— induce a investigar el valor mínimo del coste global actualizado, constituido por los daños provocados en caso de destrucción de la obra y el costo de las obras de desagüe. Este mismo criterio podrá ser utilizado, por ejemplo, para definir la crecida de proyecto de las obras de desvío durante la etapa de construcción de la presa.

En general, una vez definida la crecida de proyecto por su  $Q_{max}$ , únicamente los métodos hidrológicos, basados en datos de precipitaciones y caudales, pueden proporcionar la forma del hidrograma de la crecida de proyecto. El hidrograma unitario debe utilizarse como método complementario y no tiene sentido real por la extrapolación que supone el método de la precipitación máxima probable.

Para definir la «crecida de proyecto» por su  $Q_{max}$  utilizan los métodos estadísticos (basados en el muestreo estadístico de datos hidrológicos), empíricos (utilizando fórmulas empíricas que incluyen una gran variedad de características geométricas y topográficas de la cuenca) y de correlación hidrológica (comparando con valores y registros conocidos en otras cuencas), proporcionan una amplia gama de posibilidades y de métodos que permiten definir un valor intermedio de entre los diferentes resultados que se obtienen. En cualquier caso, debe calcularse siempre el hidrograma de máximas cre-

cidas a partir de los resultados de los diferentes métodos.

Estos procedimientos resultan válidos para cuencas del orden de 5.000 km<sup>2</sup>. Si las cuencas son mayores, se dividirán en cuencas parciales, analizando las probabilidades de ocurrencia simultánea más desfavorable. En las cuencas del orden o inferiores a 100 km<sup>2</sup>, se completa esta metodología con procedimientos específicos incluyendo uno de los modelos físico hidrológicos.

En el caso de una cuenca de alimentación nivopluvial, al caudal determinado por lluvias deberá añadirse el correspondiente a la fusión de la nieve. Este es función de la superficie y profundidad de la capa de nieve, de su altitud, del número de horas de sol y de las máximas temperaturas probables que puedan producirse en esa época del año.

En el caso de crecidas con gran porcentaje de materiales de arrastre o en suspensión, deberán estudiarse con detalle los incrementos de nivel correspondientes a diferentes hidrogramas y con distintos porcentajes de caudal sólido, que debe estudiarse específicamente.

Deberá calcularse el caudal de máxima crecida para diversos tiempos de recurrencia, que en un estudio completo deberían ser de 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años, así como el hidrograma de máximas crecidas para los tiempos de recurrencia necesarios, que generalmente coinciden con éstos en grandes presas si se considera también la construcción. En casos de vías de comunicación, sólo se estudiarán 5, 10, 25, 50 y 100 años, y en drenajes y saneamientos, 5, 10 y 25 años.

## 2. METODOLOGIA DE CALCULO

En la metodología de cálculo se utilizan métodos directos estadísticos, empíricos, hidrológicos, y correlación hidrológica, con el siguiente orden y síntesis de cálculo:

- Se obtiene toda la información directa de máximas crecidas ocurridas anteriormente, definidas por sus valores máximos de caudales y precipitaciones, alturas máximas alcanzadas, etcétera. Es fundamental la información «in situ», incluso en el caso de que no existan valores numéricos medidos, de cualquiera de los parámetros de la máxima crecida. En general, para estudios de máximas crecidas no se consideran valores de caudales menores de  $\rho \cdot Q_m$  ( $\rho > 1$  y  $Q_m$ , caudal medio).

Se utilizan los métodos empíricos, que tienen como principal ventaja la facilidad de cálculo, y cuya limitación es consecuencia, fundamentalmente, de que los parámetros de cada una de las fórmulas utilizables están deducidos para cuencas específicas, debiendo ajustarse en cada caso, por comparación de las características hidrológicas generales o de los datos parciales que puedan conocerse en la cuenca. La mayoría de estas fórmulas relacionan, en general, el caudal máximo con la superficie de la cuenca, aunque en otras se incluyen también datos de intensidades máximas de precipitación, características físico-geográficas de la cuenca y tiempos de recurrencia.

- A continuación se utilizan los métodos estadísticos, partiendo de las series conocidas de caudales medios diarios o, en su caso, instantáneos, y de los valores máximos de precipitación en 24 horas, o en menores intervalos de tiempo, siendo la principal limitación el no conocer series suficientemente extensas de valores máximos y la dificultad de extrapolar a partir de valores medios, sobre todo teniendo en cuenta que en muchos casos tenemos que, a partir de series cortas, extrapolar a tiempos de recurrencia muy altos. Se considerará en cada caso la ley de distribución de mejor ajuste aplicando además la de Gumbel a las series básicas cuya extensión mínima representativa es del orden de 20 valores, siendo, en series menos extensas, la garantía menor, que deberá calcularse estadísticamente para conocer el porcentaje de error cometido.

En general, en precipitaciones y caudales se utilizan las series formadas por los valores máximos anuales, aunque algunas veces, si el período utilizable no es muy extenso, pueden emplearse las series formadas por dos valores máximos de cada año. A veces, con objeto de quedarse del lado de la seguridad, se usan como series básicas las formadas por el número de valores máximos igual al del período utilizable, pero seleccionando los valores, máximo-maximorum, aunque varios de ellos correspondan a un mismo año. Esta serie no tiene sentido físico, ni estadístico, pero puede utilizarse en caso necesario. De todas formas, se recomienda emplear para el cálculo las dos series citadas en primer lugar y ajustar los resultados obtenidos a partir de la primera de ellas.

Seguidamente, con los métodos hidrológicos se define el hidrograma completo. Se utiliza generalmente el método de isocronas y, en casos extremos, el hidrograma unitario, muy aceptable para pequeñas cuencas, pero muy peligroso para cuencas medianas y grandes, aunque puede servir como uno de los métodos de estudio, especialmente para estudios comparativos.

- Cuando se pueden utilizar cuencas afines hidrológicamente a la estudiada para contrastar valores obtenidos o para completar el estudio en caso de datos insuficientes, se utiliza el método de correlación hidrológica, que deduce los caudales máximos de una cuenca a partir de los obtenidos en la cuenca afín, pero considerando las correcciones básicas, geología, geomorfología, vegetación, datos físicos y régimen de precipitaciones.
- Finalmente, en función de los resultados obtenidos con todos los métodos y dando a cada uno de ellos un peso proporcional a la garantía estimada, se obtiene el hidrograma correspondiente a cada uno de los tiempos de recurrencia considerados. A partir de estos hidrogramas se calcularán los hidrogramas tipo más desfavorables, que serán los que se utilicen para el cálculo.

No describiremos los métodos directos empíricos, correlación hidrológica y métodos estadísticos que implícitamente van incluidos en la metodología de cálculo de los métodos hidrológicos y únicamente citaremos que los métodos estadísticos nos dan los valores máximos de caudal a partir de una ley de distribución.

Cuando existan series suficientes que utilizaremos para la estimación del hidrograma definitivo, y como pueden utilizarse se citan las fórmulas empíricas más acordes con los valores que corresponden a las cuencas españolas.

#### HERAS

$$Q \text{ (m}^3\text{/seg.)} = \rho \cdot i \cdot e \cdot S$$

- $\rho$  = coeficiente característico de la cuenca.
- $i$  = intensidad horaria de precipitación, en mm.
- $e$  = coeficiente de escorrentía.
- $S$  = superficie de la cuenca, en km<sup>2</sup>.

Con todos los datos utilizables en las cuencas hidrográficas españolas de caudales máximos medios e instantáneos y de precipitaciones máximas en 12 y 24 horas, se han estimado los parámetros de la

# METODOLOGIA Y NORMAS DE CALCULO DE CRECIDAS DE PROYECTO

Formulas que corresponden a un tiempo de recurrencia entre 100 y 500 años; para tiempos de 25 y 5 años se aplicarán a K índices reductores de 0,8 y 0,6, respectivamente.

p	i	e	S
0,25-0,45	10-55	0,40-0,90	S < 25
0,20-0,40	10-50	0,40-0,90	25 ≤ S < 100
0,15-0,35	10-40	0,40-0,90	100 ≤ S < 500
0,10-0,30	10-40	0,40-0,90	500 ≤ S < 1.000
0,10-0,25	10-30	0,40-0,80	1.000 ≤ S < 10.000
0,10-0,20	10-20	0,40-0,80	S ≥ 10.000

Obteniéndose la siguiente fórmula resumen:

$$Q \text{ (m}^3\text{/seg.)} = K \cdot S$$

que corresponde a los siguientes intervalos en valor medio:

0,85 ≤ K ≤ 5,50	S < 25
0,80 ≤ K ≤ 5,00	25 ≤ S < 100
0,60 ≤ K ≤ 3,50	100 ≤ S < 500
0,40 ≤ K ≤ 3,00	500 ≤ S < 1.000
0,20 ≤ K ≤ 1,70	1.000 ≤ S < 10.000
0,10 ≤ K ≤ 1,00	S ≥ 10.000

El intervalo de variación de K puede ajustarse en función de la precipitación máxima en 24 horas y de la geología y vegetación de la cuenca. Una vez ajustado, puede considerarse que el extremo inferior corresponde a T = 25 años y el superior a T = 500 años.

En caso de no existir otro tipo de datos, puede ajustarse el valor de K a partir de la precipitación máxima en 24 horas, suponiendo un intervalo máximo de variación de la misma entre 100 y 400 mm. Para estimar el tiempo de recurrencia se puede hacer la hipótesis mencionada de considerar como extremos 25 y 100 años e interpolar, suponiendo que siguen una ley de distribución semejante a la que tengan series representativas de precipitaciones máximas.

**PARAS**

$$Q \text{ (m}^3\text{/seg.)} = \alpha \cdot I_p^\beta \cdot S$$

= índice de pendiente.

= superficie (km<sup>2</sup>).

En esta continuación damos los valores medios estimados de los parámetros α y β para diferentes superficies en todas las cuencas españolas, que deben considerarse sólo a título indicativo.

S (km <sup>2</sup> )	α			β
	25	100	500	
<b>NORTE</b>				
S < 25	11	23	36	1,65
25 ≤ S < 100	10	17	23	1,45
100 ≤ S < 500	9	13	16	1,35
500 ≤ S < 1.000	8	12	15	1,30
1.000 ≤ S < 5.000	7	11	14	1,25
<b>DUERO</b>				
S < 25	10	18	27	1,65
25 ≤ S < 100	9	17	20	1,45
100 ≤ S < 500	8	10	13	1,35
500 ≤ S < 1.000	6	8	12	1,30
1.000 ≤ S < 5.000	3	6	11	1,25
<b>TAJO</b>				
S < 25	11	16	22	1,65
25 ≤ S < 100	8	12	17	1,45
100 ≤ S < 500	7	10	13	1,35
500 ≤ S < 1.000	5	8	12	1,30
1.000 ≤ S < 5.000	3	6	11	1,25
<b>GUADIANA</b>				
S < 25	14	18	23	1,65
25 ≤ S < 100	10	12	15	1,45
100 ≤ S < 500	8	10	13	1,35
500 ≤ S < 1.000	5	8	12	1,30
1.000 ≤ S < 5.000	2	6	11	1,25
<b>GUADALQUIVIR</b>				
S < 25	9	18	29	1,65
25 ≤ S < 100	8	15	17	1,45
100 ≤ S < 500	6	10	13	1,35
500 ≤ S < 1.000	4	8	12	1,30
1.000 ≤ S < 5.000	2	6	11	1,25
<b>SUR</b>				
S < 25	21	40	59	1,65
25 ≤ S < 100	14	29	47	1,45
100 ≤ S < 500	11	16	22	1,35
500 ≤ S < 1.000	8	12	17	1,30
1.000 ≤ S < 5.000	6	11	16	1,25
<b>SEGURA</b>				
S < 25	22	36	54	1,65
25 ≤ S < 100	15	23	35	1,45
100 ≤ S < 500	10	13	16	1,35
500 ≤ S < 1.000	5	8	12	1,30
1.000 ≤ S < 5.000	2	6	11	1,25
<b>JUCAR</b>				
S < 25	27	45	63	1,65
25 ≤ S < 100	25	41	58	1,45
100 ≤ S < 500	13	19	26	1,35
500 ≤ S < 1.000	8	12	17	1,30
1.000 ≤ S < 5.000	6	11	16	1,25

## METODOLOGIA Y NORMAS DE CALCULO DE CRECIDAS DE PROYECTO

S (km <sup>2</sup> )	α			β
	25	100	500	
<b>EBRO</b>				
S < 25	23	36	54	1,65
25 < S < 100	16	29	47	1,45
100 < S < 500	11	13	19	1,35
500 < S < 1.000	6	12	17	1,30
1.000 < S < 5.000	2	11	16	1,25
<b>PIRINEO ORIENTAL</b>				
S < 25	30	45	63	1,65
25 < S < 100	20	35	52	1,45
100 < S < 500	13	18	25	1,35
500 < S < 1.000	10	16	22	1,30
1.000 < S < 5.000	8	15	21	1,25
<b>BALEARES</b>				
S < 25	10	18	27	1,65
25 < S < 100	7	12	17	1,45
<b>CANARIAS</b>				
S < 25	10	32	45	1,65
25 < S < 100	12	23	35	1,45

### FORMULA RACIONAL

$$Q \text{ (m}^3\text{/seg.)} = \frac{e \cdot I \cdot S}{3,6}$$

e = coeficiente de escorrentía.

I = intensidad más desfavorable, en mm/h.

S = superficie de cuenca, en km<sup>2</sup>.

### TEMEZ

$$Q = 0,03 P S^{3/4} \log \cdot T$$

Q (m<sup>3</sup>/seg.).

P (mm) = máxima precipitación diaria de T = S.

S (km<sup>2</sup>) = superficie de cuenca > 500 km<sup>2</sup>.

T = período de retorno.

### FORMULA COMPLETA

$$Q = \frac{e \cdot I \cdot S}{n}$$

Q = (m<sup>3</sup>/seg.) = caudal punta correspondiente a un período de retorno dado.

I (mm/h.) = máxima intensidad media en el intervalo de duración T<sub>e</sub>, para el mismo período de retorno.

S (km<sup>2</sup>) = superficie de la cuenca.

n = 3 para 25 < S < 100.  
 3,5 para 100 ≤ S < 1.000  
 4 para 1.000 ≤ S < 10.000.  
 5 para S ≥ 10.000.

e = coeficiente de escorrentía del intervalo donde se produce I. Se calcula en función de datos reales de características de suelo, vegetación, topografía y precipitación, y en general es normal que T > 100 e > 0,70.

En España los índices cuantitativos de valoración media de e por cuencas son: Norte, 1; Duero, 1; Tajo, 1,1; Guadiana, 1,1; Guadalquivir, 1,1; Sur, 1,3; Segura, 1,3; Júcar, 1,2; Ebro, 1,2; Pirineo Oriental, 1,2; Baleares, 1,2; Canarias, 1,3.

### 2.1. Métodos hidrológicos

Estos métodos tratan de reproducir en gabinete el fenómeno hidrológico. Tienen la ventaja de que, en el caso de que puedan estimarse suficientemente los parámetros necesarios, se puede reproducir bastante aceptablemente el fenómeno. Por el contrario, en el caso de que haya que extrapolar alguna de las variables su utilización resulta arriesgada. Los métodos más utilizados son el de isocronas y el hidrograma unitario, y no se recomienda el de precipitación máxima probable.

El más recomendable es el método de isocronas, pues el hidrograma unitario necesita datos normalmente no existentes y trabaja a una escala muy pequeña, que puede producir errores acumulativos muy importantes e hipótesis de cálculo muy simplificativas que, en general, son representativas en cuencas de pequeña superficie —menos de 500 Km<sup>2</sup>—. Tiene la ventaja de ser fácilmente estandarizable y ser muy útil para comparación de cuencas, es decir, debe utilizarse este procedimiento como complementario y nunca, salvo en pequeñas cuencas, como base del estudio. El método de precipitación máxima probable no se recomienda por dar resultados excesivamente altos, del orden de tres o cuatro veces los máximos valores reales posibles.

Tendremos que estimar, para utilizar este método, la intensidad de precipitación, las velocidades de propagación de la onda de crecida —que suele suponerse constante e independiente de la intensidad—, el coeficiente de escorrentía y el tiempo de duración del temporal. Aunque las tres primeras variables son distintas para las diversas zonas parciales de la cuenca, especialmente habría que distinguir cabecera, tramo medio y cuenca inferior, en

general, y por falta de datos suficientes se utilizan valores constantes para toda la cuenca en cada una de las hipótesis; para fijar estos valores se utilizan datos directos o se estiman por medio de fórmulas empíricas, métodos estadísticos o por comparación con otras cuencas de características parecidas.

La velocidad de propagación de la crecida debe obtenerse, a ser posible, de medidas directas realizadas en crecidas anteriores y, en caso de que esto no sea posible, por medio de fórmulas empíricas, por métodos hidráulicos o utilizando las características físico-geográficas de la cuenca, pudiendo decirse que, en orden de magnitud referido a cuencas no excesivamente pequeñas, la velocidad puede variar entre 4 y 8 km/h. Esta velocidad, a partir de la cual se determinan las curvas isocronas, utilizando únicamente una cartografía convencional hidrográfica y geográfica, se contrasta a partir de fórmulas empíricas, calculando directamente la velocidad o contrastando con el tiempo de concentración resultante.

El valor del tiempo de concentración de una cuenca es función de sus características morfológicas y proponemos estimarlo mediante las fórmulas:

$$T_c = 0,3 \left[ \frac{L}{J^{1/4}} \right]^{0,75}$$

$T_c$  (h.) = tiempo de concentración.

$L$  (km.) = longitud del curso principal.

$J$  = pendiente media del curso principal.

BIANDOTTI

$$t_c = \frac{4\sqrt{S} + 1,5 L}{0,8\sqrt{H}}$$

debe verificarse  $\frac{L}{3.600} \geq t \geq \frac{L}{3.600 \times 1,5}$

donde  $t_c$  = tiempo de concentración en horas.

$S$  = superficie, en km<sup>2</sup>.

$L$  = longitud del río principal, en km.

$H$  = altura media, en metros, es decir, descontando la cota origen de la cuenca sobre el punto estudiado.

VENTURA-HERAS

$$t_c = \alpha \sqrt{\frac{S}{I}}$$

$t_c$  = tiempo de concentración, en horas.

$S$  = superficie, en km<sup>2</sup>.

$I$  = pendiente media.

Generalmente,  $0,3 \leq \alpha \leq 0,15$ ; valor medio,  $\alpha = 0,05$ .

La velocidad también puede obtenerse por fórmulas empíricas, siendo las más utilizadas:

$$V \text{ (m/seg.)} = a I^{1/3} Q^{1/4}$$

$I$  = pendiente media (m/km.).

$Q$  (m<sup>3</sup>/seg.) = caudal máximo para un período de retorno,  $T$ .

$a$  = parámetro que depende de la rugosidad.

$$a = \frac{0,15}{(20 n)^{3/4}}$$

$0,04 \leq n \leq 0,08$

que disminuye en proporción inversa a la pendiente.

$$V = C \sqrt{RI}$$

$V$  = velocidad.

$I$  = pendiente.

$R$  = radio hidráulico.

$$C = \frac{1}{n} R^x$$

$\frac{1}{n}$	100	75	50	25	5
$x$	1/8	1/7	1/6	1/3	1/2

La velocidad máxima de propagación puede calcularse también por la fórmula de Heras:

$$V \text{ (km/h.)} = K I_p$$

$I_p$  = índice de pendiente.

$$50 \leq k \leq 100$$

variando en función de las características geológicas y de vegetación, y especialmente de la intensidad de precipitación, oscilando ésta entre 100 y 400 mm. de precipitación máxima en 24 horas. Esta velocidad debe considerarse como de propagación en el cauce, siendo la velocidad media de propagación de la cuenca del orden del 50 % de la calculada.

Como la intensidad de precipitación se reduce notablemente con la duración del temporal, generalmente los valores máximos de crecida corresponden a temporales cuya duración sea del orden del tiempo de concentración. En cualquier caso se suelen hacer las siguientes hipótesis:

- Se supone una velocidad media de propagación en toda la cuenca, obtenida por media ponderada de las velocidades en la zona alta, media y baja. Los errores que se cometen no son importantes, puesto que, en cualquier caso, se estudiará la hipótesis más desfavorable —tiempo de duración análogo al tiempo de concentración en que toda la cuenca produce escorrentía—, aunque las isocronas serán diferentes y habrá pequeñas variaciones de la intensidad unitaria, según los diversos tiempos de concentración en cada caso.
- Se supone que la precipitación empieza y termina simultáneamente en toda la cuenca, hipótesis suficientemente válida en cuencas no muy grandes. En algunos casos conviene considerar la hipótesis más desfavorable, que supone que el temporal empieza en cabecera y se propaga hasta afectar a toda la cuenca, siguiendo una dirección análoga al cauce principal.
- Puede suponerse un coeficiente de escorrentía único, media ponderada de los estimados en los diferentes tramos de la cuenca.
- Se estudian siempre, y como mínimo, tres hipótesis de cálculo, de tiempos de duración del orden de magnitud de  $t_c$ ,  $1/2 t_c$  y  $3/2 t_c$ , siendo  $t_c$  el tiempo de concentración.

Para aplicar el método de las isocronas es necesario descompensar la superficie de la cuenca en un cierto número de zonas ( $S_1, S_2, S_3...$ ), limitadas por líneas (isocronas), de forma que una gota de agua que caiga en una de estas zonas tarda en llegar tiempos sucesivos de valor  $t, 2t, \dots, nt$ , siendo  $t$  la unidad de tiempo considerada, generalmente horas. Se halla así el tiempo que tarda en llegar el agua al punto estudiado desde una serie de puntos con los que, a semejanza de las curvas de nivel de un levantamiento topográfico, se dibujan las curvas isocronas.

Se recomienda utilizar, en función de la superficie, cartografías comprendidas entre 1 : 5.000 a 1 : 200.000 correspondientes a superficies desde 100 a 50.000 km<sup>2</sup> y trazar respectivamente las curvas isocronas en intervalos de media a cuatro horas. En cualquier caso, el intervalo de tiempo de separación entre isocronas debe calcularse de forma que el número de zonas delimitadas sea cinco, como mínimo.

Multiplicando el área comprendida entre cada dos de estas curvas por la intensidad de precipitación y por el coeficiente de escorrentía supuesto,

se obtienen los caudales producidos por las precipitaciones en cada una de estas zonas. Una vez obtenidos estos caudales se hallan los acumulados, con lo cual obtendremos los caudales que llegarán en cada instante, a partir del momento inicial, suponiendo un tiempo de lluvia infinito. Desplazando horizontalmente esta curva en el tiempo de duración de la lluvia y hallando la curva diferencia de los dos, se obtienen los caudales reales estimados que llegan en cada instante en forma de hidrograma, en el cual, generalmente, la rama descendente es mucho más suave que la ascendente, por ser el vaciado de los cauces más lento que el llenado.

En una cuenca con 5 zonas definidas entre isocronas, el esquema sería, para duraciones iguales, mayores o menores que el tiempo de concentración, por ejemplo 5, 6 y 4, el siguiente:

Horas	Caudal de desagüe producido por las diferentes zonas
1.....	1
2.....	1 + 2
3.....	1 + 2 + 3
4.....	1 + 2 + 3 + 4
5.....	1 + 2 + 3 + 4 + 5
6.....	2 + 3 + 4 + 5
7.....	3 + 4 + 5
8.....	4 + 5
9.....	5
10.....	—
1.....	1
2.....	1 + 2
3.....	1 + 2 + 3
4.....	1 + 2 + 3 + 4
5.....	1 + 2 + 3 + 4 + 5
6.....	1 + 2 + 3 + 4 + 5
7.....	2 + 3 + 4 + 5
8.....	3 + 4 + 5
9.....	4 + 5
10.....	5
11.....	—
1.....	1
2.....	1 + 2
3.....	1 + 2 + 3
4.....	1 + 2 + 3 + 4
5.....	2 + 3 + 4 + 5
6.....	3 + 4 + 5
7.....	4 + 5
8.....	5
9.....	—

Como orden de magnitud de los valores máximo «maximorum» de precipitaciones en 24 horas

## METODOLOGIA Y NORMAS DE CALCULO DE CRECIDAS DE PROYECTO

Para una cuenca, caracterizada por un único valor puntual, se pueden utilizar los siguientes porcentajes, en función de la superficie de la cuenca:

S (km <sup>2</sup> )	25	50	100	500
% del valor puntual	90	85	80	60

Para el cálculo de las intensidades unitarias máximas se aplica a la serie de precipitaciones máximas en 24 horas o en intervalos menores, si existen series suficientes, la ley de distribución de mejor ajuste y/o la de Gumbel, determinándose para los diversos tiempos de recurrencia los valores máximos de precipitación en 24 horas o en intervalos menores, a escala anual y mensual, seleccionando en este último caso los dos o tres meses más desfavorables y de acuerdo con las hipótesis de cálculo citadas en los métodos estadísticos. A partir de estos meses, y si hay datos y ajuste suficientes, se estiman las curvas intensidad duración para las diferentes frecuencias, y a partir de estas curvas se estiman las intensidades unitarias. En caso de no tener datos suficientes, se puede admitir que, como orden de magnitud, la precipitación en 12 horas es del orden del 70 % de la de 24 horas y, como estimación general, que la magnitud de la intensidad horaria está comprendida entre 1/3 y 1/6 de la precipitación máxima en 24 horas.

Para tiempos de recurrencia  $T > 50$  años puede considerarse la siguiente distribución media de porcentajes de precipitación máxima en 24 horas; como orden de magnitud, y en valor medio máximo, puede utilizarse, también en cuencas menores de 500 km<sup>2</sup>, la tabla siguiente de porcentajes de precipitaciones en 12 horas.

Horas	%	Horas	%
24	100	6	100
18	90	5	95
12	80	4	85
6	60	3	75
3	45	2	65
2	40	1	50
1	35		
1/2	25		

Para el cálculo de la intensidad de precipitación en función del tiempo se utilizan fórmulas del tipo:

$$i = \frac{a}{t + b}$$

donde  $i$  (mm/h.),  $t$  (minutos),  $2.500 \leq a \leq 5000$  y  $10 \leq b \leq 25$ . Puede considerarse que el valor inferior de  $a$  corresponde a valores má-

ximos de precipitación, para  $T = 500$  años, de 200 milímetros y el superior de 400 mm.

Para tiempos no muy reducidos se utilizan fórmulas del tipo:

$$i = \frac{k}{t^\beta}$$

en la que la precipitación crece con relativa lentitud en relación con la duración del temporal, siendo  $i$  (mm/h.),  $t$  (minutos) y  $400 \leq k \leq 1.600$ ;  $0,7 \leq \beta \leq 0,9$ . Se puede suponer que el extremo inferior del intervalo corresponde a  $T = 25$ , y el superior, a  $T = 500$ .

También se emplean fórmulas que dan la ley de intensidad de precipitación horaria en función del período de recurrencia,  $T$ , y de la duración del temporal,  $t$ :

$$i = k \frac{T^\alpha}{t^\beta} \quad \begin{array}{l} T \text{ (años)} > 100 \\ t \text{ (minutos)} \\ i \text{ (mm/h.)} \end{array}$$

siendo  $0,15 < \alpha < 0,25$ ;  $0,5 < \beta < 0,8$ ;  $400 \leq k < 1.600$

pudiendo hacerse corresponder los extremos de los intervalos a tiempos de recurrencia de  $T = 25$  a  $T = 500$  años.

Todas estas fórmulas tienen la ventaja de que son muy fáciles de utilizar y el inconveniente de que es necesario ajustar los parámetros de cada una de ellas a la cuenca que se estudia, aunque en los casos en que se tiene un mínimo de datos pueden estimarse dichos parámetros aceptablemente.

El «coeficiente de escorrentía» se obtiene directamente a partir de valores conocidos de otras crecidas medidas en la misma zona, y en caso de no existir estos datos se puede estimar a partir de las escorrentías anuales, mensuales y diarias máximas conocidas, mayorando los valores obtenidos en función de las características hidrológicas de la cuenca, variando el coeficiente de mayoración entre 1,2 y 1,5. El coeficiente de escorrentía puede calcularse por media ponderada a partir de las características hidrológicas de la cuenca, datos físicos, tanto por ciento de pendiente, índice de pendiente, índice de compacidad y de las características del suelo, vegetación y uso de la tierra. El método más utilizado, en función de las características, es el de U.S.S.C.S., pero requiere unos datos mínimos utilizables. En la mayoría de los casos no es difícil ajustar este coeficiente de escorrentía, de forma que nos deje del lado de la seguridad. Pueden, como orden de magnitud y en valor medio, considerarse los siguientes valores que relacionan la intensidad y

el coeficiente de escorrentía para T = 100 años:

i (mm/h.)	e (coeficientes escorrentía)
5	0,5
10	0,7
15	0,8
20	0,85
25	0,90
50	0,95

Por supuesto, estos valores están especialmente condicionados por las características geológicas y de vegetación y topografía de la cuenca.

**2.1.1. Hidrograma, frecuencia y garantía**

Finalmente, los resultados de los diferentes hidrogramas se corrigen afectándolos de un «coeficiente reductor» característico de la cuenca y función, principalmente, de los datos básicos de cálculo utilizados. Este coeficiente se obtiene de los datos máximos, estudiando la probabilidad de coincidencia simultánea, a escala anual y mensual, y varía entre 0,65 y 0,95. En el caso de España puede tomarse 0,8 para las cuencas del Norte, Duero, Tajo, Guadiana, Guadalquivir y Baleares, y 0,9 para el resto de las peninsulares y Canarias. La razón de este coeficiente reductor estriba en haber supuesto intensidades máximas homogéneas, pero en la realidad estas intensidades son menores, debido a la no coincidencia simultánea en toda la cuenca de los valores máximos en todas las estaciones.

Se utilizarán los resultados de los diferentes métodos, dando, a efectos de caudal máximo, un mayor peso a los métodos estadísticos, siempre que haya series suficientes y de garantía. Se tendrá en cuenta que, incluso en los casos más desfavorables de falta de datos, es posible utilizar métodos hidrológicos y ajustar el hidrograma para diferentes hipótesis de cálculo por el método de isocronas, considerando también los resultados obtenidos por métodos directos y empíricos y, en su caso, los de correlación hidrológica. En función de todo lo citado se obtendrán los hidrogramas finales para las distintas hipótesis de cálculo y para los diferentes tiempos de recurrencia considerados.

Debe considerarse, para fijar los tiempos de recurrencia, el riesgo de crecida, en función del período de retorno y de los años de vida útil y del riesgo admitido.

$$T = N \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{2} \right)$$

T = período de retorno.

R = riesgo admitido de que la crecida sea igual o superior a la prevista;  $R \leq 0,50$ .

N = años de vida útil de la obra;  $N \geq 10$ .

Deberá considerarse también la probabilidad de alcanzar o sobrepasar el caudal considerado obteniéndose unos valores límites de  $P_t = 0,65$  y  $Q_t = 0,35$ , siendo:

$P_t$  = probabilidad de que en T años se presente por lo menos una vez una crecida superior a la de recurrencia T, y

$Q_t$  = probabilidad de que en T años no se presente nunca una crecida igual o superior a la de recurrencia T.

Y para los períodos más utilizados, será:

Período de retorno T (años)	Probabilidad de que en un período de duración T se alcance o sobrepase el caudal considerado
2	0,75
5	0,67
10	0,65
25	0,64
50-100-500	0,63

El número de años necesarios para tener la certeza estadística,  $P > 0,999$ , de que se producirá una crecida igual o superior a la de recurrencia T, es del orden de siete veces el tiempo de recurrencia considerado.

Como es lógico, es muy importante la extensión de las series utilizables, puesto que el grado de error o garantía en el ajuste de cualquier ley de distribución dependerá, principalmente, de la extensión de la serie.

Como orden de magnitud, para tener los resultados con garantía del 95 % y un error  $\pm 25$  %, la extensión de la serie para cada tiempo de recurrencia debe ser:

Extensión de la serie (número años)	Tiempo de recurrencia T (años)
20	10
30	25
40	50
50	100
100	500

**2.1.2 Hidrograma tipo**

En muchos casos, pero principalmente para mencionar, el sistema de desagües en grandes presas, es necesario calcular el «hidrograma tipo» a utilizar en los cálculos de dimensionamiento y, en especial, para estudiar el efecto de la laminación de

la máxima crecida. Puede definirse como «hidrograma tipo» más desfavorable, para un cierto tiempo e frecuencia, aquel que incluya, tanto a efectos hidrológicos como hidráulicos, los valores más desfavorables que puedan producirse. Por lo tanto, y a partir de los hidrogramas obtenidos, deberá tenerse en cuenta lo que denominamos «situación anterior», es decir, la situación de la cuenca a efectos de escorrentía en el momento de comenzar el temporal, y también la probabilidad de que se produzcan dos temporales consecutivos de diferentes tiempos de recurrencia.

Este hidrograma tipo puede obtenerse considerando un tiempo de duración de la tormenta igual al que produce el máximo caudal en las distintas hipótesis de hidrogramas estudiadas, recomendándose trabajar con  $T = 100$  años y, en caso necesario, estimar los valores para tiempos de recurrencia mayores.

A partir de los datos utilizables en España de hidrogramas medidos con suficiente nivel de garantía y con la incertidumbre de no conocerse bien el tiempo de recurrencia a que corresponden, se ha adoptado el siguiente artificio de cálculo, que puede admitirse como una primera aproximación, aceptable para el cálculo en la mayoría de los casos.

El coeficiente de escorrentía se obtiene multiplicando el anterior por un coeficiente que varía de 1/2-1/3. A partir del nuevo hidrograma obtenido y cortando la rama descendente entre 1/2 y 3/4 de la duración total —puede tomarse en general el punto de inflexión de la rama descendente—, se añade el hidrograma anteriormente citado de máximo caudal y la parte final del tramo descendente como paralelo al primer hidrograma, siendo el así obtenido el que podría corresponder al producido por acumulaciones sucesivas de dos hidrogramas reales, teniéndose en cuenta el importante factor del estado del terreno, tanto a efecto del caudal máximo como de escorrentía total. Los extremos de los intervalos que se han estimado a partir de un estudio estadístico pueden hacerse corresponder a tiempos de  $T = 100$  y  $T = 500$  años.

### 3 PROCESO OPERATIVO DEL METODO DE ISOCRONAS

Este método, dentro del cual se utilizan los métodos empíricos y estadísticos, es el más aconsejable y debe utilizarse para cuencas entre 500 y 5.000 km<sup>2</sup>. Para cuencas inferiores a 500 km<sup>2</sup> debe utilizarse el método de cálculo de caudales como en pequeñas cuencas, y para superficies

mayores de 5.000 km<sup>2</sup> la cuenca deberá dividirse en cuencas parciales, considerando que en grandes cuencas, y siendo:

$P_{1T}$  = crecida de probabilidad T en cuenca 1.

$P_{2T}$  = crecida de probabilidad T en cuenca 2.

$P_c$  = probabilidad de coincidencia simultánea en tres de las dos crecidas, siendo  $S(3) = S(1) + S(2)$ .

$P_T$  = probabilidad total.

Se verificará:

$P_T = P_c(P_{1T} \times P_{2T})^\alpha$ , con

$0,6 < \alpha < 0,9$ , siendo función directa de la correlación de lluvias en las dos cuencas y función inversa de las superficies de cuencas.

$0,3 < P_c < 0,6$ .

El proceso de cálculo es el siguiente:

- Si no se tienen datos reales de velocidad de propagación de máximas crecidas y sus tiempos de recurrencia, se calcula la velocidad por:

$$v \text{ km/h.} = K I_p$$

$I_p$  = índice de pendiente; valor medio de  $k$ , 40, pudiendo variar entre 25 y 50.

- Se dibujan las curvas isocronas en cartografía de 1 : 5.000 y 1 : 200.000 y en intervalos de tiempo de 1/2 h. a 4 h., correspondientes ambos a las superficies de cuenca citadas.
- Se obtiene el tiempo de concentración que corresponde a la velocidad estimada y se contrasta, con las fórmulas de Giandotti, Ventura-Heras y Témez, y se toma como tiempo de concentración la media del obtenido a partir de las isocronas, y el valor medio resultante de las tres fórmulas.

En caso de diferencias superiores al 25 % se toma este último valor y se vuelven a trazar las isocronas.

- Se calculan las intensidades máximas en 24 h. y en intervalos menores de tiempo, si es posible, y se aplica la ley de distribución de mejor ajuste a partir de la cual —es normal utilizar Gumbel— se obtienen los valores máximos base para el trazado de isomáximas, estimándose la intensidad unitaria por los métodos descritos, pudiendo suponerse que

en primera aproximación:

$$i \text{ (mm/h.)} = \frac{P_{24}}{n}, \text{ precipitación máxima en } 24 \text{ h. para cada T.}$$

$$P_{24} = 400 \quad n = 3$$

$$P_{24} = 300 \quad n = 4$$

$$P_{24} = 200 \quad n = 5$$

$$P_{24} = 100 \quad n = 6$$

- Se calcula el valor medio del coeficiente de escorrentía por los métodos citados o en primera aproximación por la tabla siguiente:

i (mm/h.)	e
5	0,50
10	0,65
15	0,70
20	0,75
25	0,80
50	0,90

y en caso de no existir ningún tipo de datos directos y de no tener información suficiente de geología, geomorfología y vegetación, puede utilizarse el valor citado en la fórmula completa.

- Con estos datos se obtiene el hidrograma más desfavorable en distintas hipótesis de duración del temporal, que se contrasta o corrige —en su caso— con los otros métodos descritos, calculando, a partir del mismo, el hidrograma tipo más desfavorable.

#### 4. PROCESO OPERATIVO DE CALCULO DE CAUDALES MAXIMOS EN PEQUEÑAS CUENCAS

- Se utiliza la fórmula  $Q = \frac{e I S}{3}$
- Se calcula la superficie S y la longitud y pendiente del curso principal, L y J, que condicionan el tiempo de concentración
- Se calcula  $T_c = 0,3 \left[ \frac{L}{J^{1/4}} \right]^{0,75}$
- Se calcula la I (mm/h.), según se ha dicho, ajustándola de acuerdo con el tiempo de duración del temporal, el tiempo de concentración de la cuenca y el tiempo de recurrencia considerado.
- Se calcula el coeficiente de escorrentía por la tabla a partir de la relación intensidad escorrentía citada.
- A partir de este caudal, y en caso necesario,

se calcula el hidrograma de máxima crecida por métodos hidrológicos y se corrige por la relación  $\frac{Q}{Q_h}$ , siendo Q el caudal máximo obtenido para cada tiempo de recurrencia por este método en pequeñas cuencas y  $Q_h$  el caudal máximo obtenido en el hidrograma. Análogamente al proceso anterior se calcula el hidrograma tipo más desfavorable para cada una de las hipótesis consideradas.

#### 5. RECOMENDACIONES

- Utilizar los datos y estudios referentes a precipitaciones, caudales máximos y máximas crecidas existentes en la zona en estudio.
- Aplicar las fórmulas empíricas, del tipo de las propuestas, para obtener por media aritmética o ponderada una primera aproximación del valor del caudal máximo, ajustando, si es posible con valores puntuales correspondientes a la cuenca, las fórmulas utilizadas.
- Utilizar los métodos estadísticos, ajustando la ley de distribución de mejor ajuste —en general puede aplicarse Gumbel— a las series de caudales máximos instantáneos, o a los obtenidos por correlación o por la fórmula de Fuller o, en caso extremo, a los caudales medios diarios, obteniendo los caudales máximos para las diferentes hipótesis de cálculo citadas en el texto.
- Realizar un estudio completo por el método de isocronas y calcular los caudales máximos por métodos estadísticos, si es posible, obteniendo el caudal máximo como media aritmética de los obtenidos en ambos métodos y el hidrograma para cada tiempo de recurrencia, además del hidrograma tipo más desfavorable, a partir de los resultados del método de isocronas, multiplicando los hidrogramas por la relación  $\frac{Q_{final}}{Q_{isocronas}}$ , siendo  $Q_{final}$  la media aritmética del caudal máximo obtenido por los dos métodos estadísticos, y  $Q_{isocronas}$  el obtenido por el método de isocronas. En caso de pequeñas cuencas se utilizará el método citado en el texto. Puede utilizarse como método complementario el del hidrograma unitario.
- Considerar que los porcentajes de error, en valor medio para los distintos tiempos de recurrencia, en función de la extensión de las series utilizables —valor medio entre 10 y 50—, pueden cifrarse en los siguientes:

## METODOLOGIA Y NORMAS DE CALCULO DE CRECIDAS DE PROYECTO

T (años)	% de variación
5	± 10 %
25	± 15 %
50	± 20 %
100	± 25 %
500	± 30 %

- En el sentido de crecidas producidas por precipitación sólida o crecidas mixtas se utilizarán métodos específicos, teniéndose especialmente en cuenta el efecto de desfase de caudales de origen diferente y el estudio de probabilidad de coincidencia de distintos hidrogramas, además de estudiar detalladamente el fenómeno de deshielo.
- En caso de cuencas con fuertes arrastres, es decir, con caudales sólidos importantes, hay que corregir los resultados, al menos en la relación altura-caudal, pudiendo llegarse a relaciones de hasta dos veces la altura para un mismo caudal.
- Se recomienda proyectar para tiempos de recurrencia diferentes, en función de las condiciones de la obra y de sus características hidrológicas y los posibles efectos aguas abajo; en grandes presas se recomienda utilizar los resultados de  $T = 100$  años y no sobrepasar el valor  $T = 500$  años; en vías de comunicación,  $T = 25$ , y no sobrepasar  $T = 100$ ; y en drenajes y saneamientos,  $T = 5$ , sin pasar de  $T = 25$ .

### 5.1. Crítica de la metodología utilizada

- Con extensión de series de valores máximos instantáneos de caudal y precipitaciones máximas inferiores a 40 años no es posible extrapolar con garantía suficiente a tiempos de recurrencia superiores a 100 años.
- El cálculo de intensidades máximas unitarias de precipitación puede provocar errores importantes cuando no se tienen suficientes series de extensión y garantía y para toda la gama de valores, 24, 12, 6, 2, 1, 1/2 y 1/4 de hora. Por otra parte, el considerar normalmente una intensidad constante para toda la duración del temporal puede producir también errores importantes para temporales superiores a 6 h.  
Es importante el ajuste de la ley de distribución de valores máximos —normalmente Gumbel— en función del cual, y especialmente de la extensión de la serie, se tendrá el nivel de garantía, y por lo tanto posibilidad en muchos casos de errores significativos.

- Sólo se tiene en cuenta la cantidad de precipitación y habría que considerar además la duración real de cada chubasco o temporal de forma que para una cierta probabilidad se obtuvieran los pares de valores —precipitación, duración— que corresponde a chubascos o temporales de tal probabilidad.
- Con el mismo concepto de tiempo de recurrencia debería considerarse la siguiente definición, debida a J. M. Benet: un chubasco o temporal tiene un período de recurrencia  $T$  si tiene la probabilidad  $1 - \frac{1}{TC_A}$  de no ser superado en un intervalo de  $A$  años con una garantía dada entre 85 y 95 %. El intervalo  $A$  podría ser como norma general la vida útil de la obra.

### BIBLIOGRAFIA

- R. HERAS: «Estudio de máximas crecidas». Centro de Estudios Hidrográficos, 1968.
- R. HERAS: «Métodos prácticos para el estudio de máximas crecidas». Centro de Estudios Hidrográficos, 1970.
- R. HERAS et aliter: «Manual de hidrología». Dirección General de Obras Hidráulicas. Centro de Estudios Hidrográficos. Instituto de Hidrología. Escuela de Hidrología y Recursos Hidráulicos, 1972.
- A. GETE-ALONSO et aliter: «Avenidas máximas en los ríos españoles. Determinación, probabilidad y clasificación». ASINEL, 1973.
- R. HERAS: «Las crecidas torrenciales en España». UNESCO, 1974.
- R. HERAS: «Estudio previo de máximas crecidas en las 10 cuencas peninsulares, islas Baleares e islas Canarias». Centro de Estudios Hidrográficos, 1974.
- R. HERAS: «Hidrología y recursos hidráulicos». Dirección General de Obras Hidráulicas. Centro de Estudios Hidrográficos. Instituto de Hidrología. Escuela de Hidrología y Recursos Hidráulicos, 1976.
- A. S. SOKOLOV et aliter: «Floodflow Computation». UNESCO, 1976.
- R. HERAS: «Normas provisionales para crecidas de proyecto y estudio estadístico de precipitaciones en las 10 cuencas peninsulares, islas Baleares e islas Canarias». Dirección General de Obras Hidráulicas, 1976.
- J. R. TEMEZ: «Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales». Dirección General de Carreteras, 1976.
- J. R. TEMEZ: «Normas para el dimensionamiento de obras viales». Dirección General de Carreteras, 1979.
- J. M. BENET: «Aportación a los métodos de previsión de máximas crecidas». Escuela de Ingenieros de Caminos de Valencia, 1979.
- R. HERAS: «Metodología y normas de cálculo de crecidas de proyecto». Dirección General de Obras Hidráulicas. Centro de Estudios Hidrográficos. Escuela de Hidrología y Recursos Hidráulicos, 1979.