

FACETAS DEL CÁLCULO HIDROMETEOROLÓGICO Y ESTADÍSTICO DE MÁXIMOS CAUDALES

FACETS RELATED WITH HYDROMETROLOGICAL AND STATISTICAL ESTIMATIONS OF MAXIMUM FLOWS

JOSÉ RAMÓN TÉMEZ PELÁEZ. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. Jose.R.Temez@cedex.es

RESUMEN: En el artículo se comentan diversos aspectos puntuales relacionados con el cálculo estadístico de máximos caudales por vía hidrometeorológica y se ponen en entredicho ciertas ideas y hábitos presentes en la práctica actual. Las principales conclusiones del texto son:

- No es cierto que el Método Racional se sustente en la hipótesis de una duración del aguacero igual al tiempo de concentración de la cuenca.
- Aquellas fórmulas, como la de Kirpich, que definen un concepto de tiempo de concentración no asimilable al tiempo de base del Hidrograma Unitario Instantáneo no son válidas para el Método Racional.
- Los pluviogramas que tradicionalmente se vienen empleando en los cálculos estadísticos de máximos caudales suelen conducir a infravaloraciones en los resultados cuando las lluvias totales del aguacero son débiles o moderadas.

PALABRAS CLAVE: TIEMPO DE CONCENTRACIÓN, MÉTODO RACIONAL, HIDROGRAMA UNITARIO, PLUVIOGRAMA DE CÁLCULO

ABSTRACT: This article deals with some issues related with statistical topics for maximum flow estimations via hydrometeorological models and some ideas and practices commonly used are discussed. Main conclusions from the text are:

- It is not truth that Rational method is dependent on the hypothesis of being the same the storm duration and the time of concentration of the basin (fig. 1)
- There are some formulations for the time of concentration, as the one by Kirpich, useful for some Unit Hydrograph models that works with parameters adjusted empirically. They are not correct for Rational Method because they are not right with the time of concentration concept equal to the base time of the Instantaneous Unit Hydrograph.
- Normal pluviographs used in statistical estimation of maximum flow usually has low rainfall intensities in their final durations, which are very important for runoff generation when low rainfall occurs (fig. 2). That's why some flow infraestimations can be obtained and it is proposed to limit the applicability of the models to rainfall much more different to initial abstractions derived from SCS methodology.

KEYWORDS: TIME OF CONCENTRATION, RATIONAL METHOD, UNIT HYDROGRAPH, PLUVIOGRAPH

OBJETO Y CARÁCTER DEL ARTÍCULO

En este artículo se llama la atención sobre una serie de aspectos puntuales relacionados con el cálculo estadístico de máximos caudales. Los comentarios son válidos para los métodos hidrometeorológicos en general, y en particular para aquellos dos más utilizados: El Método Racional y el Hidrograma Unitario.

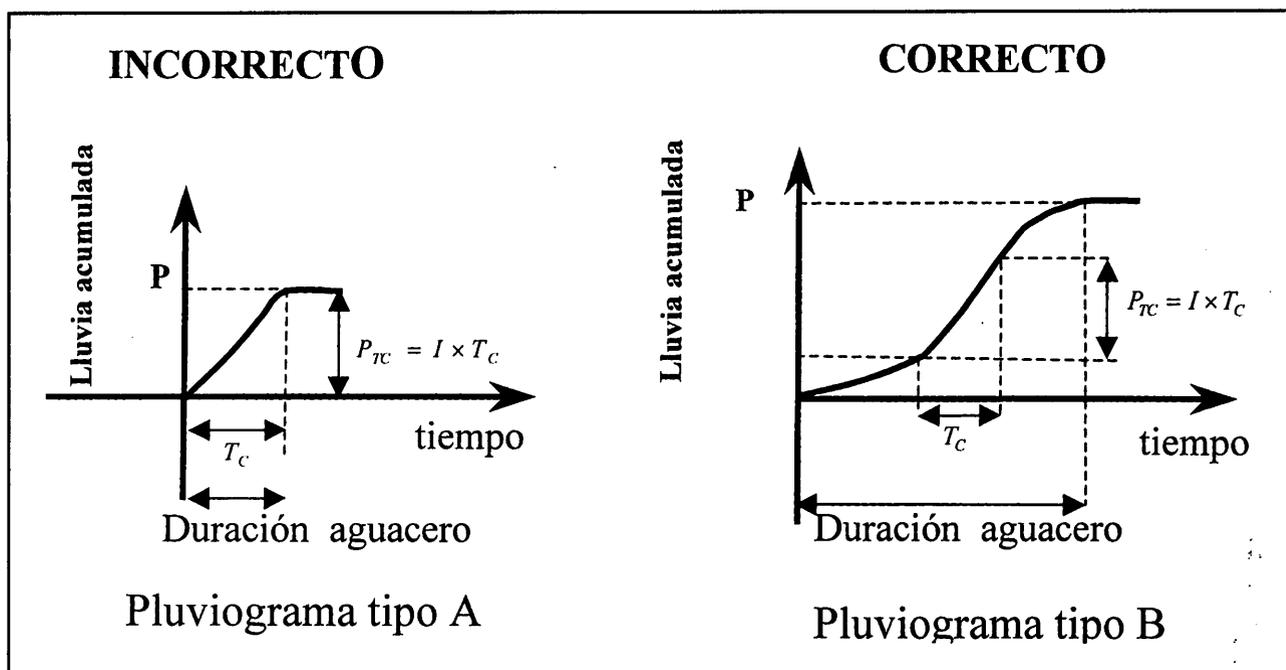
El texto no incluye innovaciones metodológicas, ni ofrece una visión general del estado del arte, sino que, con menor esfuerzo y ambición, intenta contribuir a desterrar algunos

conceptos y prácticas, que a juicio del autor son incorrectos y afectan negativamente a la estimación de los caudales de crecida.

DIVORCIO ENTRE TIEMPO DE CONCENTRACIÓN Y DURACIÓN DEL AGUACERO

En numerosos y prestigiosos textos de Hidrología se comete un error al interpretar que el Método Racional se sustenta en la hipótesis de que la duración del aguacero de cálculo coincide con el valor del tiempo de concentración en la

Figura 1. Tiempo de concentración y duración del aguacero.



cuenca estudiada. Otra cosa bien diferente es que exista una fase del aguacero que sea la determinante sustancial del máximo caudal, y esta fase parcial tenga una duración igual al tiempo de concentración, pero no así la totalidad del aguacero, cuya duración es ajena al tamaño de la cuenca estudiada y sólo función de parámetros climáticos.

Insistiendo en el tema, la lluvia que condiciona directa y fundamentalmente el caudal de un determinado momento es aquella precipitada en las T_c horas precedentes, siendo T_c el valor del tiempo de concentración. La escorrentía de la lluvia anterior, incluso la caída en las zonas más alejadas, ya ha hecho su recorrido por la cuenca y la ha abandonado por el punto de desagüe, y evidentemente la caída con posterioridad no tiene efectos retroactivos sobre ese caudal. Esta consideración explica que la lluvia asociada a los cálculos de caudal máximo se refiera al intervalo más intenso de duración igual al tiempo de concentración, pero ello en modo alguno equivale a suponer que esa sea la duración total del aguacero de diseño, como algunos autores interpretan.

Al aplicar el Método Racional, o cualquier otro método hidrometeorológico, se debe tener la mente puesta en unos pluviogramas de cálculo del tipo B y no del tipo A reproducidos en la figura 1. Si por error se acepta explícita o implícitamente una duración total del aguacero limitada al tiempo de concentración, ello tiene consecuencias prácticas tanto en la forma y el volumen de crecida, como en su caudal punta pues la máxima lluvia P_{TC} correspondiente a una duración igual al tiempo de concentración (véase figura 1) caída al inicio del aguacero produce menos escorrentía que esa misma cantidad de lluvia precipitada sobre un suelo humedecido con anterioridad por las aguas de otras fases pre-

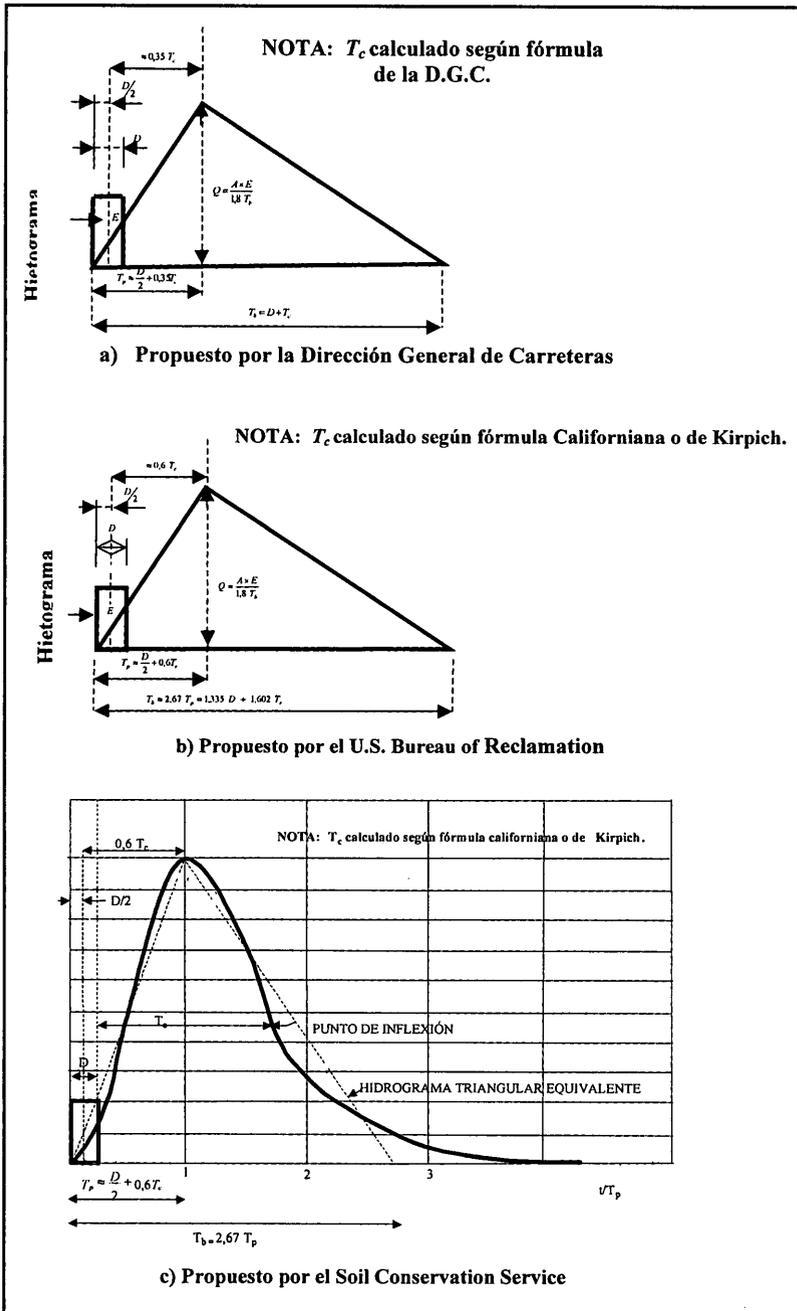
cedentes del aguacero, contempladas en el pluviograma tipo B y suprimidas en el pluviograma tipo A.

Los comentarios precedentes no suponen una modificación o mejora del Método Racional, sino simplemente una aclaración de que la validez del mismo es ajena a una hipotética equivalencia entre duración del aguacero y tiempo de concentración. Si se prescinde de esa hipótesis, poco realista e innecesaria, el proceso justificativo del método se mantiene inalterado

ALERTA SOBRE LAS FÓRMULAS DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

En la bibliografía especializada se encuentran métodos hidrometeorológicos cuyas fórmulas para estimar el tiempo de concentración de una cuenca proporcionan valores muy diferentes de ese parámetro. A pesar de ello, los caudales resultantes pueden ser análogos, si la aplicación de cada fórmula se limita al contexto del método que se propone y ésta ha sido ajustada y contrastada empíricamente con los registros de estaciones de aforo. Pero no siempre se cumple esa condición, tal como se va a comentar en el caso concreto de dos fórmulas del tiempo de concentración bien conocidas en España, que al aplicarlas dentro de sus respectivos modelos de Hidrograma Unitario proporcionan resultados similares, mientras que utilizadas en el Método Racional dan lugar a notables discrepancias en los caudales.

La fórmula de Kirpich, llamada también californiana, es una de las más utilizadas para estimar el tiempo de concentración de una cuenca:



$$T_c = 0,066 \left[\frac{L}{J^2} \right]^{0,77} \quad (1)$$

siendo:

T_c = tiempo de concentración en horas.

L = longitud del cauce en kilómetros.

J = pendiente media del cauce.

Dicha fórmula da resultados significativamente menores (del orden del 60% en la mayoría de las cuencas naturales)

que algunas otras como la empleada en la Instrucción de Drenaje de la Dirección General de Carreteras.

$$T_c = 0,3 \left[\frac{L}{J^2} \right]^{0,76} \quad (2)$$

con los mismos símbolos de la fórmula anterior.

En la figura 2 se muestran tres versiones del método del Hidrograma Unitario. El tiempo de concentración se estima en una de ellas según Kirpich y en la otra con la fórmula de la Dirección General de Carreteras. Sin embargo se puede comprobar que en la práctica las magnitudes de los tres hidrogramas resultan muy similares al compensarse en gran parte el menor valor del T_c de Kirpich con los mayores coeficientes multiplicadores que acompañan a ese parámetro en las fórmulas de hidrograma del Bureau of Reclamation y del Soil Conservation Service, coeficientes, que fueron aconsejados por el contraste empírico en cuencas aforadas.

Bien diferente es el caso del Método Racional, donde la acertada elección de la fórmula del tiempo de concentración resulta decisiva pues ese parámetro, sin factor corrector alguno, va a determinar directamente la intensidad de lluvia que interviene en el cálculo del caudal. Los hidrólogos pueden comprobar la inadecuación de la fórmula de Kirpich, y la validez de la fórmula de la Dirección General de Carreteras por tres vías:

a) La más directa: Contrastando los datos de registro de máximos caudales en cuencas bien aforadas con los resultados del Método Racional utilizando una y otra fórmula de tiempo de concentración.

b) Contrastando esos mismos resultados con los obtenidos mediante el uso de cualquier versión del Hidrograma Unitario: Dirección General de Carreteras, Bureau of Reclamation, Soil Conservation Service, etc. Se podrá así comprobar que los resultados de las distintas versiones del Hidrograma Unitario coinciden sensiblemente con los del Método Racional de la Dirección General de Carreteras, mientras los del Método Racional de Kirpich superan significativamente a todos ellos.

c) Por consideraciones conceptuales: El tiempo de concentración, de acuerdo con el proceso deductivo que justifica el Método Racional, es el tiempo de equilibrio o duración necesaria para que con una intensidad de escorrentía constante se alcance el umbral del caudal máximo. Ese tiempo, tal como se deduce de la aplicación del Hidrograma Unitario a un pluviograma con lluvia neta constante, coincide con el tiempo de base del hidrograma T_b menos la duración de la lluvia neta, o tiempo de base del hidrograma instantáneo. Así se reconoce por ejemplo en la pag. 381 del volumen 1 de Natural Environment Research Council (1975) y en la pag. 123

Figura 2.
Modelos de Hidrograma Unitario

de Arie Ben-Zvi (1984). Según lo expuesto en la figura 2, ello está en perfecto acuerdo con lo propugnado por la Dirección General de Carreteras, pero no así con los métodos que utilizan Kirpich como el del Bureau donde el verdadero tiempo de concentración es

$$T_b - D = 1,602 T_c + 0,33 D \quad (3)$$

Los comentarios anteriores se refieren a cuencas naturales. En cuencas urbanas el tiempo de concentración disminuye y sus valores son mas acordes con los resultados de Kirpich que en el caso de cuencas rurales.

El propósito sustantivo de este apartado no es señalar el mayor o menor acierto de las diversas fórmulas al relacionar el tiempo de concentración con las variables físicas del cauce (longitud, pendiente, etc.), sino subrayar que el parámetro que deben pretender definir como tiempo de concentración corresponde al tiempo de base del hidrograma unitario instantáneo. Ello no sucede con la expresión de Kirpich, tal como ya se comentó anteriormente y como también confirma claramente el gráfico del Hidrograma Unitario del Soil Conservation Service reproducido en la figura 2, (Mc Cuen-1982). La objeción que se hace a la fórmula de Kirpich es extensiva a todas aquellas donde el tiempo de concentración no es asimilable al tiempo de base del hidrograma unitario instantáneo.

INADECUACIÓN DE LOS MODELOS TRADICIONALES DE PLUVIOGRAMA PARA EL CÁLCULO ESTADÍSTICO CON PEQUEÑOS VALORES DE LA LLUVIA

La escorrentía de un aguacero no se produce hasta que la lluvia acumulada ha superado un determinado umbral P_0 función de complejo suelo-vegetación de la cuenca, tal como señalan las leyes del Soil Conservation Service (CEDEX 1993). Cuando se trata de lluvias de moderada cuantía, ese umbral representa un alto porcentaje de la lluvia total, que con los patrones de reparto temporal utilizamos habitualmente en los cálculos estadísticos (veanse en la figura 3 unos ejemplos propuestos por el Soil Conservation Service para EE.UU), se alcanza con posterioridad al intervalo de fuerte intensidad, de forma que la generación de caudales se limita a la fase terminal del aguacero a la que dichos modelos atribuyen muy débiles intensidades (figura 4). Los caudales punta asociados a esa hipótesis son consecuentemente muy reducidos y significativamente inferiores a los de otros episodios de la misma frecuencia cuyas intensidades son menores en su valor punta pero mayores en su fase final, o bien que tienen lugar en fecha con el suelo húmedo y por tanto con un umbral de escorrentía menor que el supuesto en los cálculos estadísticos. Por tanto, la génesis de las crecidas de pequeño período de retorno obedece a otros patrones y

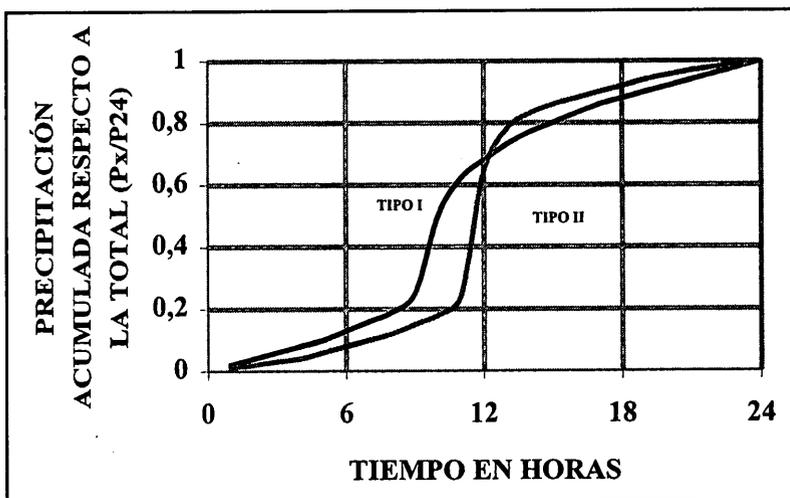


Figura 3. Modelos de pluviograma del S.C.S.

los cálculos con los pluviogramas tradicionales las infravaloran. En los párrafos siguientes se insiste en estos comentarios.

En las fechas de un aguacero de singular magnitud suelen producirse los máximos valores anuales tanto de caudal como de las precipitaciones y entre ambos máximos existe una directa relación causal. No se puede afirmar lo mismo en los años de crecidas ordinarias donde es habitual que sean diferentes las fechas del máximo caudal, máxima precipitación del aguacero y máxima intensidad de lluvia duración T_c .

Mientras en las crecidas de rara frecuencia las cosas suceden como se describe en las justificaciones determinísticas de los métodos hidrometeorológicos, en el rango de las avenidas ordinarias los máximos caudales anuales suelen estar generados por las lluvias inferiores a las máximas, pero coincidiendo con estados de humedad en el suelo más favorables, y además la punta de caudal viene determinada por las precipitaciones caídas en la fase final del aguacero sobre suelo mojado y no por las del intervalo de máxima intensidad. En otras palabras, en el

Figura 4. Pluviograma tradicional con pequeña lluvia.

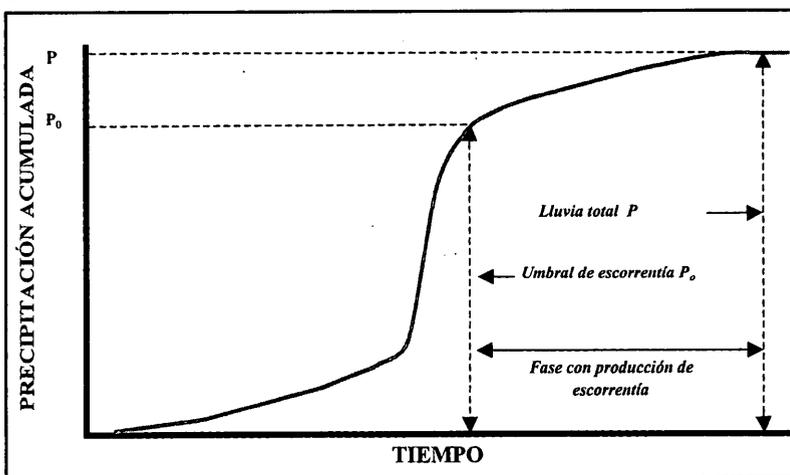


TABLA 2.
VARIACIÓN DEL PERÍODO DE RETORNO DE LA LLUVIA DE CÁLCULO CON EL PERÍODO DE RETORNO DEL CAUDAL DESEADO

Período de retorno del caudal (años)	2,33	10	30	50	100	1000
Período de retorno de la lluvia (años)	2	17	50	81	140	1000

rango de los bajos períodos de retorno el maridaje supuesto entre máximo caudal y máxima intensidad no existe en los sucesos extremos de un gran número de años.

Este problema está resuelto en la versión del Método Racional propuesto por la Dirección General de Carreteras a través de la ley del coeficiente de escorrentía que tiene en cuenta estas circunstancias propias de los pequeños valores de lluvia. Por el contrario, no se ha hecho algo análogo en las versiones habituales de otros métodos como el Hidrograma Unitario y por ello se alerta sobre esta circunstancia, y se recomienda en los cálculos estadísticos con esos métodos limitar el uso de los pluviogramas tradicionales a lluvias P que superen ampliamente el umbral de escorrentía P_0 del Soil Conservation Service (aproximadamente $P/P_0 \geq 3$).

Los técnicos del Natural Environment Research Council en sus sistemáticos estudios de las cuencas inglesas mediante el uso del Hidrograma Unitario (Natural Environment Research Council 1975 y 1999) también percibieron la existencia de un problema de esa naturaleza y recomiendan resolverlo por el muy discutible método de incrementar el período de retorno de la lluvia respecto al del caudal según la tabla 2.

CONCLUSIONES

Las conclusiones principales de este texto se pueden sintetizar en los siguientes puntos:

- No es cierto que el Método Racional se sustente en la hipótesis de una duración del aguacero igual al tiempo de concentración de la cuenca. Si se prescinde de esa hipótesis poco realista e innecesaria el proceso justificativo del método se mantiene inalterado.
- En la bibliografía hidrológica figuran fórmulas para estimar el tiempo de concentración, como la ampliamente conocida de Kirpich, que pueden ser aceptadas para determinar las magnitudes de ciertos modelos de Hidrograma Unitario que incorporan coeficientes contrastados empíricamente, y sin embargo no son válidas para el Método Racional porque no representan el concepto adecuado de tiempo de concentración coincidente con el tiempo de base del Hidrograma Unitario instantáneo.

- Los pluviogramas que tradicionalmente se vienen empleando en los cálculos estadísticos de máximos caudales suelen presentar muy débiles intensidades en su fase terminal, que es la decisiva en la generación de escorrentía cuando se trata de aguaceros de escasa cuantía. Consecuentemente, su aplicación conduce a infravaloraciones en los caudales resultantes de esos cálculos que por ello se propone limitar a lluvias totales que excedan ampliamente a aquella con la que se inicia la generación de escorrentía. ■

LISTA DE SÍMBOLOS

- A superficie de la cuenca (Km²)
- D duración de la lluvia neta (h)
- E escorrentía generada por P (mm)
- I intensidad máxima de duración T_c (mm/h)
- J pendiente media del cauce
- L longitud del cauce (Km)
- P lluvia total del aguacero (mm)
- P_0 umbral de escorrentía en ley del S.C.S. (mm)
- P_{T_c} lluvia del intervalo mas intenso de duración T_c (mm)
- T_b tiempo de base del hidrograma
- T_c tiempo de concentración (h)
- T_p tiempo de desfase de la punta del hidrograma unitario.

BIBLIOGRAFÍA

- Arie Ben-Zvi (1984). "Journal of Hydrology" nº 1/4.
- Bureau of Reclamation (1987) "Desing of Small Dams".
- CEDEX (1996) Curso sobre "Métodos para el Cálculo Hidrológico de Crecidas".
- CEDEX (1993) Recomendaciones para el "Cálculo Hidrometeorológico de Avenidas".
- Dirección General de Carreteras (1987) "Cálculo Hidrometeorológico de Caudales Máximos en Pequeñas Cuencas Naturales".
- Mc. Cuen (1982). "A guide to Hydrologic Analysis using S.C.S. Methods Prentice – Hall Inc."
- Natural Environment Research Council (1975). "Flood Studies Report".
- Natural Environment Research Council (1999). "Flood Estimation Handbook".