

Hidrología Superficial (III): Relación Precipitación - Escorrentía

Uno de los objetivos principales de la Hidrología Superficial es calcular la escorrentía que se va a generar si se produce una precipitación determinada (calcular el *hidrograma* que va a generar un *hietograma*). El tema es muy complejo y se plantean actuaciones diversas:

- **Un evento concreto o el proceso continuo:** A veces estudiamos qué caudales generará cierta precipitación, o bien queremos conocer el proceso de un modo continuo, por ejemplo, el funcionamiento de la cuenca a lo largo de un año.
- **Precipitaciones reales o supuestas:** Podemos desear calcular los caudales generados por unas precipitaciones reales o bien trabajamos con una *tormenta de diseño* para calcular el *hidrograma de diseño*. Si se va a construir una obra (canal, presa,...) debe hacerse sobre caudales teóricos que calculamos que se producirán por unas precipitaciones teóricas que se producirán una vez cada 500 años.

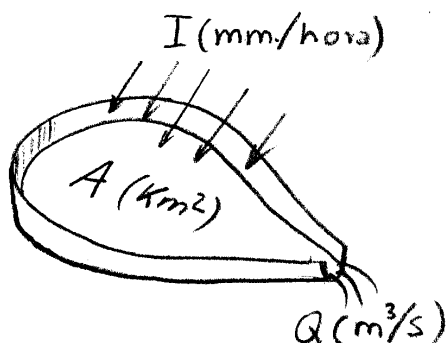
En el estudio de una cuenca real con datos reales es necesario utilizar un modelo en ordenador, en el que se introducen las características físicas de la cuenca. En otras ocasiones es posible abordar el problema manualmente. Muy esquemáticamente, las fases del proceso son:

- 1) *Separación de la lluvia neta* (calcular qué parte de la precipitación caída va a generar escorrentía superficial). (Ver la Práctica "Cálculo de la Precipitación Neta por el método del S.C.S.")
- 2) *Calcular la escorrentía producida por esa precipitación neta*. Un método de calcular esto es el hidrograma unitario.
- 3) Calcular cómo va variando el hidrograma calculado en el paso anterior a medida que circula a lo largo del cauce; eso se denomina "*tránsito de hidrogramas*", y no lo vamos a tratar aquí. (Ver el tema "Tránsito de hidrogramas")
- 4) Opcionalmente, y teniendo en cuenta la geometría del cauce en una zona concreta, calcular la altura que alcanzará el agua, y, por tanto, *las áreas que quedarán inundadas* cuando el hidrograma calculado en los pasos anteriores pase por allí. (Programa HEC-RAS)

En este tema vamos a abordar de modo simplificado el punto 2: suponiendo que tenemos datos de precipitación neta, calcular el hidrograma que se genera. En uno de los procedimientos (el "Método Racional") se incluye la apreciación del punto 1: qué parte de la precipitación genera escorrentía directa.

Método racional

Recibe este nombre la primera aproximación, la más sencilla, para evaluar el caudal que producirá una precipitación.



Supongamos una precipitación constante de intensidad I (mm/hora) que cae sobre una cuenca de superficie A (km^2). Si toda el agua caída produjera escorrentía, el caudal generado sería:

$$Q (\text{m}^3/\text{hora}) = I (\text{mm/hora}) \cdot 10^{-3} \cdot A (\text{km}^2) \cdot 10^6 \quad (1)$$

(Con 10^{-3} convertimos mm./hora en **metros/hora** y con 10^6 pasamos km^2 a m^2 . Así el producto es m^3/hora)

Para que el caudal se obtenga en m^3/seg , dividimos por

3600 segundos que tiene una hora y la expresión (1) quedaría de este modo:

$$Q \text{ (m}^3\text{/seg)} = I \text{ (mm/hora)} \cdot A \text{ (km}^2\text{)} / 3,6 \quad (2)$$

Si la superficie está en Hectáreas o deseamos obtener el caudal en litros/seg, será preciso introducir los factores correspondientes.

En casos reales, nunca toda el agua precipitada produce escorrentía, su cálculo no es sencillo. Para una primera aproximación, basta con aplicar un coeficiente de escorrentía C , con lo que finalmente, la fórmula general resultaría:

$$Q = C \cdot I \cdot A \quad (3)$$

donde: Q = caudal

C = coeficiente de escorrentía (típicamente 0,2 a 0,7, ver Aparicio, 1997, p.210)

I = intensidad de precipitación

A = superficie de la cuenca

Para la aplicación práctica de este método, ver “*Aplicación del método racional*” en <http://web.usal.es/javisan/hidro> (Sección prácticas) donde se resume el procedimiento de M.O.P.U. (1990) y de FERRER (1993).

Hidrogramas sintéticos

Para tener una idea aproximada de la respuesta de una *cuenca pequeña* a unas *precipitaciones cortas y homogéneas*, podemos utilizar algunas fórmulas empíricas que, basándose en características físicas de la cuenca (superficie, pendiente media, longitud del cauce,...) proporcionan una idea del hidrograma resultante. Entre las numerosas aproximaciones que encontramos en la bibliografía, vamos a referir resumidamente la del S.C.S. (Soil Conservation Service) ¹ que forma parte de la normativa del Ministerio de Obras Públicas (1990) en España para los estudios previos a la construcción de carreteras.

El paso previo es calcular el *tiempo de concentración*. Esto puede hacerse por otros procedimientos, pero lo más sencillo es la utilización de fórmulas que proporcionan una aproximación ², por ejemplo, según la fórmula de Kirpich (en Wanielista, 1997, p. 142):

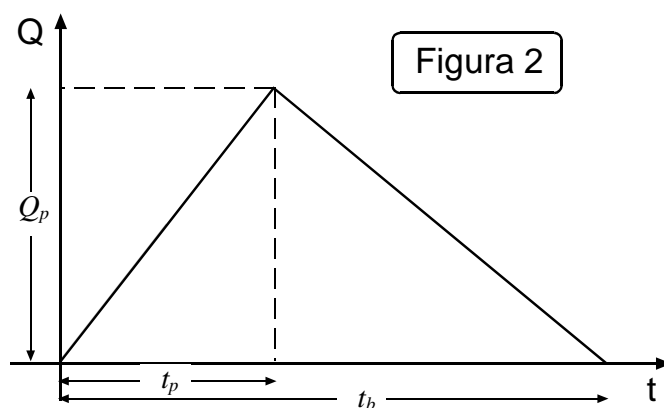
Tiempo de concentración (minutos):
$$t_c = 3,97 \cdot \left(\frac{L^{0,77}}{S^{0,385}} \right)$$

Donde: L = longitud del cauce (km.)

S = pendiente media (m/m)

Hidrograma triangular del SCS

En primer lugar simplifica la forma del hidrograma con la forma de un triángulo (Figura 2), lo que, a pesar de su simplicidad, nos proporciona los parámetros fundamentales del hidrograma: el caudal punta (Q_p), el tiempo base (t_b) y el tiempo en el que se produce la punta (t_p).



¹ Aparece en todos los textos de Hidrología Superficial. Por ejemplo: Wanielista (1997), pág 216; Pilgrim y Cordery (1993), pág 9.21. El antiguo S.C.S. corresponde al actual National Resources Conservation Service.

² Ver Apéndice 2.

Tiempo de la punta (horas):

$$t_p = 0,5 \cdot D + 0,6 \cdot t_c$$

Tiempo base (horas):

$$t_b = 2,67 \cdot t_p \quad (3)$$

Caudal de la punta ($m^3 / \text{seg.}$):

$$Q_p = \frac{0,208 \cdot P \cdot A}{t_p} \quad (4)$$

Donde:

t_c = tiempo de concentración (horas)

D = Duración de la precipitación efectiva (horas)

P = precipitación efectiva (mm.)

A = superficie de la cuenca (km^2)

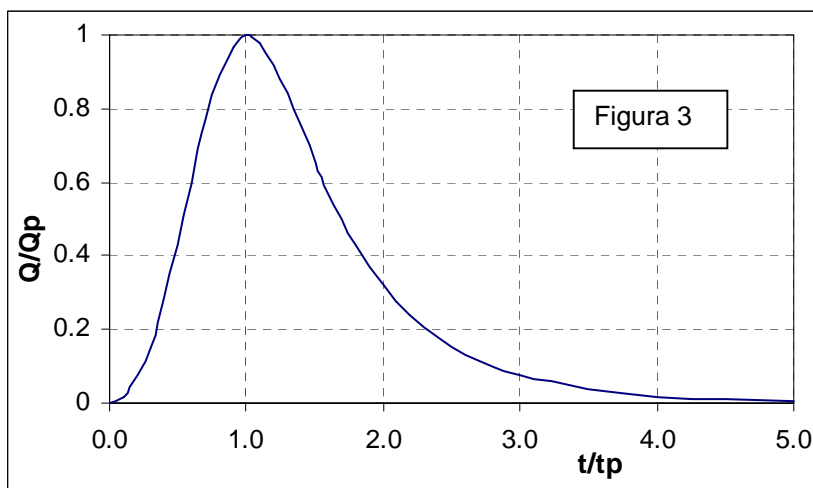
Estas características se obtuvieron estudiando hidrogramas de crecida provocados por unas precipitaciones cortas y uniformes en numerosas cuencas.

Hidrograma adimensional del SCS

Se observó que al estudiar una gran cantidad de hidrogramas, si se representan tomando el caudal de la punta (Q_p) como unidad de caudal y el tiempo al que se presenta la punta (t_p) como unidad de tiempo, la mayoría de los hidrogramas de crecida tenían una forma similar a la de la figura 3 y cuyas coordenadas se reflejan en la tabla. Para convertir cualquier hidrograma a este tipo, habrá que dividir los caudales por Q_p y los tiempos por t_p . Por esto en el hidrograma adimensional del SCS los caudales están como Q/Q_p y los tiempos como t/t_p .

Inversamente, si disponemos de los datos de la punta del hidrograma (sus coordenadas: t_p y Q_p), con la tabla adjunta podremos dibujar el hidrograma resultante en toda su extensión y con una forma similar a la que se puede esperar en una cuenca real, en lugar de un geométrico triángulo.

t / t_p	Q / Q_p	t / t_p	Q / Q_p
0,0	0	1,4	0,75
0,1	0,015	1,5	0,65
0,2	0,075	1,6	0,57
0,3	0,16	1,8	0,43
0,4	0,28	2,0	0,32
0,5	0,43	2,2	0,24
0,6	0,60	2,4	0,18
0,7	0,77	2,6	0,13
0,8	0,89	2,8	0,098
0,9	0,97	3,0	0,075
1,0	1,00	3,5	0,036
1,1	0,98	4,0	0,018
1,2	0,92	4,5	0,009
1,3	0,84	5,0	0,004



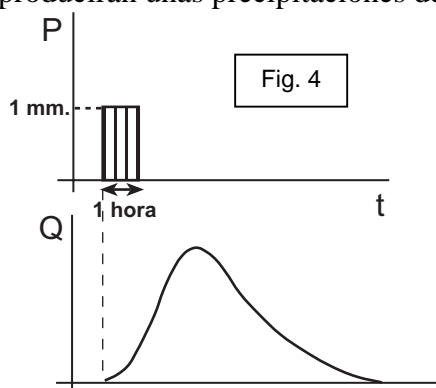
³ Esta expresión es totalmente **empírica**, no compararla con la relación **teórica** de $t_{base} = D + t_{conc}$, válida para una cuenca teórica e impermeable.

⁴ Esta expresión del caudal de la punta (Q_p) se obtiene igualando el volumen de agua precipitado (altura de precipitación x superficie de la cuenca) al área que se encuentra bajo el hidrograma (área de un triángulo = base x altura / 2; es decir: $t_b \cdot Q_p / 2$). Igualando: $P \cdot A = t_b \cdot Q_p / 2$, y se despeja Q_p . Sustituyendo $t_b = 2,67 \cdot t_p$, y operando con 3600 seg./día, se obtiene la fórmula de Q_p .

Estas técnicas solamente son válidas para considerar los hidrogramas producidos por precipitaciones cortas y homogéneas. Para precipitaciones cuya intensidad varía a lo largo del hietograma considerado, es necesario utilizar el hidrograma unitario.

Hidrograma Unitario

Se trata de un concepto fundamental al abordar el problema de calcular la escorrentía que producirán unas precipitaciones determinadas. Fue propuesto por Sherman en 1932.



*El Hidrograma Unitario de una cuenca es el hidrograma de **escorrentía directa** que se produciría en la salida de la cuenca si sobre ella se produjera una **precipitación neta** unidad de una duración determinada (por ejemplo, 1 mm. durante 1 hora) (Figura 4).*

Esa precipitación debe producirse con intensidad constante a lo largo del periodo considerado y repartida homogéneamente en toda la superficie de la cuenca.

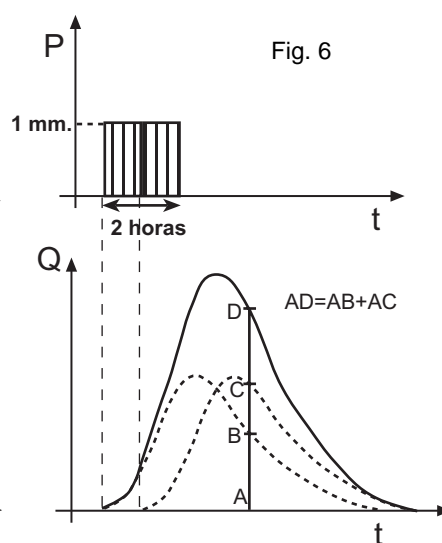
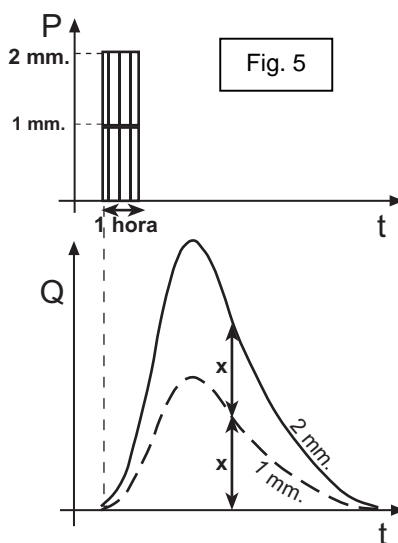
También podríamos considerar el producido por una precipitación de 1 pulgada durante 2 horas, o cualesquiera otras unidades de altura de precipitación y de tiempo, aunque la

definición clásica siempre habla de una precipitación **unidad**.

Si disponemos de ese hidrograma para una cuenca determinada, podremos construir el hidrograma producido por cualquier precipitación. Por ejemplo, si llueve 2 mm. durante 1 hora, bastará multiplicar por 2 las ordenadas de todos los puntos del hidrograma (Figura 5).

Análogamente, si disponemos del hidrograma unitario de esa cuenca y llueve 1 mm. durante 2 horas, bastará dibujar dos hidrogramas unitarios desplazados 1 hora en sentido horizontal y sumar las ordenadas de sus puntos (Figura 6)

Estas dos propiedades, expresadas en las Figuras 5 y 6 se conocen, respectivamente, como *propiedad de afinidad* y *propiedad de aditividad* del hidrograma unitario.



Ambas propiedades pueden utilizarse combinadas. Por tanto, en un caso real, y si conocemos el hidrograma unitario de nuestra cuenca, podríamos dibujar fácilmente el hidrograma que se produciría con cualesquiera precipitaciones, por ejemplo: 1 hora llovió 2.5 mm.; las siguientes 3 horas, 4.2 mm./hora; finalmente, 2 horas, 1.8 mm./hora (Yetograma de la Figura 7.a).

En primer lugar, se construirían los hidrogramas proporcionales para 1 hora y 2.5 mm., para 1 hora y 4.2 mm. y para 1 hora y 1.8 mm. (Figura 7.b). Finalmente, colocando estos hidrogramas desplazados en intervalos de 1 hora (Figura 7-c), se construiría el hidrograma resultante.

Para aplicar este procedimiento a un caso concreto, en una cuenca real, es necesario solucionar previamente dos cuestiones: 1. Construir el hidrograma unitario para esa cuenca. 2. Calcular las precipitaciones efectivas a partir de los datos de precipitación total proporcionados por los

pluviógrafos, pues los yetogramas de las figuras anteriores se refieren exclusivamente a Precipitación efectiva o neta.

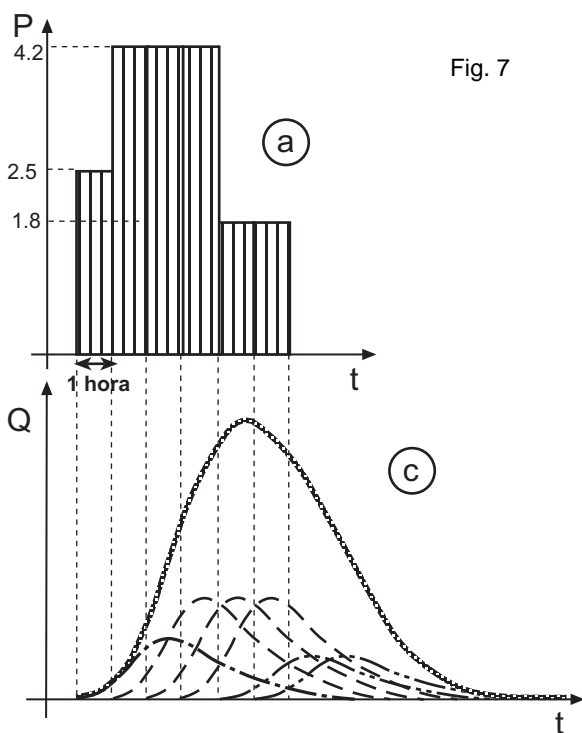
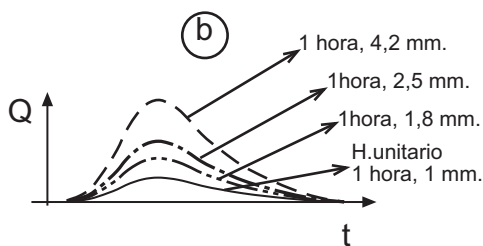


Fig. 7



Construcción del Hidrograma Unitario

A partir de datos de lluvias y caudales

Es necesario disponer de yetogramas e hidrogramas de la cuenca estudiada. Entre todas las precipitaciones disponibles, hay que elegir alguna de corta duración y uniforme por toda la cuenca. Elegida la precipitación, se estudia el hidrograma generado al mismo tiempo (Figura 8a y 8b)

En la Figura 8b separamos la escorrentía directa,

que se representa sola en la figura 8c. Allí se calcula el volumen de ese hidrograma de escorrentía directa. Como ejemplo, supongamos que el área rayada de la figura 8c equivale a 32000 m³, y que se trata de la escorrentía de una cuenca de 18 km². La lámina de agua equivalente que habría producido esa escorrentía sería:

$$\begin{aligned} \text{altura lámina agua (m.)} &= \\ &= \frac{\text{volumen(m}^3\text{)}}{\text{superficie(m}^2\text{)}} = \frac{32000}{18 \cdot 10^6} = 0,0017 \text{ m.} = 1,7 \text{ mm.} \end{aligned}$$

Si el hidrograma de la figura 8c ha sido producido por una lámina de agua de 1,7 mm., proporcionalmente se dibujaría el de 8d correspondiente a una precipitación de 1 mm. (dividiendo las ordenadas de todos los puntos por 1,7).

Finalmente es necesario volver al hietograma inicial, buscando qué parte del mismo corresponde a una precipitación de 1,7 mm. Supongamos que fuera la parte superior con rayado continuo. Ya podemos saber el periodo de tiempo del hidrograma unitario que acabamos de construir. Si el tiempo marcado en la Figura 8a como D fuera 1 hora, el hidrograma construido en la Fig.8d sería el producido por una precipitación de 1 mm. durante 1 hora.

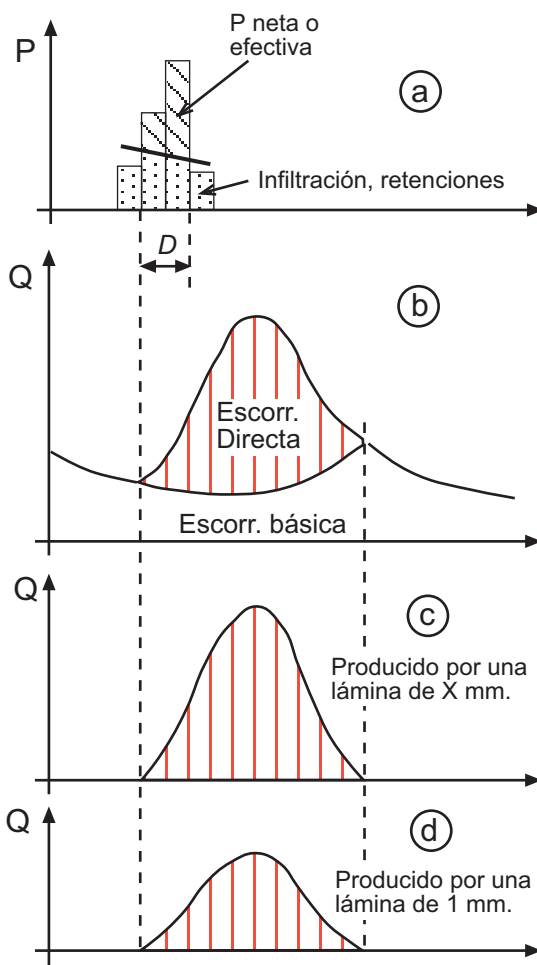


Fig. 8

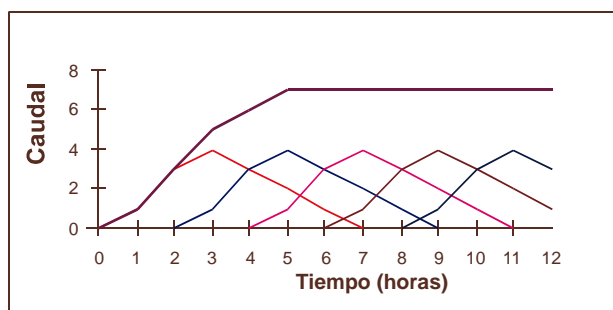
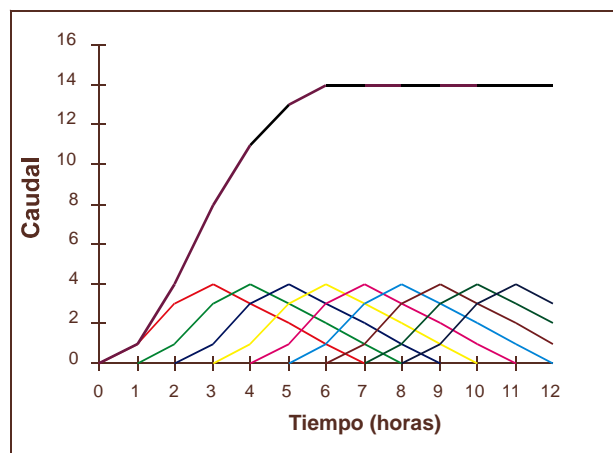
Construcción mediante hidrogramas sintéticos

Si no se dispone de otros datos, el hidrograma unitario se construiría con las fórmulas utilizadas para construir hidrogramas sintéticos, introduciendo en P (mm de precipitación) y en D (duración de la precipitación efectiva) los valores deseados, por ejemplo: 1 mm., 1 hora.

Hidrograma en S

Si disponemos del Hidrograma Unitario para una cuenca, (por ejemplo, el generado por una P eficaz de 1 mm. durante 1 hora) podemos construir el hidrograma que se produciría si lloviera 1 mm. indefinidamente. Por el principio de aditividad del HU se obtendría el hidrograma que se presenta en la figura adjunta

Si el mismo HU correspondiera a una P eficaz de 1 mm. en 2 horas, el hidrograma en S se conseguiría sumando muchos HU con un desfase en abscisas de 2 horas⁵



Cálculo de la Precipitación neta o efectiva

En los diversos procedimientos que hemos esbozado para evaluar el hidrograma que producirá una precipitación determinada, debemos conocer la precipitación neta o efectiva, la que produce escorrentía directa. Por tanto, previamente debemos separar qué parte de la precipitación total va a generar escorrentía directa. El resto de la precipitación se ha infiltrado o una pequeña parte puede haber quedado retenida en depresiones superficiales.

El cálculo de la P efectiva puede abordarse a partir del estudio de la infiltración: medidas, ecuaciones y modelos que reflejan la capacidad de infiltración y su evolución con el tiempo.

Más sencilla es la evaluación del S.C.S., que, mediante tablas y ecuaciones sencillas, evalúa el porcentaje de precipitaciones que produce escorrentía directa, en función de los siguientes factores: (1) Tipo de suelo; distingue sólo 4 tipos. (2). Utilización de la tierra: pastizal, cultivo, bosque, urbanizado,...(3) Pendiente (4) Humedad previa del suelo, basada en las precipitaciones producidas durante los 5 días anteriores (ver "Cálculo de la Precipitación Neta con el método del S.C.S." en la sección "Prácticas").

⁵ Los gráficos de estas figuras han sido dibujados a partir de un supuesto Hidrograma Unitario cuyas ordenadas fueran 0,1,3,4,3,2,1,0 (a Δ tiempo de 1 hora).

El proceso completo de calcular la esorrentía que producirá una precipitación determinada es mucho más complejo que los conceptos básicos esbozados aquí.

Como se indicaba en la introducción, para afrontar este tipo de problemas en casos reales, hemos de acudir a modelos de ordenador. Básicamente, hay dos familias de modelos que hacen la tarea de calcular el hidrograma generado en una cuenca:

a) *Modelos que simulan un suceso puntual*. HEC-1, HEC-HMS (del Hydrologic Engineering Center), TR-20 y TR-55 (del NRCS)

b) *Modelos de simulación continua*, como HPFS (elaborado por la EPA, Environmental Protection Agency)

Los primeros necesitan datos de la precipitación de interés, más las características físicas de las diversas subcuencas. Los segundos, además de necesitar la serie continua de precipitaciones, deben computar la evapotranspiración, fusión de la nieve, flujo subsuperficial en la zona no saturada, etc.

Todos estos modelos se pueden conseguir gratuitamente en Internet de los organismos citados. Existen programas comerciales que implementan los cálculos de los modelos citados y cuya utilización es relativamente más simple.

APÉNDICE 1: Construcción de un HU a partir de otro de diferente Precipitación o de diferente duración

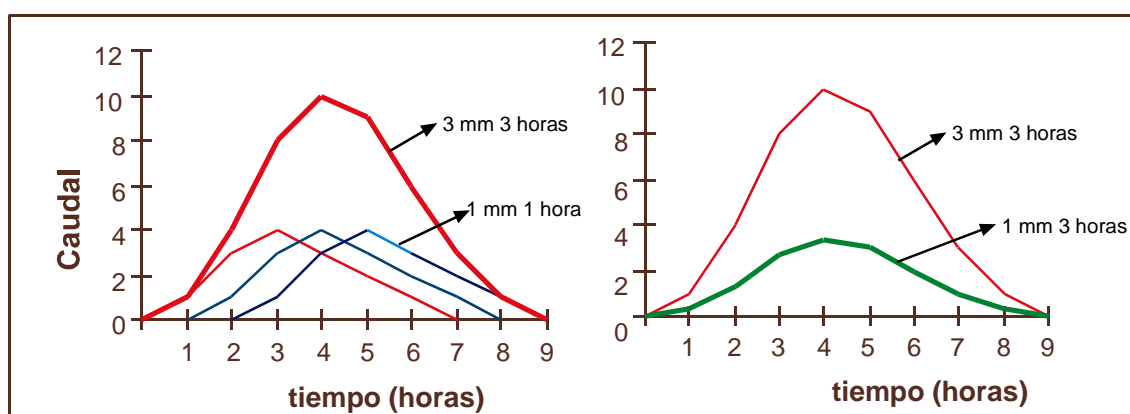
Cambio en la P eficaz

Por el principio de afinidad del HU, basta con multiplicar las ordenadas del hidrograma por el factor de conversión entre las P consideradas. Por ejemplo, si disponemos del HU para 1 pulgada en 1 hora y quisiéramos obtener el de 1 mm. en 1 hora, bastaría con dividir las ordenadas (caudales) por 25,4 (mm./pulgada)

Cambio en la duración a un periodo múltiplo

Si disponemos del HU de 1 mm. en 1 hora y, por ejemplo, quisiéramos conseguir el de 1 mm. en 3 horas, habría que:

- 1°. sumar tres HU unitarios de 1 hora (principio de Aditividad), resultando el correspondiente a 3 mm. de P eficaz en 3 horas;
- 2°. dividir sus ordenadas por 3, para conseguir el generado por 1 mm. caído durante 3 horas



Cambio en la duración a un periodo de tiempo no múltiplo

Podemos desear convertir el HU de 1mm. en 2 horas a 1 mm. en 3 horas, de 3 horas a 2 horas o de 2 horas a 1 hora. En cualquiera de estos ejemplos el periodo del HU deseado no es múltiplo del periodo del HU disponible. EN este caso, el proceso es el siguiente (supongamos que deseamos transformar un HU de 3 horas en uno de 2 horas):

1º. Calcular el Hidrograma S con el HU disponible (sumando varios de 1mm 3 horas, desfasandolos 3 horas)

2º. Restar dos Hidrogramas S (como el que acabamos de calcular) desfasados en el Δ tiempo al que deseamos llegar (en el ejemplo, desfasados 2 horas)

3º. Al hidrograma resultante de esa diferencia, multiplicarlo por el factor Δt disponible/ Δt deseado (en el ejemplo, multiplicar por 3/2)

Desarrollo de los cálculos para el ejemplo citado de un HU de 3 horas en uno de 2 horas:

1º. Construir el Hidrograma en S

t (horas)	H.U.	H.U.	H.U.	H.U.		Hidr. S
0	0					0
1	1					1
2	4					4
3	8	0				8
4	10	1				11
5	9	4				13
6	6	8	0			14
7	3	10	1			14
8	1	9	4			14
9	0	6	8	0		14
10		3	10	1	etc...	14
11		1	9	4		14
12		0	6	8		14
13			3	10		14
14			1	9		14
15			0	6		14
16				3		14
17				1		etc...
18				0		

2º. Restar dos hidrogramas S desfasados dos horas

3º. Multiplicar por Δ tiempo original/ Δ tiempo deseado

SOLUCIÓN
V

t (horas)	Hidr S	Hidr S	dif.	dif x3/2
0	0		0	0
1	1		1	1,5
2	4	0	4	6
3	8	1	7	10,5
4	11	4	7	10,5
5	13	8	5	7,5
6	14	11	3	4,5
7	14	13	1	1,5
8	14	14	0	0
9	14	14	0	0
10	14	14	0	0
11	14	14		
12	14	14		
13	etc...	14		
14		etc...		

APÉNDICE 2: Fórmulas para evaluar el tiempo de concentración

Hemos visto la fórmula de Kirpich, aunque existen otras.

Instrucción de carreteras 5.2-IC (Ministerio de Obras Públicas, 1990)

$$\text{Tiempo de concentración (horas): } t_c = 0,3 \cdot \left(\frac{L}{S^{1/4}} \right)^{0,77}$$

Donde: L = longitud del cauce (km.)
 S = pendiente media (m/m)

Bransby Williams (en Pilgrim y Cordery, 1993, p. 9-16)

$$\text{Tiempo de concentración (minutos): } t_c = 14,6 \cdot L \cdot A^{-0,1} \cdot S^{-0,2}$$

Donde: L = longitud del cauce (km.)
 A = superficie de la cuenca (km²)
 S = pendiente media (m/m)

Los resultados de estas fórmulas difieren alarmantemente. Cada una de ellas fue obtenida pensando en unas cuencas de características determinadas. Por tanto deben manejarse con precaución.

Como ejemplo: Para una cuenca de 120 km² de superficie, pendiente media = 0,008 y longitud del cauce 25 km. se obtienen los siguientes valores del tiempo de concentración:

Kirpich: 320 minutos, Bransby: 610 minutos, Ministerio O.P.: 558 minutos

En <http://www.cee.engr.ucf.edu/software/> podemos descargar el software SMADA, el mismo que acompaña el texto de Wanielista (1997). Aparte del programa principal (SMADA) que calcula los hidrogramas generados por las precipitaciones, se encuentran otras aplicaciones menores, entre las que está **TC Calculator**, que proporciona el tiempo de concentración mediante diversas fórmulas⁶.

Bibliografía

CHOW, V.; D.R. MAIDMENT y L.W. MAYS (1994).- *Hidrología Aplicada*. Mc Graw Hill, 580 pp.

FERRER, F.J. (1993).- *Recomendaciones para el Cálculo Hidrometeorológico de Avenidas*. CEDEX, Ministerio de Obras Públicas, Madrid, 75 pp.

M.O.P.U. (1990).- *Instrucción de Carreteras 5.2-IC "Drenaje superficial"*. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (Boletín Oficial del Estado, 123, 23-5-1990)

PILGRIM, D. H. y I. CORDERY (1993).- "Flood Runoff". In: *Handbook of Hydrology*. D. R. Maidment (Ed.), pp. 9.1- 9.42. McGrawHill.

WANIELISTA, M. P. (1997).- *Hydrology and Water Quality Control*. Wiley, 567 pp. 2^a edición.

⁶ Aunque funciona también con unidades del Sistema Métrico, las fórmulas que aparecen en pantalla (sólo como ilustración) se refieren a pies y millas.