Hidrología Superficial (II): Hidrogramas

Hidrogramas

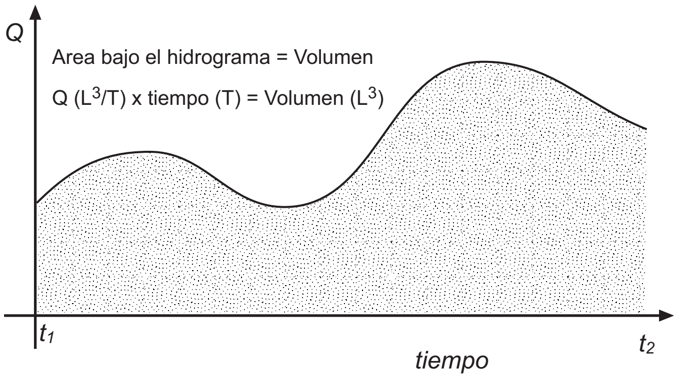
Un hidrograma es la expresión gráfica de $Q = f(t)$. Puede representarse a escalas muy diversas: en el eje de abcisas puede aparecer un intervalo de tiempo de 12 horas o de 2 años.

El área comprendida bajo un hidrograma es el volumen de agua que ha pasado por el punto de aforo en el intervalo de tiempo considerado.

Efectivamente, si multiplicamos las unidades del eje horizontal por las del eje vertical, se obtiene un volumen:

$$Q \text{ (volumen/tiempo)} \cdot \text{tiempo} = \text{Volumen}$$

En la figura adjunta, el área bajo la curva del hidrograma es el volumen de agua que ha pasado entre t_1 y t_2.



Esto se puede cuantificar de diferentes modos, según el caso:

– Si disponemos del dibujo de un hidrograma, planimetramos la superficie comprendida bajo el hidrograma. Como ejemplo, supongamos que en la figura adjunta 1 cm en el eje de abcisas corresponde a 1 día y 1 cm en el eje vertical corresponde a 5 m^3/s. Cada cm^2 bajo el hidrograma corresponderá a un volumen de agua igual a:

$$\text{Volumen} = \text{Caudal} \cdot \text{tiempo} = 5 \text{ m}^3/\text{seg} \cdot 86400 \text{ seg} = 432000 \text{ m}^3$$

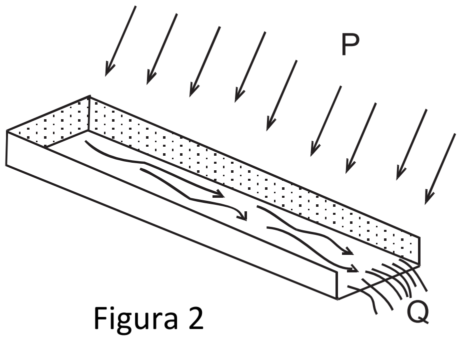
– Si el fragmento de hidrograma considerado responde a una ecuación, bastará con calcular la integral de dicha ecuación.

– Si disponemos de una serie de caudales tomados a incrementos de tiempo iguales, el volumen será: $Q_1 . \Delta t + Q_2 . \Delta t + Q_3 . \Delta t + ... = (Q_1 + Q_2 + Q_3 + ...) . \Delta t$

Hidrograma de una crecida

Para comprender la forma de un hidrograma y cómo esta forma es el reflejo de las precipitaciones que han generado esa escorrentía directa, supongamos un experimento de laboratorio en el que producimos unas precipitaciones constantes sobre un canal rectangular y aforamos el caudal a la salida del canal (figura 2).

El hietograma será una banda homogénea, puesto que se trata de una precipitación artificial de intensidad constante.



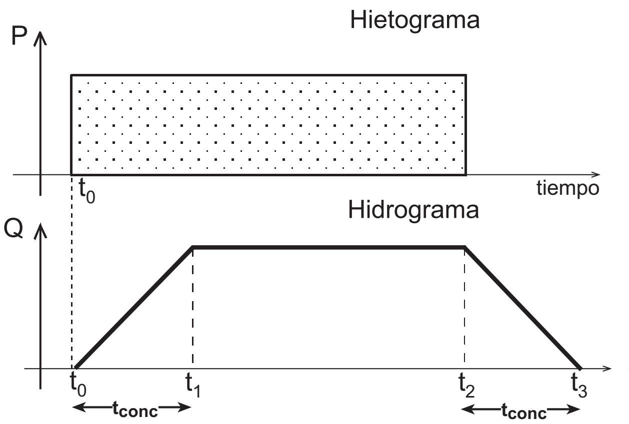


Figura 2

El hidrograma comenzará a subir desde el instante t_0 en que comienza la precipitación y el caudal irá aumentando hasta t_1, momento en que llega al punto de salida la primera gota que cayó en el punto más alejado del canal. A partir de ese momento, el caudal se mantendrá constante (e igual a la intensidad de precipitación que está cayendo sobre el canal), y así seguiría mientras durara la precipitación constante. Si en el instante t_2 la precipitación cesa bruscamente, el caudal irá disminuyendo mientras la lámina de agua que ocupaba el canal va llegando a la salida. En el instante en que la última gota que cayó en el punto más alejado llega a la salida (t_3) el caudal se anula.

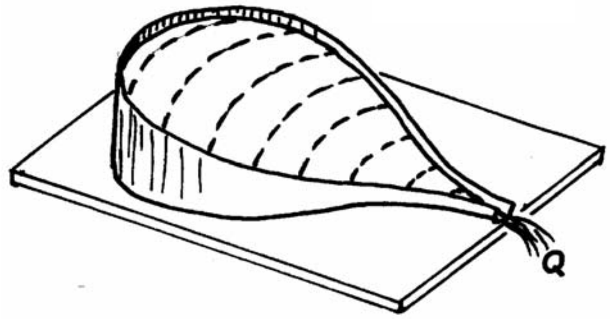
El intervalo de t_0 a t_1 es igual al intervalo de t_2 a t_3: ambos son el tiempo que tarda en llegar a la salida una gota caída en el punto más alejado de ésta. En una cuenca real se llama ***tiempo de concentración*** y es un parámetro fundamental en el estudio del comportamiento hidrológico de una cuenca.

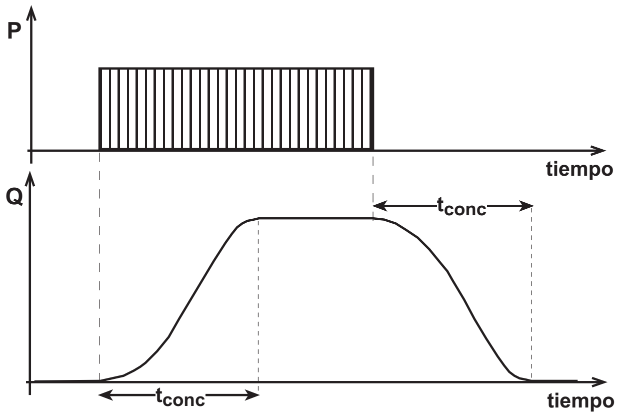
En la figura 2 se aprecia que: $t_{base} = t_p + t_c$

Donde: t_{base} = tiempo base del hidrograma
t_p = duración de la precipitación
t_c = tiempo de concentración

Si repitiéramos la experiencia con un recipiente de forma similar a la de una cuenca real, el hidrograma obtenido sería como se muestra en la figura 3, que ya es similar a un hidrograma de crecida real.

Figura 3





Las líneas de trazos que aparecen en la maqueta de una cuenca de la figura 3 (izquierda) representan las zonas de igual tiempo de llegada a la salida, se denominan *líneas isocronas*. Tras el comienzo de la precipitación, en el primer Δt llegaría el agua caída en la primera banda, en el 2º Δt llegaría el agua caída en las bandas 1ª y 2ª, etc. Si la precipitación se prolonga lo suficiente, en el 9º Δt y sucesivos llegaría el agua caída en toda la cuenca. Al cesar la precipitación, en el primer Δt ya faltaría el agua que no había caído en la 1ª banda, y sí se aforarían las caídas en las bandas 2ª y siguientes en los Δt anteriores. En el 2º Δt faltarían la de la 1ª y la 2ª,... y al final del hidrograma se aforaría solamente el agua caída en la 9ª banda, en el Δt anterior al fin de la precipitación.

En ambos casos, figura 2 y figura 3, el hidrograma tiene una meseta horizontal debido a que el **tiempo de precipitación** es mayor que el **tiempo de concentración** de la cuenca. Si no es así, es decir, si la duración de las precipitaciones es menor que el tiempo de concentración, no se llegará a alcanzar la meseta de caudal constante, comenzando a bajar antes de alcanzar ese caudal constante. En ningún momento ha llegado a contribuir toda la superficie de la cuenca a la escorrentía; en ese caso, en la cuenca de la figura 3 se generarían los hidrogramas indicados a trazos en la figura 4.

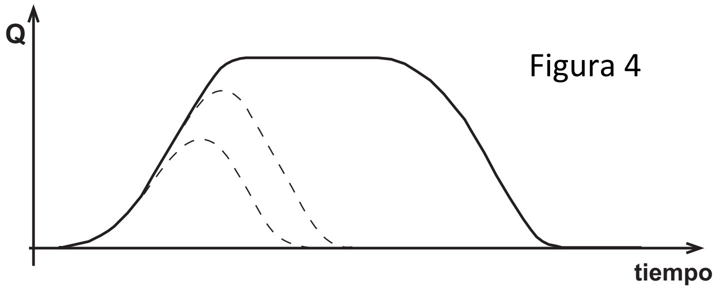


Figura 4

En una cuenca real cuyo cauce estuviera seco previamente a las precipitaciones, y con una precipitación más corta que el tiempo de concentración de la cuenca, el hidrograma generado en la desembocadura sería similar a una de las líneas de trazos de la figura 4, y se muestra en la figura 5. Arriba, en el hietograma, observamos que una parte de las precipitaciones no produce escorrentía directa, son precipitaciones retenidas superficialmente o infiltradas en el suelo, denominadas *abstracciones*. La parte de la precipitación que sí produce escorrentía directa se denomina *lluvia neta* o *precipitación neta*[1]. Por tanto, cuando más arriba se dice: "una precipitación más corta que el tiempo de concentración", se refiere a precipitación neta.

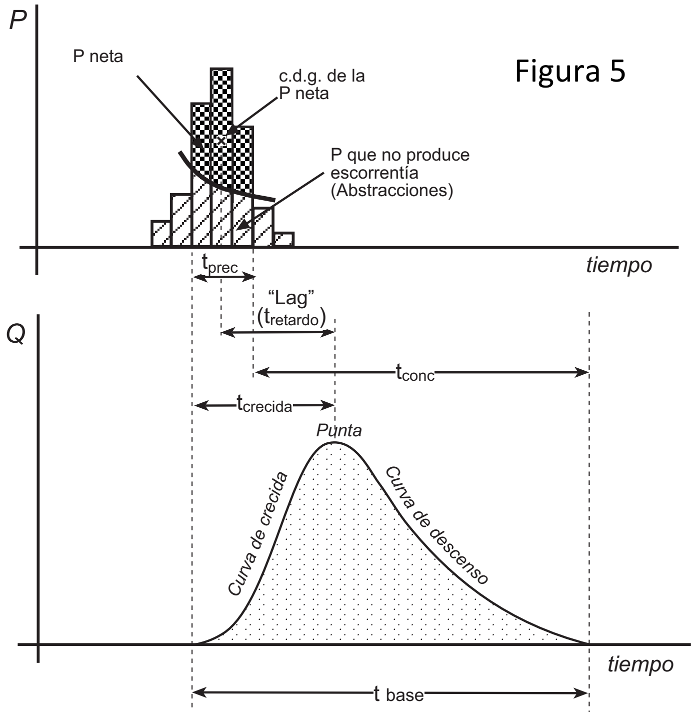


Figura 5

Observamos que aquí también se cumple la relación: $t_{base} = t_{precip} + t_{conc}$ que habíamos visto en las figuras 2 y 3. Además de estos tiempos, ya explicados, aparecen dos nuevos parámetros: el **tiempo de crecida** (desde el comienzo de la P_{neta} hasta la punta del hidrograma, y el **tiempo de retardo** (en inglés, ***lag***), que es el tiempo transcurrido desde el centro de gravedad del hietograma de P_{neta} hasta la punta del hidrograma. Notar que: $t_{crecida} = t_{retardo} + t_{prec} /2$.

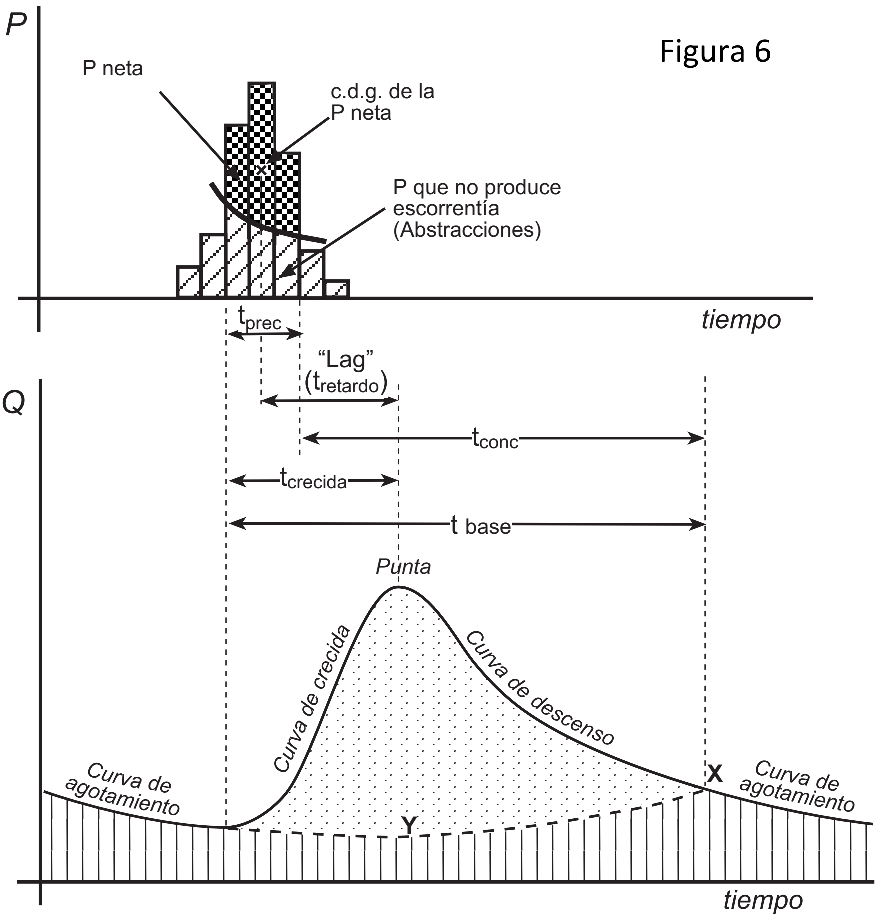
En las figuras 2 y 3 el **tiempo de concentración** coincidía con el tiempo del tramo de subida o el del tramo de bajada del hidrograma; aquí no es así, ya que $t_{prec} < t_{conc}$ (ver los

[1] Para este concepto se utilizan también las denominaciones: *Precipitación eficaz, efectiva,* o *en exceso* (ésta última por traducción literal del inglés); o *lluvia eficaz,* etc. En inglés: *excess rainfall, effective rainfall, net rainfall*

hidrogramas en línea de trazos de la figura 4). La única posibilidad de acotar el tiempo de concentración es considerando el tiempo de recorrido de la última gota precipitada.

En una cuenca real de gran tamaño, cuando se producen precipitaciones, es normal que el caudal previo a las precipitaciones no sea nulo, aunque estaba agotándose lentamente. El hidrograma generado se muestra en la figura 6.

Se aprecia que el hidrograma con trama de puntos es el mismo que el de la figura 5, pero en vez de estar apoyado sobre el eje de abcisas, se apoya sobre el caudal que tenía el río antes de las precipitaciones. Ya hemos visto (tema "El Ciclo Hidrológico") que dicho caudal se denomina *escorrentía básica* y es debido a la *escorrentía subterránea* más la *escorrentía superficial diferida*; muchas veces ésta última es despreciable y la superficial diferida equivale a la escorrentía subterránea.



La escorrentía básica (la parte del caudal que no es debida a esta lluvia neta), con trama en líneas verticales, al comenzar la crecida continúa agotándose hasta el punto **Y**, y después comienza a aumentar. Esto es debido a que parte de las abstracciones habrá alcanzado la superficie freática, elevándola, y eso provoca que la aportación subterránea aumente (Figura 7).

El punto marcado en la figura 6 como **X** corresponde al momento en que toda la escorrentía directa provocada por esas precipitaciones ya ha pasado. El agua aforada a partir de ese momento es escorrentía básica. Es importante notar que la nueva curva de agotamiento comienza más arriba que donde se encontraba el agotamiento antes de la crecida, debido a la infiltración que ha recibido el acuífero.

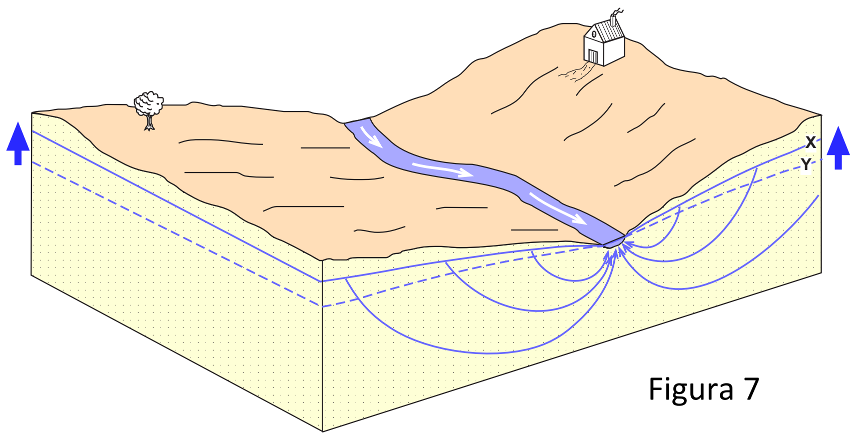


Figura 7

En un hidrograma real las precipitaciones son intermitentes en el tiempo y dispersas e irregulares en el espacio de la cuenca receptora que está siendo aforada, por lo que el hidrograma aparecerá con un trazado irregular en lugar de la curva suave de la figura 6.

Veremos más adelante que el punto **X** se aprecia mejor si representamos *log Q* en función del tiempo, ya que el tramo *curva de agotamiento* se convertirá en una recta. El punto **X** también se puede situar mediante fórmulas empíricas, como ésta (Linsley, 1949, en Custodio, 1983, p. 395):

$N = 0{,}826 \cdot A^{0{,}2}$, siendo: N = días trascurridos desde la punta hasta **X**
A= área de la cuenca en km^2

Separación de componentes

Al pasar de la figura 5 a la 6 hemos introducido la escorrentía básica debajo del hidrograma de crecida. Si disponemos de un hidrograma real, el proceso es inverso: partimos de la curva del hidrograma que se ha medido y queremos separar qué parte corresponde a escorrentía directa y qué parte a escorrentía básica. Este proceso se denomina *separación de los componentes del hidrograma*, y se realiza gráficamente.

El procedimiento más sencillo y más utilizado es el siguiente: Prolongamos la curva de agotamiento previa a la crecida hasta la vertical de la punta del hidrograma (figura 8, trazo Z-Y), y luego se continúa la curva de modo ascendente hasta el punto **X**, donde supongamos que se encuentra el comienzo de la curva de agotamiento posterior a la crecida (figura 8, trazo Y-X).

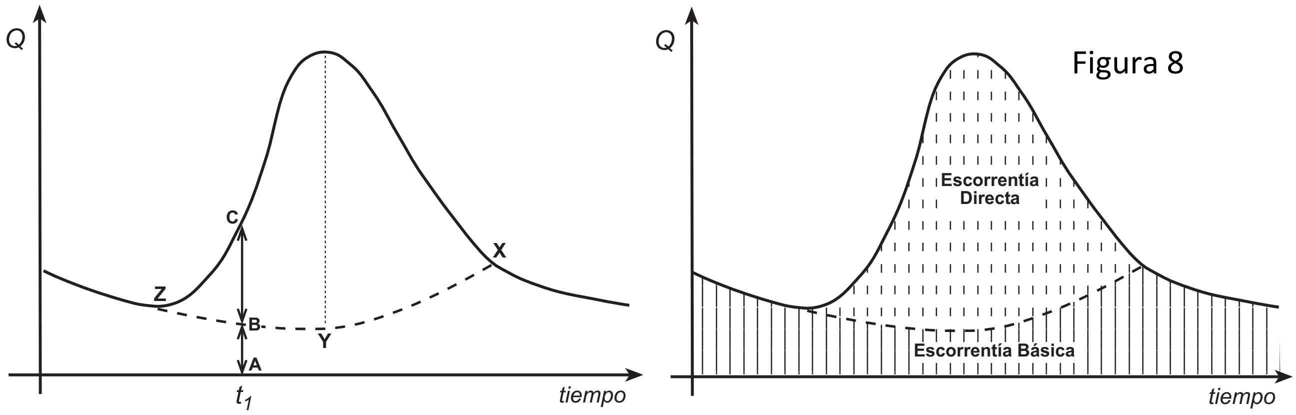


Figura 8

Consideremos el instante t_1 (figura 8): la parte A-B del caudal es debida a la escorrentía básica y la parte B-C corresponde a la escorrentía directa.

El procedimiento indicado más arriba es quizá el más utilizado para la separación de componentes aparece en la Figura 9 como opción [1]. A veces se aplican los trazados que se reflejan en la misma figura con los números 2, 3 y 4.

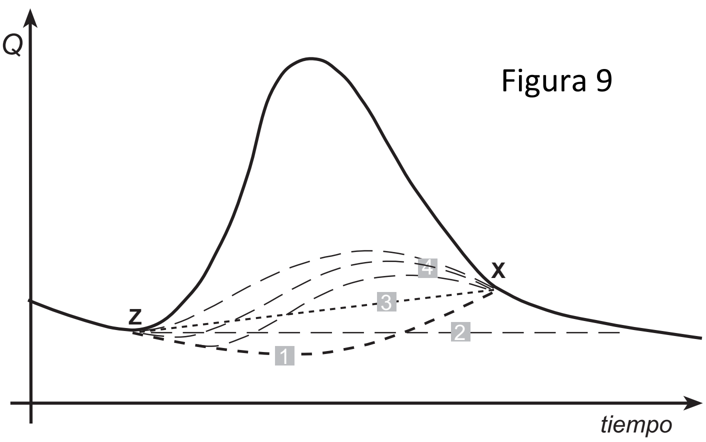


Figura 9

Opción [2]: Para una evaluación aproximada o cuando el tiempo de crecida es pequeño, puede ser suficiente trazar una línea horizontal desde el comienzo de la crecida.

Opción [3] : Trazamos una recta desde el comienzo hasta el final de la crecida (desde Z hasta X). Aunque se trata de una aproximación, en muchos casos el error es aceptable

Opción [4] : Cualquiera de las posibilidades indicadas como [4] podría ser adecuada en cuencas en las que se produzca una rápida respuesta de la escorrentía básica tras el comienzo de la precipitación, probablemente por la poca profundidad de la superficie freática.

Realizada la separación por cualquiera de los procedimientos, para evaluar qué parte de la aportación es debida a escorrentía directa y qué parte a escorrentía básica habría que planimetrar las dos partes resultantes de la separación del hidrograma. Ya hemos visto que el área bajo el hidrograma corresponde al volumen, de modo que la proporción entre esas dos zonas nos informará de la proporción entre ambas escorrentías.

En este aspecto tendrá una importancia fundamental la geología de la cuenca. Si es impermeable será proporcionalmente mayor la parte correspondiente a escorrentía directa. En la figura 10 observamos que una cuenca de geología impermeable presentará estiajes dramáticos seguidos de fuertes crecidas. La cuenca de geología permeable durante los estiajes mantiene un caudal apreciable y las crecidas son relativamente suaves.

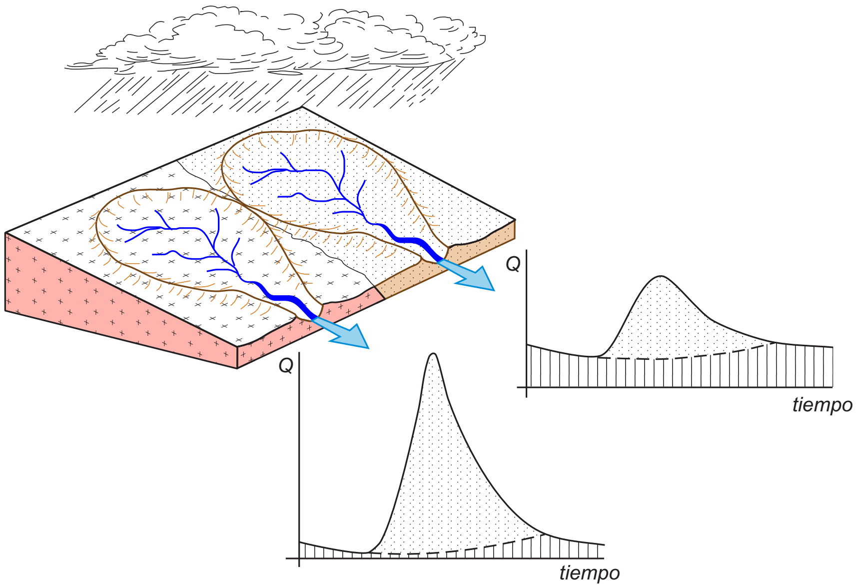


Figura 10

Dos cuencas iguales reciben las mismas precipitaciones. A la izquierda, la geología es granítica, a la derecha arenosa.

Los hidrogramas generados tiene la misma superficie (ha pasado el mismo volumen de agua), pero en el de la izquierda la escorrentía directa es el 81%, a la derecha el 39%

Curva de agotamiento de un hidrograma

Ya hemos visto que la **curva de agotamiento** es la parte de un hidrograma en que el caudal procede solamente de escorrentía básica. En las figuras anteriores veíamos la curva de agotamiento como continuación de hidrogramas de crecida. En la figura 11.b se presenta el hidrograma de una curva de agotamiento que comienza con un caudal inicial Q_o

En ese apartado nos referimos al caso de que la escorrentía básica se deba exclusivamente a escorrentía subterránea.

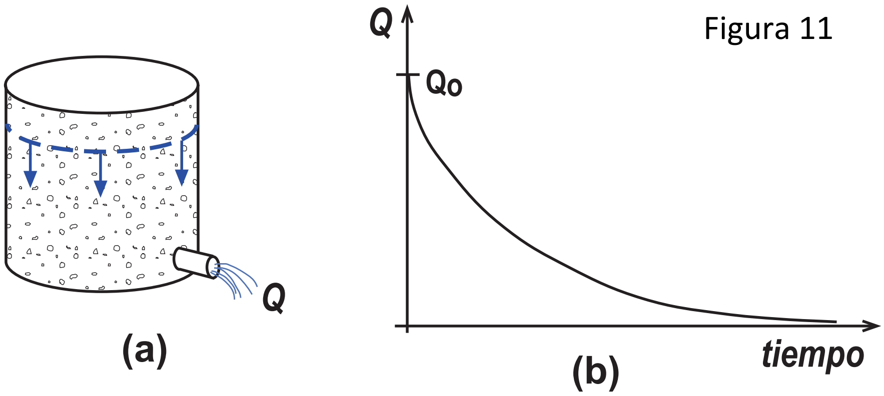


Figura 11

Este hidrograma podría generarse por un depósito lleno de arena y saturado de agua (figura 11.a) en el que abrimos el conducto inferior de salida. Inicialmente saldrá un caudal Q_o, que irá disminuyendo con el paso del tiempo hasta agotarse. La evolución del caudal Q en el tubo de salida se reflejaría en la figura 11.b.

El conjunto de acuíferos de una cuenca completa se comporta como el bidón de la figura 11: se llena durante el periodo de precipitaciones y se vacía durante el estiaje, alimentando el cauce. En la figura 12 hemos supuesto que la geología de la cuenca fuera homogénea, y el volumen de "embalse subterráneo" de esa cuenca sería el señalado con trama de líneas verticales en el corte de dicha figura 12.

La curva de agotamiento del caudal del río tendría la misma forma que la del bidón de arena.

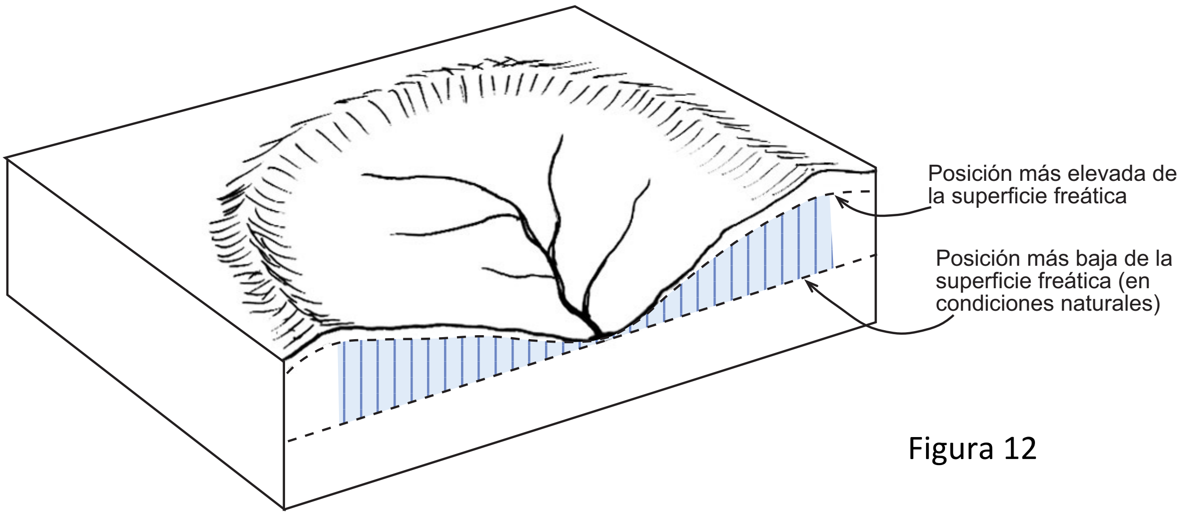


Figura 12

En cualquiera de los casos, el bidón o la cuenca, la ecuación que refleja esas curvas de agotamiento es de este tipo:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t} \qquad (1)$$

Donde: Q_o = Caudal en el instante inicial $\boldsymbol{t_o}$

Q_t = Caudal en el instante $\boldsymbol{t}$

t = Tiempo que ha transcurrido desde $\boldsymbol{t_o}$

e = número e (2,718...)

α = constante, que depende del cuerpo de material poroso que estamos considerando

Como la cuenca se comporta como un embalse (retiene agua cuando es abundante, la entrega cuando es necesaria) es muy conveniente poder evaluar el volumen de ese "embalse subterráneo" constituido por todos los acuíferos de la cuenca.

Ya hemos visto que el área comprendida bajo un hidrograma es el volumen de agua que ha pasado por el punto de aforo en el intervalo de tiempo expresado en el hidrograma. En un hidrograma cualquiera, dicha área debe ser planimetrada. Pero en este caso, como esta parte del hidrograma tiene una ecuación, el área bajo la curva puede ser calculada analíticamente mediante su integral. Por tanto, si integramos el área bajo la curva de la figura 11.b, el valor obtenido corresponderá al volumen total de agua almacenada en el bidón de arena en el instante inicial, o el almacenado en los acuíferos que alimentan un río durante su estiaje. En ambos casos, será el volumen almacenado en el instante t_o, cuando el caudal es Q_o.

Ese volumen será, integrando la ecuación (1) [2]:

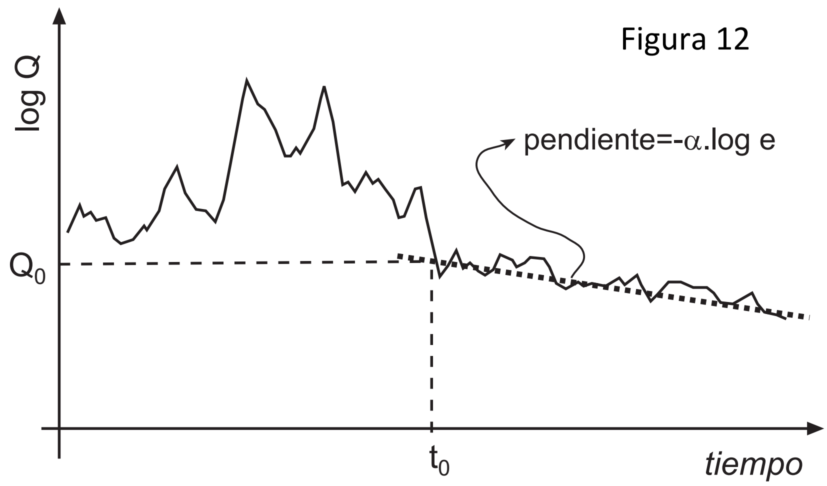
$$V = \int_0^\infty Q_0 . e^{-\alpha t} . dt = \frac{Q_0}{\alpha} \qquad (2)$$

Por otra parte, si tomamos logaritmos en la ecuación (1) obtenemos:

$$\log Q_t = \log Q_o - \alpha\, t \log e \qquad (3)$$

Esta ecuación (3) es la de una recta (y= a+b·x), si expresamos el **log *Q*** en función del tiempo ***t***, siendo la pendiente: [$-\alpha$ log e]. Efectivamente, si dibujamos el *logaritmo de* Q_t en función de t, **la curva de agotamiento aparecerá como una recta** (figura 12), y podremos calcular la pendiente de esa recta, de ella deduciremos α y finalmente calcularemos el volumen almacenado por el "embalse subterráneo" de la cuenca en el instante t_0 mediante la expresión (2)..[3]

Figura 12



El valor de la constante α es constante y característico de una cuenca. El valor de Q_0 variará en la misma cuenca, dependiendo de los niveles de los acuíferos de la cuenca (más o menos llenos) en el tiempo t_o. Debemos buscar varias rectas de agotamiento, de años sucesivos, comprobar que todas presentan la misma pendiente ($-\alpha$ log e) y elegir para el cálculo la recta de agotamiento que comience más arriba: el Q_0 más alto posible indicará la máxima capacidad de regulación de esa cuenca.

---

[2] $$V = \int_0^\infty Q_0 \cdot e^{-\alpha t} \cdot dt = Q_0 \cdot \left[-\frac{e^{-\alpha t}}{\alpha} \right]_0^\infty = Q_0 \cdot \left(-\frac{e^{-\alpha \infty}}{\alpha} - \left(-\frac{e^{-\alpha 0}}{\alpha} \right) \right) = Q_0 \cdot \left(\frac{0}{\alpha} + \frac{1}{\alpha} \right) = \frac{Q_0}{\alpha}$$

[3] Ver la práctica **"Estudio de la curva de agotamiento",** con un ejemplo numérico: http://hidrologia.usal.es/practicas/Volumen_embalse_subterraneoEXPLICACION.pdf