

1. INTRODUCCION

1.1. Objetivo de los estudios de avenidas

La finalidad principal de los estudios hidrológicos de avenidas es la determinación de la avenida de diseño requerida para ulteriores trabajos de planificación (determinación de zonas inundables etc), o de dimensionado de infraestructuras (presas, encauzamientos etc).

En la actualidad se pueden distinguir dos principales enfoques a la hora de definir la crecida de diseño:

- aquella generada por la cuenca, con unas determinadas condiciones de escorrentía, ante una tormenta previamente definida.
- aquella que tiene una determinada probabilidad de no ser superada o empleando la terminología habitual, un período de retorno en años.

El primer enfoque es el empleado en el desarrollo del método de la Avenida Máxima Probable (PMF), habitualmente utilizado en EE.UU. (USBR, 1989), para el dimensionado de aliviaderos de presas cuando se desea un alto grado de seguridad. La PMF se define como la estimación del caudal que puede esperarse con la más severa combinación de condiciones que son "razonablemente posibles" en una región y suele conducir a resultados conservadores.

El segundo método, tradicionalmente empleado en España, aborda el problema en términos de probabilidad,

permitiendo por ejemplo el diseño de infraestructuras con un nivel conocido de riesgo, lo que no es posible en el caso anterior. El riesgo (R) de que un determinado caudal Q_F sea superado a lo largo de N años siendo F la probabilidad de que dicho caudal no sea superado en un año, es:

$$R = 1 - F^N \quad (1.1)$$

o expresado en función del período de retorno T

$$R = 1 - (1 - 1/T)^N \quad (1.2)$$

lo que permite su cálculo para un determinado período de retorno (T) y una vida útil de la infraestructura (N).

Estos dos grupos de métodos suponen un avance respecto a procedimientos más tradicionales basados en curvas envolventes de las mayores avenidas conocidas, expresando los caudales específicos ($m^3/s. Km^2$) en función del área. Estos métodos desprecian por una parte la información relativa al período de observación, lo que impide obtener conclusiones respecto a la probabilidad del suceso y por otra no consideran el resto de factores distintos al área (climáticos, edafológicos, topográficos y de cubierta vegetal) con lo que la dispersión observada es muy grande.

1.2. Métodos habituales de estimación de avenidas

Se pueden distinguir tres tipos fundamentales de métodos empleados en la actualidad para la estimación de

avenidas: empíricos, estadísticos e hidrometeorológicos.

El primer grupo se basa en fórmulas empíricas que relacionan el caudal máximo exclusivamente con el área de la cuenca, por lo que frecuentemente llevan a cabo una excesiva simplificación del fenómeno de la crecida. No obstante, su empleo en la región donde fue obtenida suele dar resultados aceptables. Es muy conocida la fórmula de Zapata que ha sido usada tradicionalmente en tanteos previos, aunque no debe recomendarse en estudios detallados y no va a tratarse en este trabajo.

Los métodos estadísticos están basados en el tratamiento de los datos locales y regionales existentes, utilizando adecuadamente las referencias históricas en el caso de disponer de ellas. Estos métodos habitualmente realizan la estimación de la ley de frecuencia sólo de los caudales máximos ($Q_{m\acute{a}x}$) y a veces de los volúmenes de crecida (V). Estas metodologías (Ferrer, F. J., 1992) requieren la existencia de datos de caudales punta (o de hidrogramas en el caso de querer analizar los volúmenes de crecida) por lo que quedan supeditados a la disponibilidad de este tipo de información. Otra dificultad en la aplicación de métodos estadísticos es la frecuente ausencia de datos de caudal punta por lo que estos deben estimarse a partir de caudales medios diarios, lo que introduce importantes incertidumbres en los datos de partida.

Por último, los métodos hidrometeorológicos simulan el proceso precipitación-escorrentía habitualmente mediante modelos determinísticos de mayor o menos complejidad. Los datos requeridos son fundamentalmente pluviométricos y aprovechan por tanto la ventaja de la mayor densidad y longitud de las series de la red pluviométrica respecto a la foronómica. Estos métodos serán desarrollados en el presente estudio.

El empleo de uno u otro método viene condicionado tanto por la propia definición de la avenida de diseño, como por la disponibilidad de datos.

La relación entre las características de la avenida de diseño y los distintos métodos de cálculo se esquematizan en la Figura 1.1, a la cual se refieren los siguientes párrafos.

La adopción de una avenida de diseño basada en una determinada tormenta, requiere necesariamente la modelación del proceso lluvia escorrentía y por tanto debe abordarse mediante métodos hidrometeorológicos. El enfoque probabilístico, por contra, presenta la posibilidad de emplear métodos estadísticos o hidrometeorológicos aunque si se requiere la obtención de un hidrograma completo suele emplearse exclusivamente el segundo tipo de métodos.

Un procedimiento intermedio de cálculo del hidrograma bastante empleado está basado en la obtención del valor de $Q_{m\acute{a}x}$ por cualquiera de los dos métodos y la modificación proporcional de un hidrograma histórico considerado representativo, para adecuar su caudal máximo a dicho valor.

1.3. Métodos hidrometeorológicos de estimación de avenidas

Los métodos hidrometeorológicos, como se indicó anteriormente, utilizan modelos hidrológicos para simular el proceso lluvia escorrentía. Estos modelos (Figura 1.2) pueden ser conceptuales de balance continuo de humedad con parámetros agregados (HSPF, 1983) o distribuidos (SHE, 1985) o bien de simulación de suceso en los que sólo se considera la parte de precipitación que provoca escorrentía superficial y que están basados habitualmente en el hidrograma unitario (HEC1, 1981) o en el método racional.

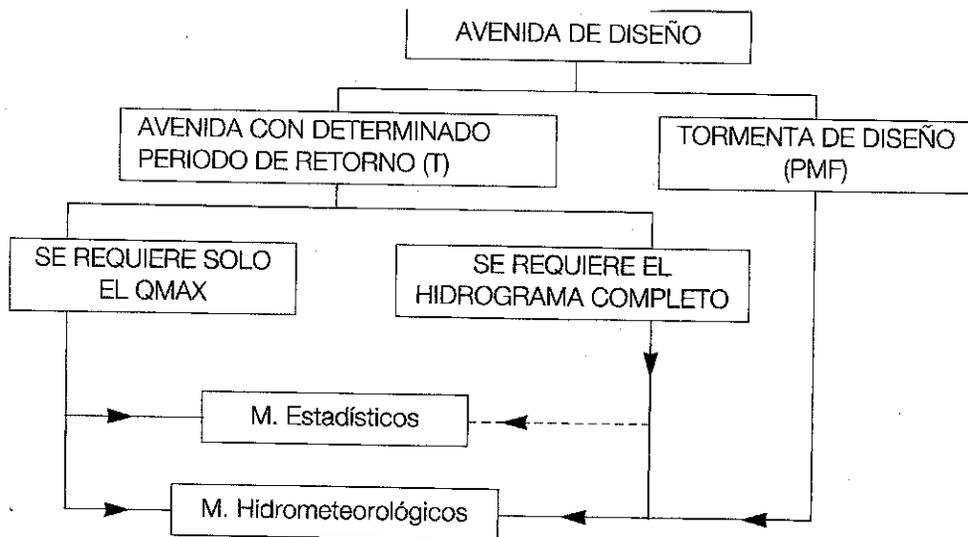
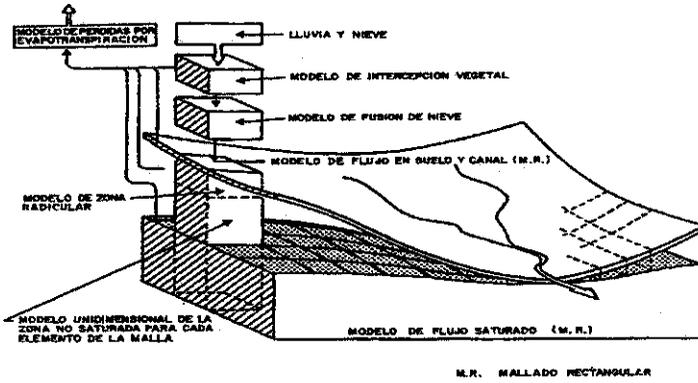


Fig. 1.1.—Relación entre la avenida de diseño y el método de cálculo

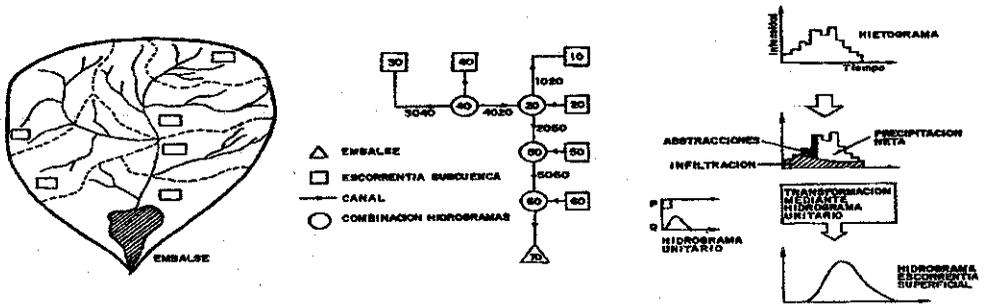
La mayor sencillez en la formulación y la gran flexibilidad que presentan para abordar escalas de tiempo horarias o incluso menores, hace que sea más habitual el uso del segundo tipo de modelos sobre los que se va a centrar el presente trabajo, cuya organización es la siguiente:

- Análisis y tratamiento de los datos pluviométricos: capítulo 2.

- Hidrograma de una cuenca unitaria: capítulo 3
- Caudal máximo en una cuenca unitaria: capítulo 4
- Hidrograma de una cuenca compuesta: capítulo 5
- Empleo de modelos hidrológicos en la obtención de la crecida de diseño: capítulo 6.
- Resumen y recomendaciones: capítulo 7.



a) MODELOS CONTINUOS, EN LA FIGURA DE PARAMETROS DISTRIBUIDOS



b) MODELO DE SIMULACION DE SUCESO

Fig. 1.2.-Modelos hidrometeorológicos continuos (a) y discretos (b)

2. ANALISIS Y TRATAMIENTO DE LOS DATOS PLUVIOMETRICOS

2.1. Objetivo de los estudios pluviométricos

Los estudios pluviométricos requeridos en la estimación de la avenida de diseño mediante métodos hidrometeorológicos tienen por finalidad la determinación de la lluvia correspondiente a un determinado periodo de retorno o a unas condiciones prefijadas: precipitación máxima probable (PMP), teniendo en cuenta los dos posibles enfoques ya indicados (Figura 1.1).

La definición de la lluvia para una duración dada debe incluir, no sólo la cantidad total sino también su distribución temporal y su valor areal sobre la cuenca objeto de estudio. El tratamiento conjunto de estos factores es complejo y los métodos habitualmente empleados siguen los siguientes pasos, una vez prefijada la duración a considerar:

- estimación de la cantidad de lluvia en un punto para dicha duración, directamente o a partir de valores obtenidos para otra duración considerada de referencia.
- reducción de los valores puntuales anteriores en función del tamaño de la cuenca para considerar el efecto de no simultaneidad de lluvias y obtener lluvias areales.
- determinación de la distribución temporal de la lluvia a lo largo de la duración considerada si el método hidrológico así lo requiere,

como sucede en el caso de emplear el hidrograma unitario.

2.2. Determinación de la lluvia con un determinado período de retorno

2.2.1. Cantidad total de lluvia en un punto

La estimación de la cantidad total de lluvia suele abordarse mediante el análisis estadístico de los datos registrados en las estaciones pluviométricas de la zona, expresando normalmente los resultados en forma gráfica como isoyetas de un determinado período de retorno.

La situación española, con una inmensa mayoría de estaciones pluviométricas que sólo registran lluvias diarias hace que habitualmente sea ésta la duración utilizada para la obtención de las isoyetas, aunque el procedimiento para distintas duraciones sería análogo al expuesto brevemente a continuación.

En el análisis estadístico de lluvias máximas suelen emplearse modelos de series anuales de máximos, con lo que sólo se considera el mayor valor de cada uno de los años con datos, y métodos paramétricos que utilizan diversas leyes de distribución cuyos parámetros son ajustados a partir de los datos. La modelación estadística de máximas lluvias presenta análoga problemática a la existente en el caso de caudales (Ferrer, F. J. 1992), aunque más suavizada por el menor coeficiente de variación y de sesgo que suelen mostrar los datos pluviométricos.

Esta modelación requiere la elección de:

- ley de distribución de la población
- método de estimación de parámetros y cuantiles
- esquema de uso combinado, en su caso, de datos locales y regionales

por lo que un análisis completo viene definido por la combinación seleccionada de los tres factores.

Dentro del amplio conjunto de posibilidades y sin pretender ser exhaustivo, posiblemente los modelos más empleados en la actualidad se resumen en la Tabla 2.1.

Los tres primeros modelos han sido comparados con series de lluvias diarias

de la cuenca del río Guadalhorce (Ferrer, F.J., 1991) obteniendo similares valores al aplicarse regionalmente. La comparación realizada en dicho trabajo muestra una mayor varianza en los cuantiles estimados por el modelo LP3, un posible sesgo negativo (infravalorar los resultados) del modelo TCEV y buenas características estadísticas del modelo GEV pero con unas hipótesis bastante restrictivas en cuanto a homogeneidad regional.

Los modelos anteriores de leyes requieren el uso de información regional para la mejor estimación de los parámetros relacionados con el sesgo de la población que presenta una varianza

Tabla 2.1.

Definición de modelos estadísticos

Distribución	f(x) or F(x)	Parámetros	Procedimiento de uso conjunto de datos locales y regionales	Método de ajuste
GEV (Valores extremos generalizados)	$F(x) = \exp \left\{ - \left[1 - \kappa \left(\frac{x - \mu}{\alpha} \right) \right]^{1/\kappa} \right\}$	μ, α, κ	C_y y C_s regionales: índice de avenida con media regional de los PWM adimensionales.	PWM (Momentos ponderados probabilísticamente)
LP3 (Log-Pearson III)	$f(x) = \frac{(\log x - \mu)^{\kappa-1}}{x \alpha \Gamma(\kappa)} \exp \left\{ - \left(\frac{\log x - \mu}{\alpha} \right) \right\}$	μ, α, κ	C_s regional: obtenido como media de los valores locales.	LMOM (Log - momentos)
TCEV (Valores extremos con dos componentes)	$F(x) = \exp \left(-\alpha_1 e^{-x/\theta_1} - \alpha_2 e^{-x/\theta_2} \right)$	$\alpha_i, \theta_i, i = 1, 2$	C_s regional: utilización del conjunto de datos previamente estandarizados y aplicando la hipótesis estación-año.	ML (Máx. verosimilitud)
GUMBEL	$F(x) = \exp \left[- \exp \left(\frac{x - \mu}{\alpha} \right) \right]$	μ, α	Exclusivamente datos locales.	ML
SQRT - ET _{MAX}	$F(x) = \exp \left[-\kappa \left(1 + \sqrt{\alpha x} \right) \exp \left(- \sqrt{\alpha x} \right) \right]$	α, κ	Exclusivamente datos locales.	ML

inaceptable si son estimados a partir de una única muestra. Este hecho conlleva la necesidad de una definición previa de regiones suficientemente homogéneas para lo cual no existe una metodología de uso general. Esta regionalización, en cualquier caso debe

basarse en una adecuada combinación de criterios geográficos y estadísticos.

Esta necesidad de regionalizar queda mitigada con los modelos de leyes de sólo dos parámetros indicados en la Tabla 2.1 anterior: Gumbel y SQRT-

ET max, pero a costa de perder flexibilidad en la reproducción de las características estadísticas observadas en los datos. En efecto, la ley de Gumbel empleada tradicionalmente en España para análisis pluviométricos asume un valor constante del coeficiente de sesgo (C_s) igual a 1.14, lo que contradice frecuentemente los valores muestrales observados y conduce en estos casos a resultados del lado de la inseguridad.

Esta inquietud respecto a la infravaloración de los resultados obtenidos con la ley de Gumbel y las dificultades de aplicación de leyes con más de dos parámetros debido a la necesaria regionalización, ha conducido a Etoh, T. et al. (1986) a proponer una nueva ley con dos parámetros: SQRT-ETmáx (Anejo nº 1) que asume un valor de C_s superior al resultante de Gumbel y que es función del valor del coeficiente de variación (C_v). Los cuantiles estimados son similares a los obtenidos por Gumbel para períodos de retorno bajos y medios, alcanzando valores superiores para altos períodos de retorno. La aplicación de esta ley por parte del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX ha conducido a resultados en general más realistas y siempre más conservadores que los obtenidos con Gumbel. Estas buenas características no impiden cierta rigidez para reproducir series con elevados valores del C_s , lo que conduciría a infravalorar sus verdaderos cuantiles, ni resuelve la imposibilidad de modelar poblaciones con relaciones C_v/C_s distintas de la implícita en la ley, aspectos éstos ligados a la existencia de sólo dos parámetros. No obstante, dada la dificultad de estimar el C_s real de la población, esta rigidez no plantea problemas serios de aplicación.

Como conclusión, conviene indicar una posible rigidez de las leyes de dos parámetros para describir series con elevados valores del C_s , aunque en la

mayoría de los casos los resultados obtenidos por la ley SQRT-ET máx son adecuados y bastante más realistas que los sugeridos por la ley de Gumbel (Figura 2.1). Por contra, el resto de los modelos indicados, si bien tienen una adecuada capacidad descriptiva, plantean problemas al utilizar datos de una única estación debido a la gran variabilidad de los resultados alcanzados (Figura 2.2) y suelen requerir un proceso previo de regionalización.

Respecto al uso de planos de iso-máximas diarias ya elaborados en España, conviene utilizarlos con precaución, especialmente para altos valores de períodos de retorno puesto que en general han sido obtenidos a partir del empleo de la distribución de Gumbel que según se indicó puede conducir a resultados inseguros.

2.2.2. *Obtención de la lluvia en un punto para diferentes duraciones*

El proceso anterior de análisis puede llevarse igualmente a cabo para duraciones distintas de la diaria en el caso de disponer de registros pluviográficos que permitan obtener las correspondientes series de máximos anuales. No obstante, la escasez de estos datos suele conducir al empleo de valores diarios junto con curvas intensidad duración regionales que permitan su transformación para distintas duraciones.

Se denominan curvas intensidad-duración a aquellas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, para un mismo período de retorno. Evidentemente son curvas que decrecen con la longitud del intervalo de tiempo considerado, puesto que se trata de intensidades medias.

El empleo de curvas intensidad-duración ha sido propuesto tradicional-

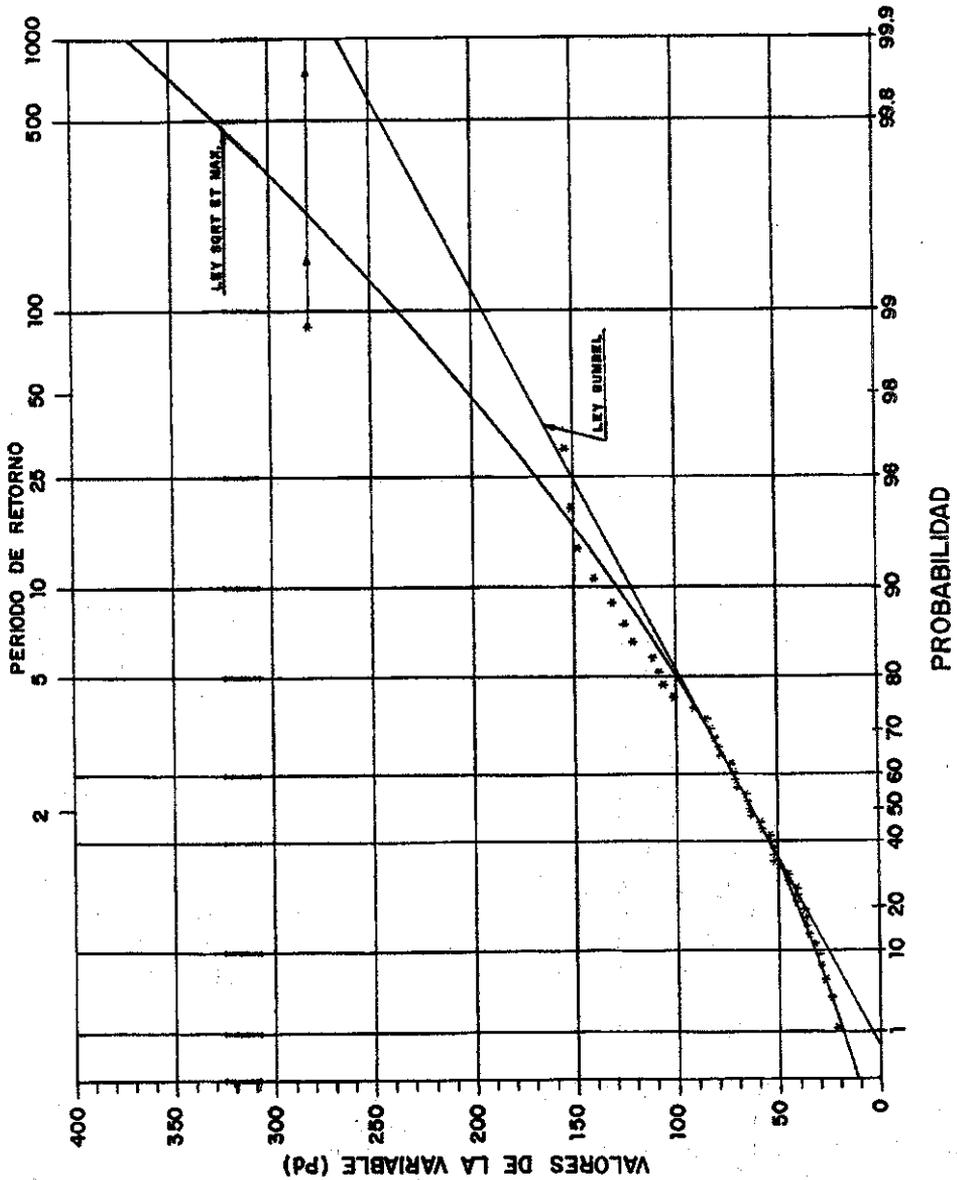


Fig. 2.1.-Ajuste a máximas lluvias diarias. Leyes Gumbel y SORT-ET MAX

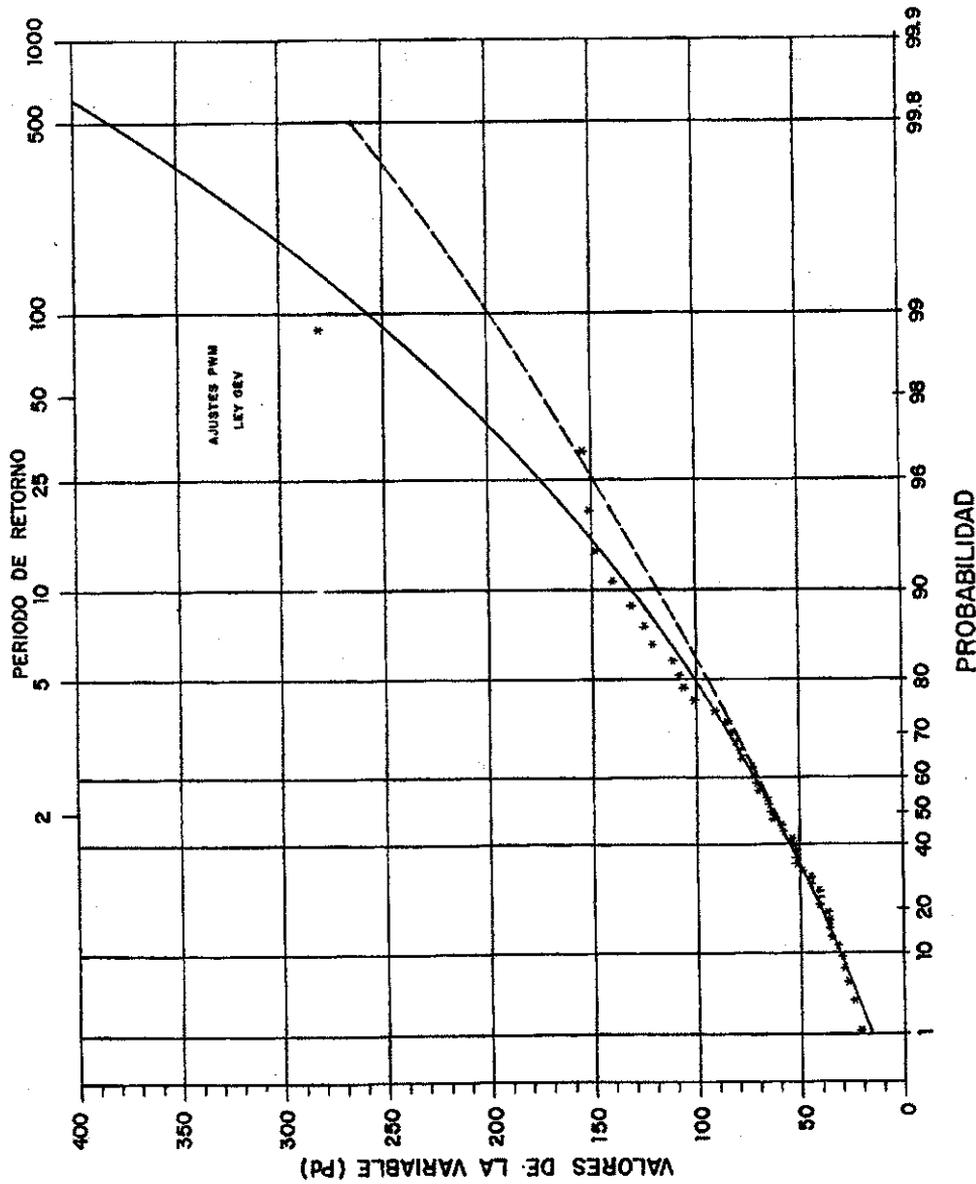


Fig. 2.2.-Ejemplo de inestabilidad de los ajustes en leyes con sesgo libre ante nuevos datos

mente en la normativa de la Dirección General de Carreteras. (D.G.C.)

En la anterior Instrucción de Drenaje, Norma 5.1-IC. (MOPU, 1965), se asumía la siguiente ecuación propuesta por Yarnell y Hathaway:

$$I = a \cdot t^{-b} \quad (2.1)$$

siendo I la intensidad correspondiente a una duración t y los parámetros a y b a obtener en cada caso, estando a asociado al nivel de probabilidad deseado.

Los parámetros a y b fueron estimados por Nadal Aixalá y la ecuación propuesta por la anterior normativa de la D.G.C. era la siguiente:

$$I_t = 9.50 I_h t^{-0.55} \quad (2.2)$$

siendo:

I_t (mm/h): intensidad media correspondiente al intervalo de duración t deseado.

I_h (mm/h): intensidad horaria correspondiente al período de retorno considerado.

t (minutos): duración del intervalo al que se refiere I_t .

En la actual normativa: Instrucción 5.2-IC de Drenaje Superficial de Carreteras (MOPU, 1990) en su capítulo 2 se propone una nueva familia de curvas intensidad-duración, basadas en un trabajo de Témez (1987), que a diferencia de la anterior expresión (2.2) permite considerar explícitamente la situación geográfica de la cuenca objeto de estudio.

Dada la vigencia de esta normativa, se expone a continuación con cierto detallé el proceso de obtención de las curvas intensidad-duración allí propuestas, que requiere el análisis de bandas pluviográficas según el siguiente esquema:

- Obtención de series de máximas intensidades (mm/h) anuales para distintas duraciones, por cociente entre la lluvia recogida y cada una de dichas duraciones.
- Análisis estadístico de las series anteriores para obtener los cuantiles correspondientes a los distintos períodos de retorno.
- Para cada período de retorno deseado, el conjunto de puntos correspondientes a las distintas duraciones consideradas permite obtener la curva deseada (Figura 2.3).

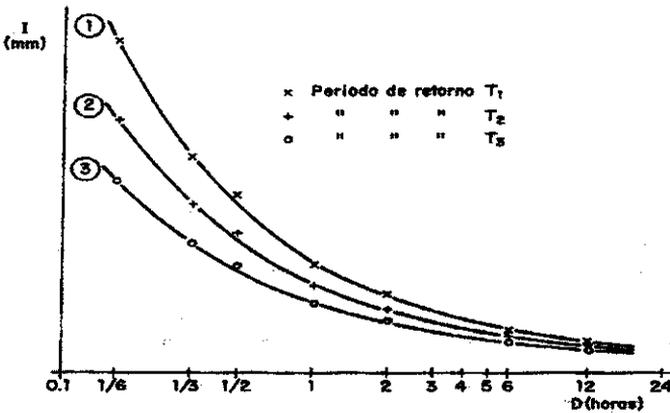


Fig. 2.3.-Curvas intensidad - duración de una estación

El análisis de las curvas de una misma estación pluviométrica correspondientes a los diferentes períodos de retorno ha permitido comprobar la existencia de una sensible afinidad entre ellas. Por ello, pueden reducirse a una única ley adimensional, si se expresan las intensidades en porcentaje respecto a la intensidad media asociada a una duración dada de referencia. Esta duración conviene que sea la diaria ($I_d = P_d/24$) puesto que es la más fácilmente disponible en la generalidad de los casos. La ley adopta entonces la forma:

$$\frac{I}{I_d} = @ (D) \quad (2.3)$$

representada en la Figura 2.4, para cada duración D en la que se considere la intensidad de lluvia.

La ley anterior es característica de cada estación y función de la distribución temporal de sus aguaceros tipo, variando por tanto de unas regiones a otras en función de las diferencias en su régimen pluviométrico.

La publicación anterior, propone la caracterización de esta ley mediante el parámetro (I/I_d), cociente entre la intensidad horaria y la diaria, que ha sido regionalizado a nivel nacional según se muestra en la Figura 2.5. El valor de este parámetro está comprendido entre 8 para Galicia y 11 para la zona levantina mostrando así la distinta torrencialidad de las lluvias.

La expresión analítica propuesta en la mencionada normativa responde a la siguiente formulación (Figura 2.6):

$$\frac{I_t}{I_d} = \left(\frac{I_1}{I_d} \right) \frac{28^{0,1} - t^{0,1}}{28^{0,1} - 1} \quad (2.4)$$

siendo:

I_t (mm/h): Intensidad media correspondiente al intervalo de duración t deseado.

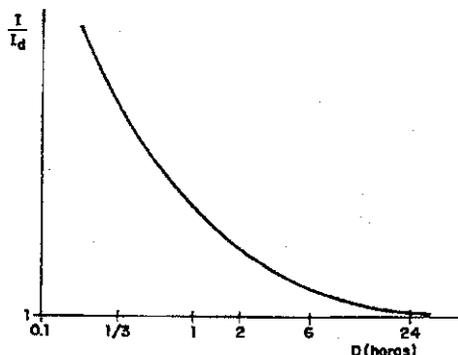


Fig. 2.4.—Ley única adimensional intensidad - duración de una estación

I_d (mm/h): Intensidad media diaria de precipitación, correspondiente al período de retorno considerado. Es igual a $P_d/24$.

P_d (mm/h): Precipitación total diaria correspondiente a dicho período de retorno.

I_t / I_d : Cociente entre la intensidad horaria y la diaria, independiente del período de retorno y que puede obtenerse, para el territorio nacional, de la Figura 2.5.

t (h): Duración del intervalo al que se refiere I_t .

2.2.3. Obtención de la lluvia areal sobre la cuenca

La mayor parte de los trabajos hidrológicos requieren la estimación de la lluvia sobre una determinada área, que evidentemente será igual o menor que el correspondiente valor puntual calculado, debido al efecto de no simultaneidad. La obtención de valores areales suele efectuarse mediante el uso de un factor reductor (ARF) por el que se multiplican los valores puntuales previamente estimados.

El proceso de obtención del valor de ARF para una cuenca de área A y una duración de lluvia determinada D seguiría los siguientes pasos:

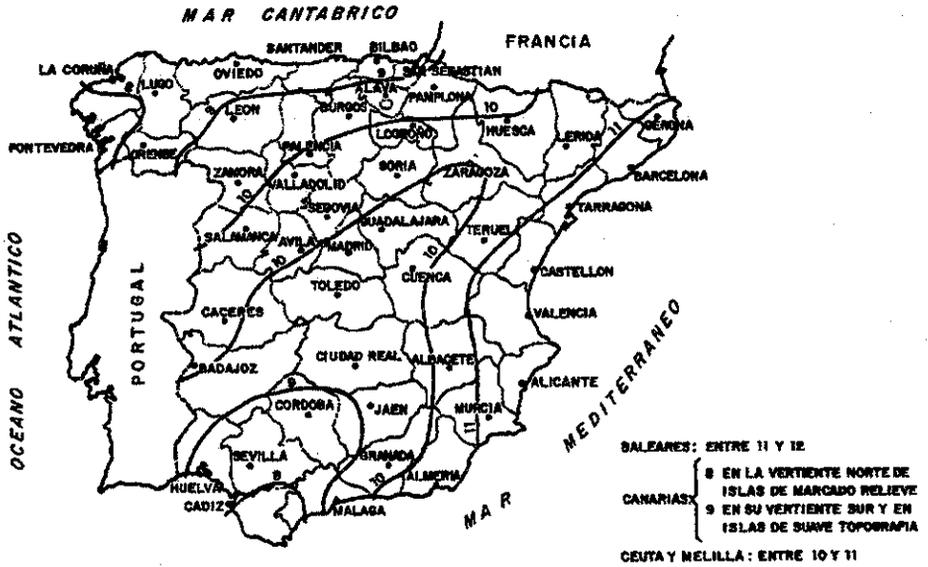


Fig. 2.5.—Mapa de Isolíneas $\frac{I_1}{I_4}$

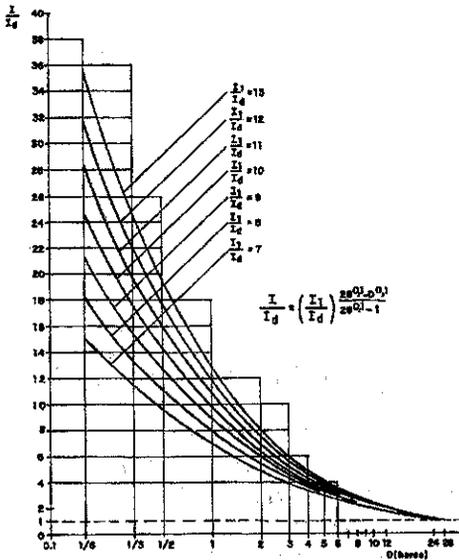


Fig. 2.6.—Familia de curvas intensidad - duración de una estación

- Para cada año de la serie de datos se determina la fecha de la máxima lluvia areal y los valores que en dicha fecha registraron las distintas estaciones de la zona: P_a .
- Para cada año de la serie de datos y en cada estación, se determina el máximo valor anual: P_p , coincidente o no en fecha con la máxima lluvia areal y cumpliéndose por tanto que $P_p \geq P_a$.
- El factor buscado es la media, a lo largo de los m años con datos, del cociente entre los valores areales de P_a y P_p , es decir:

$$ARF = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{\iint_A P_{a_j} dA}{\iint_A P_{p_j} dA} \quad (2.5)$$

$$ARF = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{1}{A} \iint_A \frac{P_{aj}}{P_{pj}} dA \quad (2.6)$$

Una expresión similar y que suele conducir a resultados parecidos es la utilizada en NERC, (1975):

Los estudios recopilados en este último trabajo han mostrado una influencia despreciable del periodo de retorno de las lluvias en el valor de ARF y mínimas variaciones con el clima de la zona.

La aplicación de estas expresiones a distintas cuencas permiten obtener, suavizando los resultados, curvas que muestran la dependencia de ARF respecto al área (A) y duración (D) de la lluvia. En la Figura 2.7, se muestran las

curvas propuestas en Gran Bretaña por NERC (1975) y en la Figura 2.8, las sugeridas en EE.UU. por NWS (1961). En ambas figuras se observa como el valor de ARF disminuye con el área (A) y aumenta con la duración (D).

En España, la escasez y lo laborioso del acceso a los datos pluviográficos dificulta la realización de este tipo de estudios, que deberían ser abordados a nivel nacional aprovechando la valiosa información registrada por los distintos S.A.I.H. Un reciente estudio (Témez, J.R., 1991), analiza el valor del factor reductor para lluvias diarias aplicando la expresión (2.5) y propone una sencilla expresión (Figura 2.9) que conduce a valores del coeficiente algo inferiores a los anteriores.

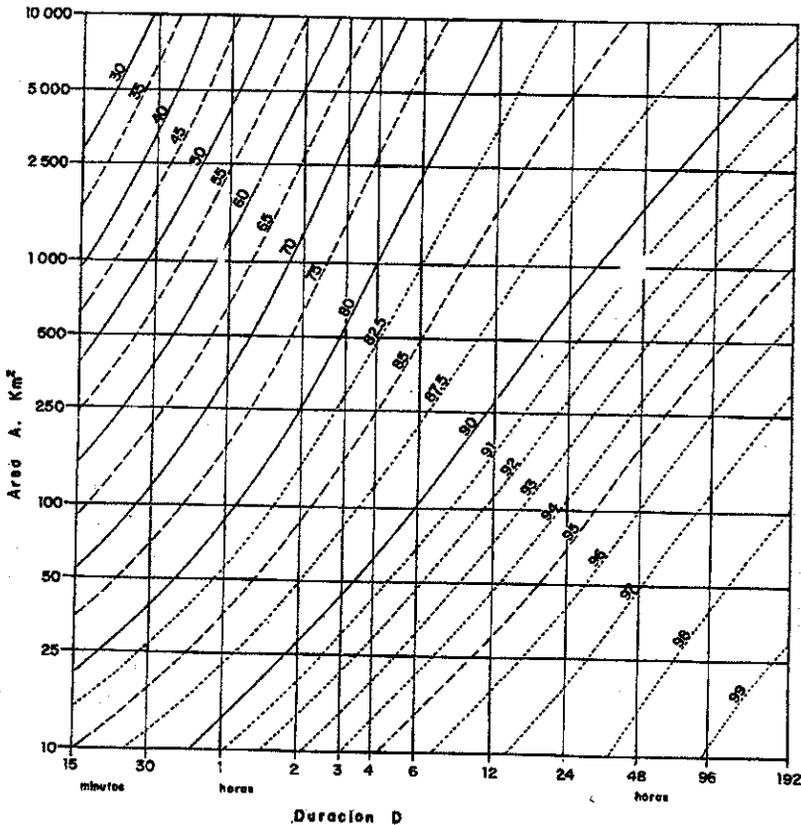


Fig. 2.7.-Factor corrector por área. NERC (1975)

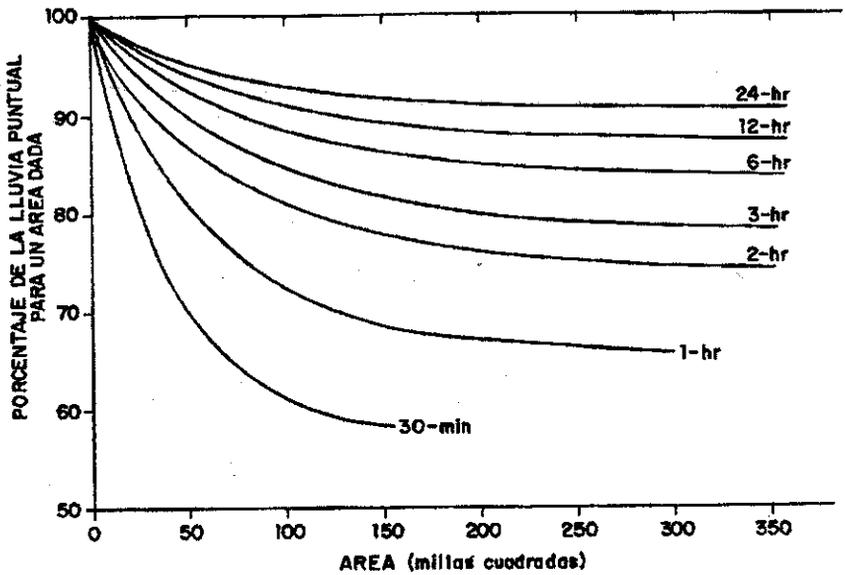


Fig. 2.8.—Factor corrector por área. NWS (1961)

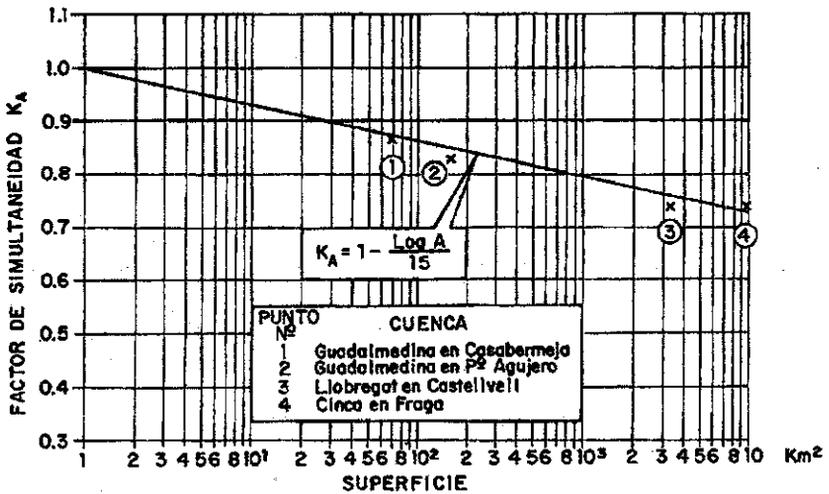


Fig. 2.9.—Factor corrector por área. Temez (1991)

2.2.4. Distribución temporal de la lluvia

En el caso de utilizar un modelo hidrológico detallado, es necesario estimar la forma del hietograma areal de las lluvias.

El análisis de la distribución temporal de numerosas tormentas (NERC, 1975) parece mostrar los siguientes hechos:

- Se producen unas variaciones muy importantes de unos episodios lluviosos a otros.
- Las variaciones en la distribución temporal son sensiblemente mayores que las existentes respecto a la duración, el período de retorno o el tamaño de la tormenta.
- No existen importantes diferencias entre los resultados puntuales y los areales.

Todo ello, conduce a que sea habitual considerar una determinada forma del hietograma que se modifica homotéticamente según la magnitud de la lluvia.

Existen dos enfoques habituales para la obtención de la distribución temporal: el análisis estadístico de diversos hietogramas expresados en forma adimensional o el uso directo de las curvas intensidad duración.

2.2.4.1. Análisis de hietogramas

Este método es el utilizado en NERC (1975) y utiliza los datos de las mayores tormentas de 24 horas registradas, que son expresados como porcentaje de agua caída respecto a distintos períodos de tiempo centrados en el punto de mayor intensidad de lluvia y expresados asimismo como porcentaje de la duración total. Estos datos son analizados estadísticamente obteniendo valores medios y diversos cuantiles (10.% y 90%), que son representados en curvas como las de la Figura 2.10, para tormentas ocurridas en las dos

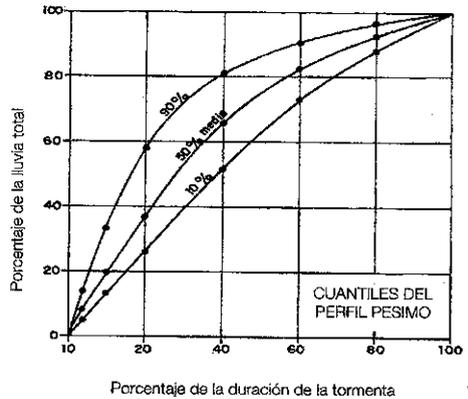


Fig. 2.10.—Distribución temporal adimensional de la tormenta de invierno. NERC (1975)

distintas estaciones del año consideradas: verano e invierno. Dichas curvas pueden utilizarse para obtener un hietograma de cálculo, asumiendo una determinada duración, cantidad total de lluvia e incremento de tiempo en la hipótesis habitual de forma simétrica y máximo valor centrado, según se indica en la Figura 2.11.

2.2.4.2. Curvas intensidad duración

El método anterior es adecuado si el análisis se realiza con tormentas acaecidas en un área cercana a la zona de estudio, pero resulta difícil de extrapolar a otras regiones y requiere un trabajo adicional, por lo que es más frecuente emplear exclusivamente la información contenida en las curvas intensidad-duración.

El proceso es similar al expuesto anteriormente, pero la lluvia correspondiente a las distintas duraciones se obtiene directamente de las mencionadas curvas, que en el caso de emplear la formulación (2.4) es función exclusivamente de la lluvia diaria (P_d) considerada, según se indica en la Figura 2.12.

En el caso de utilizar valores del factor reductor por áreas (ARF) que dependan no sólo del área, sino también de la duración, los valores obtenidos

de la curva intensidad-duración, deben modificarse adecuadamente.

Respecto a la forma del hietograma es usual la disposición simétrica asumida en las Figura 2.11 y 2.12, pero también son frecuentes el empleo de disposiciones más conservadoras en las que el intervalo de mayor intensidad es precedido por el segundo de mayor lluvia y seguido por el tercero de mayor intensidad y así sucesivamente. Estas disposiciones retrasan en el tiempo la punta del hietograma, por lo que los caudales calculados mediante simulación hidrológica serán mayores al ser mayor la humedad del complejo suelo-vegetación y mayor por tanto la escorrentía.

2.3. Determinación de la tormenta máxima probable : TMP

La obtención de la avenida máxima probable requiere la estimación previa

de la tormenta máxima probable (TMP) incluyendo, no sólo la cantidad total de lluvia, sino también su distribución espacial y temporal. No se pretende en este trabajo un tratamiento en profundidad de este tema, fundamentalmente meteorológico, sino enumerar brevemente algunos aspectos básicos de la metodología.

2.3.1. Cantidad total de lluvia: precipitación máxima probable (PMP)

La precipitación máxima probable (PMP), concepto básico en la obtención de la tormenta máxima probable, es teóricamente la mayor precipitación físicamente posible para unas condiciones dadas que incluyen: una región, una duración, una superficie y una determinada fecha del año. La obtención de la PMP se basa en el análisis de las máximas tormentas registradas en una región y se aborda fundamentalmente

Ejemplo:		Perfil invierno 50%		
D = 4,5 h Δt = 0,5 h		NT = D/Δt = 9		
D	% D	% P (mm)	Intervalo	% P (mm)
Δt	11,1	21	1	4,5 = (100-91)/2
3 Δt	33,3	56	2	6,5 = (91-78)/2
5 Δt	55,5	78	3	11,0 = (78-56)/2
7 Δt	77,7	91	4	17,5 = (56-21)/2
9 Δt	100	100	5	21
			6	17,5
		↑	7	11,0
			8	6,5
			9	4,5
		A partir de la figura 2.10		Σ = 100

Fig. 2.11.-Definición de hietograma a partir de curvas asimoniales

Ejemplo:

D = 4,5 h
Dt = 0,5 h

$$NT = \frac{D}{Dt} = 9$$

$$\frac{I_1}{I_d} = 11,0$$

Pd = 100 mm

Perfil invierno 50%

<u>D</u>	<u>I (mm/h)</u>	<u>P (mm)</u>	<u>Intervalo</u>	<u>P (mm)</u>
0,5	68,8	34,4	1	2,8 = (77,1-71,4)/2
1,5	35,7	53,5	2	3,7 = (71,4-64,0)/2
2,5	25,6	64,0	3	5,3 = (64,0-53,5)/2
3,5	20,4	71,4	4	9,5 = (53,5-34,4)/2
4,5	17,1	77,1	5	34,4 34,4
			6	9,5
	≠		7	5,3
			8	3,7
			9	2,8
				<u>Σ = 77,0</u>

$$I'(d) = \left(\frac{Pd}{24}\right) \left(\frac{I_1}{I_d}\right) \frac{28^{0,1} - d^{0,1}}{28^{0,1} - 1}$$

Fig. 2.12.-Definición de hietograma a partir de curvas Intensidad - duración

por métodos meteorológicos. En Estados Unidos los criterios básicos están contenidos en los denominados Hydrometeorological Reports (HMRs) of the National Oceanic and Atmospheric Administration. Como ejemplo en el HMR N° 51 (NOAA, 1978) se recogen los valores de PMP aplicable a los estados al este del meridiano 105 para duraciones desde 6 hasta 72 horas y áreas variando entre 10 y 20.000 mi², indicando en la Figura 2.13, los valores en pulgadas para una duración de 6 horas y una superficie de 10 mi².

2.3.2. Distribución temporal

El proceso es similar al ya indicado en el apartado 2.2.4.2. y toma como datos básicos los valores de PMP para distintas duraciones, sobre las que se interpola el valor correspondiente a los períodos de tiempo requeridos. A diferencia de lo allí expuesto, es habitual (USBR, 1989) considerar una forma

conservadora del hietograma, que conduzca a las mayores lluvias hacia el final de la tormenta, mediante el siguiente ordenamiento de los intervalos de lluvia:

- colocación del período de mayor intensidad en un tiempo igual a 2/3 de la duración total
- colocación del segundo y tercer período de mayor intensidad antes y junto al período de mayor intensidad y en orden descendente
- colocación del cuarto período de mayor intensidad después y adyacente al de mayor intensidad
- colocación de los períodos restantes de una forma similar a los anteriores cuatro períodos.

2.3.3. Distribución espacial

Conviene distinguir entre aquellas regiones con y sin importantes efectos orográficos. En las regiones sin importantes efectos orográficos sobre las

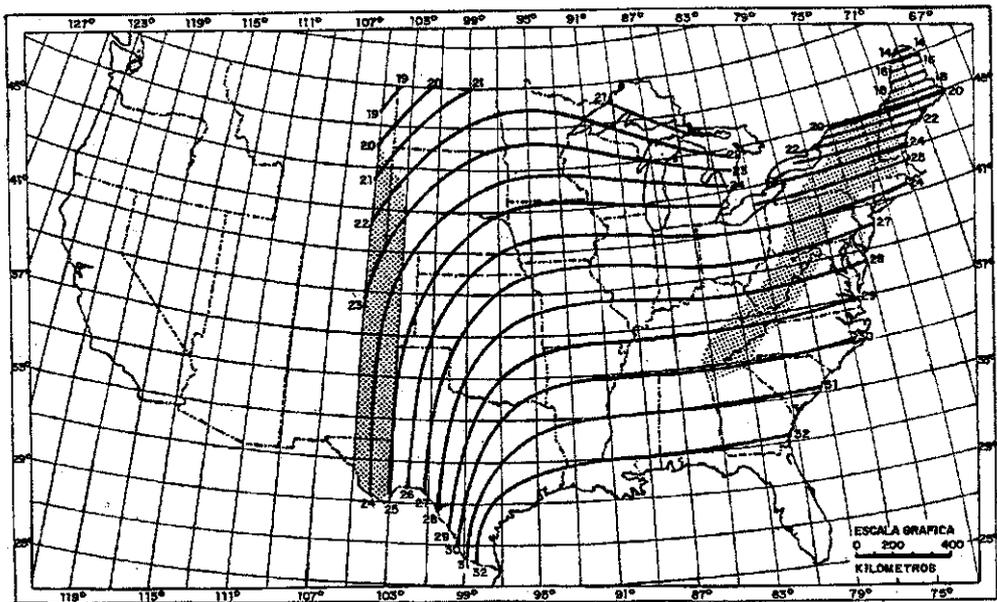


Fig. 2.13.-PMP (pulgadas) correspondiente a una duración de 6 h. y una superficie de 10 millas cuadradas NWS (1978)

precipitaciones, la publicación HMR. N° 52 (NOAA, 1982) asume tormentas con forma elíptica y una relación entre los ejes mayor y menor de 2,5 y propone determinar la distribución espacial que proporciona mayor caudal punta mediante un proceso de prueba-error sobre los siguientes aspectos:

- localización del centro de la tormenta (coordenadas del centro de la elipse)
- tamaño de la tormenta (dimensiones de los ejes de la elipse)
- orientación de la tormenta (dirección de los ejes de la elipse)

En las regiones con sensibles efectos orográficos se sugiere (USBR, 1989) utilizar la técnica denominada "sustracciones sucesivas de volúmenes de PMP en las subcuencas", basada en la ecuación siguiente:

$$P_T A_T = P_1 A_1 + P_2 A_2 + P_3 A_3 + \dots + P_N A_N$$

que iguala el volumen de precipitación sobre una cuenca de área AT con la suma de los volúmenes de precipitación sobre las subcuencas incluidas en ella: A1, A2, A3, ..., AN. El volumen de precipitación P.A, es el producto de la precipitación media P por el área A sobre la cual cae. El subíndice N identifica cada una de las subcuencas y el subíndice T representa el área total de drenaje.

Para clarificar el proceso de cálculo, supongase una cuenca de área total Ar que se divide entre subcuencas de áreas A1, A2 y A3 para realizar su análisis hidrológico. El método consiste en asumir la tormenta centrada en una de las subcuencas, la 1 por ejemplo y obtener la precipitación en cada subcuenca de forma coherente con las relaciones PMP/área existentes. Los pasos serían, para cada incremento de tiempo considerado, los siguientes:

- 1) Obtención del valor de la PMP correspondiente a un área A1 : P1

- 2) Cálculo de la precipitación P2 sobre la cuenca 2, de forma que el conjunto de las cuencas 1 y 2 tengan un valor de PMP: P1,2 acorde con su área total A1 + A2

$$P_2 = \frac{P_{1,2} (A_1 + A_2) - P_1 A_1}{A_2}$$

- 3) Cálculo de la precipitación P3 sobre la cuenca 3, de forma que el conjunto de las cuencas 1, 2 y 3 tengan un valor de PMP: P1,2,3 acorde con su área total A1 + A2 + A3

$$P_3 = \frac{P_{1,2,3} (A_1 + A_2 + A_3) - P_{1,2} (A_1 + A_2)}{A_3}$$

Estos cálculos se repiten para cada uno de los períodos de tiempo considerados y el conjunto del proceso se rehace para distintas hipótesis de centro de la tormenta; por ejemplo la PMP centrada en la subcuenca 2 ó en la 3 eligiendo aquella distribución que conduzca a un mayor caudal punta.

2.4. Determinación de a duración y el intervalo de tiempo

Previamente a todo lo indicado en apartados anteriores es preciso determinar la duración (D) de la tormenta a considerar y el incremento de tiempos

(Δt) utilizado en la discretización del hietograma.

La duración de la lluvia debe obtenerse de un análisis estadístico de las tormentas de la zona y reflejar un valor característico de un aguacero completo que viene condicionado por el clima de la zona y no por el tamaño de la cuenca objeto del estudio. Por ello no parece admisible la práctica, bastante frecuente, de admitir una duración igual al tiempo de concentración (T_c) de la cuenca. Con tal proceder puede infravalorar no sólo el volumen del hidrograma, que juega un papel decisivo en los procesos de laminación, sino también el máximo caudal que se ve afectado por las lluvias anteriores al intervalo del cálculo en tanto en cuanto favorecen unos mayores porcentajes de escorrentía al incrementar la humedad del suelo.

En ausencia de datos específicos de duración de chubascos, es recomendable el empleo de tormentas con duración del orden de 24 horas dado el carácter diario de la mayor parte de los registros pluviométricos.

Por otra parte el incremento de tiempo a considerar en la discretización de las lluvias, está relacionado con el tiempo de respuesta de la cuenca y son suficientes valores inferiores a 0.20 T_c en el caso de emplear el método de hidrograma unitario.