

# Medida de caudales

## Medidas de los caudales: Tipos de aforos

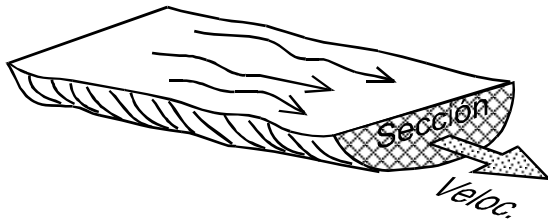
*Aforar* es medir un caudal. En Hidrología superficial puede ser necesario medir desde pequeños caudales (unos pocos litros /seg.) hasta grandes ríos con caudales de centenares o miles de m<sup>3</sup>/seg. Distinguimos dos tipos de aforos:

- *Aforos directos*. Con algún aparato o procedimiento medimos directamente el caudal
- *Aforos indirectos o continuos*. Medimos el nivel del agua en el cauce, y a partir del nivel estimamos el caudal.

Para medir el caudal diariamente o de un modo continuo en diversos puntos de una cuenca se utilizan los aforos *indirectos*, por eso también se les denomina *continuos*.

## Aforos Directos

### Estimación aproximada con flotadores



El procedimiento se basa en medir la velocidad del agua y aplicar a ecuación:

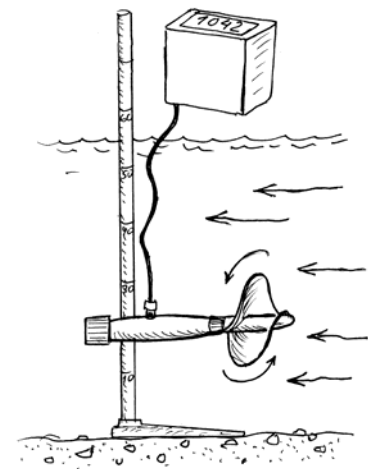
$$\text{Caudal} = \text{Sección} \times \text{Velocidad}$$
$$\text{m}^3/\text{seg} = \text{m}^2 \times \text{m}/\text{seg}$$

Para una estimación, la velocidad se calcula arrojando algún objeto que flote al agua, y la sección se estima muy aproximadamente (anchura media x profundidad media). Este procedimiento da grandes errores, pero proporciona un orden de magnitud.<sup>1</sup>

A veces se aconseja multiplicar el valor obtenido con flotadores por un coeficiente del orden de 0,7 ó 0,8, ya que con los flotadores suele medirse preferentemente la velocidad en la parte central del cauce, no teniendo en cuenta las partes próximas a las orillas, de velocidades más bajas, obteniéndose un error por exceso.

### Molinete

La medida exacta de la velocidad se realiza con un molinete<sup>2</sup>. Se mide la velocidad de la corriente en varios puntos de la misma vertical y en varias verticales de la sección del cauce (Figura 3). A la vez que se miden las

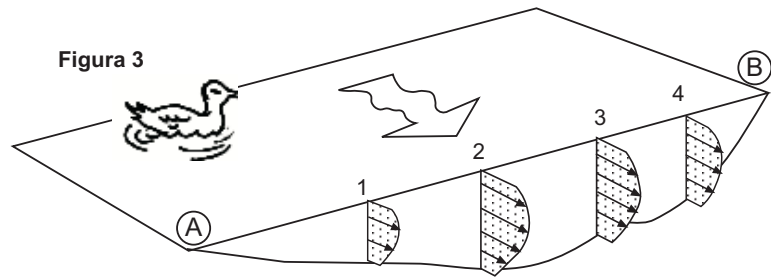


<sup>1</sup> [http://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6705s/x6705s03.htm#top](http://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6705s/x6705s03.htm#top)

<sup>2</sup> Los modelos modernos indican directamente la velocidad (convierten automáticamente el número de vueltas en velocidad del agua). Los modelos más antiguos muestran sólo el número de vueltas; necesitamos un reloj para leer *n*<sup>o</sup> vueltas/minuto y con una sencilla ecuación propia de cada aparato, se convierte *n*<sup>o</sup> vueltas/minuto en velocidad (m/segundo)

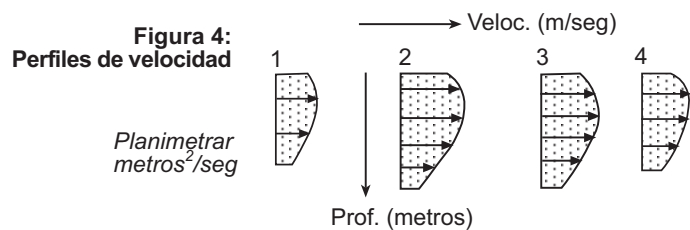
velocidades se mide la profundidad en cada vertical y la anchura exacta del cauce y, lo que nos permite establecer la sección con bastante precisión.

En el ejemplo de la Figura 3 se han realizado medidas en cuatro verticales: En cada vertical se mide la distancia desde la orilla (distancias A-1, A-2, etc.), la profundidad en ese punto, y se realizan una o varias medidas de la **velocidad** a distintas profundidades. En el ejemplo del dibujo se han realizado: dos medidas en la vertical 1, cuatro medidas en las verticales 2 y 3 y tres medidas en la vertical 4.

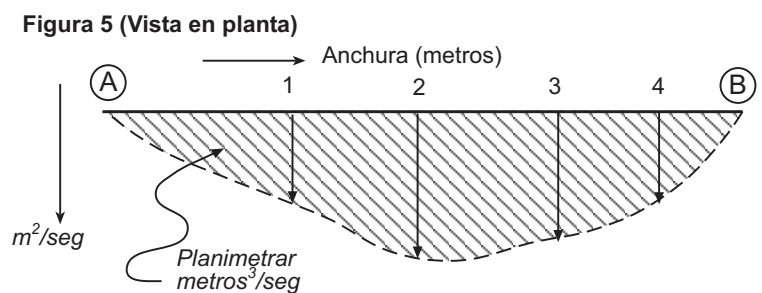


A partir de las velocidades se obtiene el caudal por el siguiente procedimiento:

1º) Se dibujan a escala los perfiles de corriente correspondientes a cada vertical donde se midió con el molinete (Figura 4). Se planimetra cada uno de los perfiles. Como en horizontal están las velocidades en **m/seg** y en vertical la profundidad en **metros**, la superficie planimetrada en cada perfil estará en **m<sup>2</sup>/seg**.



2º) Se dibuja una vista en planta del cauce, en abscisas la anchura del mismo, señalando los puntos exactos donde se midió, y en ordenadas los vectores en m<sup>2</sup>/seg cuyas longitudes corresponden a la planimetría del punto anterior. Se traza la envolvente de todos estos vectores, planimetrando de nuevo. Esta planimetría, convertida a la escala del gráfico, ya es el caudal (en horizontal la anchura en metros, en vertical m<sup>2</sup>/seg: el producto en m<sup>3</sup>/seg).



(Ver un ejemplo detallado en el documento "Aforo con molinete"<sup>3</sup>)

## Aforos químicos

Su fundamento es el siguiente: Arrojamamos una sustancia de concentración conocida a un cauce, se diluye en la corriente, y aguas abajo tomamos muestras y las analizamos. Cuanto mayor sea el caudal, más diluidas estarán las muestras recogidas. La aplicación concreta de este principio se puede ejecutar con dos procedimientos distintos:

<sup>3</sup> [http://hidrologia.usal.es/practicas/molinete\\_metodo.pdf](http://hidrologia.usal.es/practicas/molinete_metodo.pdf)

## Aforos de vertido constante

A un cauce de caudal  $Q$  (que queremos medir) se añade un pequeño caudal continuo  $q$  de una disolución de concentración conocida  $C_1$ . Supongamos que el río ya tenía una concentración  $C_0$  de esa misma sustancia. Se cumplirá que:

$$Q + q = Q_2 \quad [1]$$

$$Q \cdot C_0 + q \cdot C_1 = C_2 \cdot Q_2 \quad [2]$$

Podemos suponer que  $Q_2$  es casi igual a  $Q$  (es decir que el caudal del río prácticamente no ha variado con el vertido  $q$ ). Haciendo  $Q_2 = Q$  y despejando resulta:

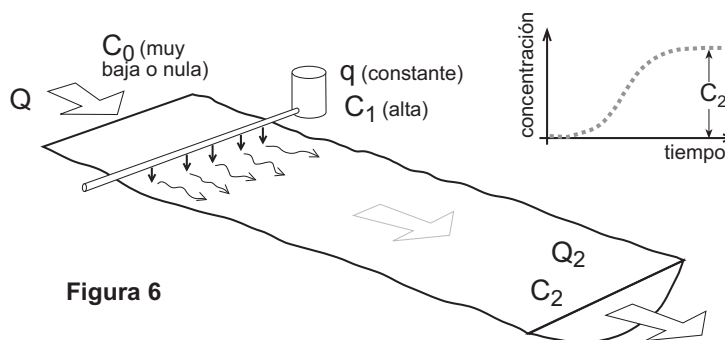
$$Q = q \frac{C_1}{C_2 - C_0} \quad [3]$$

Sin considerar la simplificación  $Q_2 = Q$  sustituimos  $Q_2$  de [1] en [2], y despejamos  $Q$ , obteniendo la siguiente expresión, que en la práctica proporciona un resultado casi idéntico al obtenido mediante [3]:

$$Q = q \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0} \quad [4]$$

Si se utiliza una sustancia no contenida previamente en el río:  $C_0 \approx 0$ , la ecuación [3] se simplifica así:

$$Q = q \frac{C_1}{C_2} \quad [5]$$



**Ejemplo:** Se vierte un caudal constante de 0,4 litros/seg con una concentración de 30 g/L y en la muestra recogida aguas abajo se registra una concentración de 3,1 mg/L. La concentración previa en el río de la sustancia vertida es de 0,5 mg/L.

Aplicando la fórmula [3] (convertimos los 30 g/L en 30000 mg/L):

$$Q = 0,4 \frac{30000}{3,1 - 0,5} = 4615 \text{ litros/seg} = 4,6 \text{ m}^3 / \text{seg}$$

Si aplicamos la fórmula exacta [4], obtenemos un resultado casi idéntico:

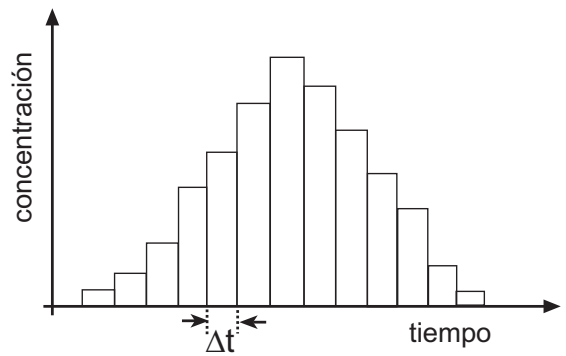
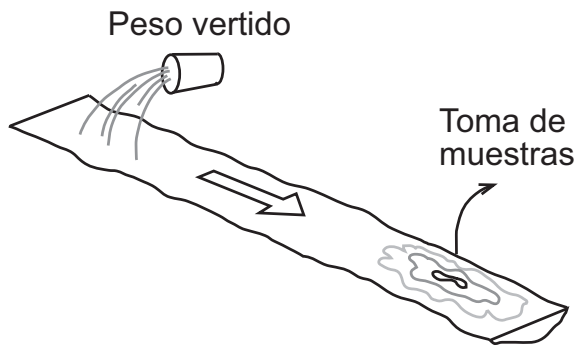
$$Q = 0,4 \frac{30000 - 3,1}{3,1 - 0,5} = 4614 \text{ litros/seg} = 4,6 \text{ m}^3 / \text{seg}$$

Si no hubiéramos tenido en cuenta la concentración previa del río ( $C_0 = 0,5$  mg/L), habríamos aplicado la expresión [5], con un error apreciable:

$$Q = 0,4 \frac{30000}{3,1} = 3870 \text{ litros/seg} = 3,87 \text{ m}^3 / \text{seg}$$

## Aforos de vertido único o de integración

Si no se dispone del equipo necesario para el vertido continuo o no es posible por otras razones, el vertido único de una sustancia al cauce es otra alternativa, aunque requiere una corriente turbulenta que asegure la mezcla del vertido con todo el caudal circulante hasta el punto de toma de muestras.



Se vierte un peso conocido; aguas abajo, y supuesta la homogeneización, se toman varias muestras a intervalos iguales de tiempo  $\Delta t$ , calculando previamente el principio y el final de la toma de muestras con un colorante. Las concentraciones en las  $n$  muestras tomadas serían  $C_1, C_2, \dots, C_n$ . El cálculo sería así:

$$\begin{aligned} \text{Peso vertido} &= \text{Peso que pasa en el } 1^{\text{er}} \Delta t + \text{Peso en el } 2^{\text{o}} \Delta t + \dots + \text{Peso en el último } \Delta t = \\ &= C_1 \cdot \text{Vol que pasa en el } 1^{\text{er}} \Delta t + C_2 \cdot \text{Vol en el } 2^{\text{o}} \Delta t + \dots + C_n \cdot \text{Vol en el último } \Delta t = \\ &= C_1 \cdot Q \cdot \Delta t + C_2 \cdot Q \cdot \Delta t + \dots + C_n \cdot Q \cdot \Delta t = \\ &= Q \cdot \Delta t \cdot (C_1 + C_2 + \dots + C_n) \end{aligned}$$

Despejando  $Q$ , resulta:

$$Q = \frac{\text{Peso vertido}}{\Delta t \cdot (C_1 + C_2 + \dots + C_n)} \quad [6]$$

En lo anterior hemos supuesto que el río no contenía la sustancia vertida. Si, por el contrario, la concentración previa en el cauce es  $C_0$ , y no es despreciable, y  $C_1, C_2$ , etc. son las concentraciones recogidas agua abajo, la expresión que utilizaríamos para el cálculo sería:

$$Q = \frac{\text{Peso vertido}}{\Delta t \cdot [(C_1 - C_0) + (C_2 - C_0) + \dots + (C_n - C_0)]} \quad [7]$$

## Aforos indirectos

### Escalas limnimétricas

Se trata de escalas graduadas en centímetros y firmemente sujetas en el suelo, a veces adosadas al pilar de un puente. En cauces muy abiertos puede ser necesario instalar varias escalas de manera que el final de una corresponda al comienzo de la siguiente (Figura 8). Es necesario que un operario acuda cada día a tomar nota de la altura del agua.

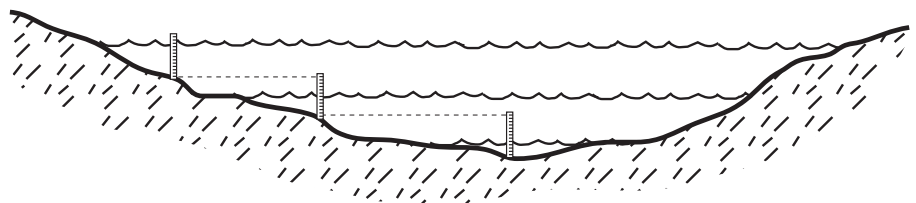


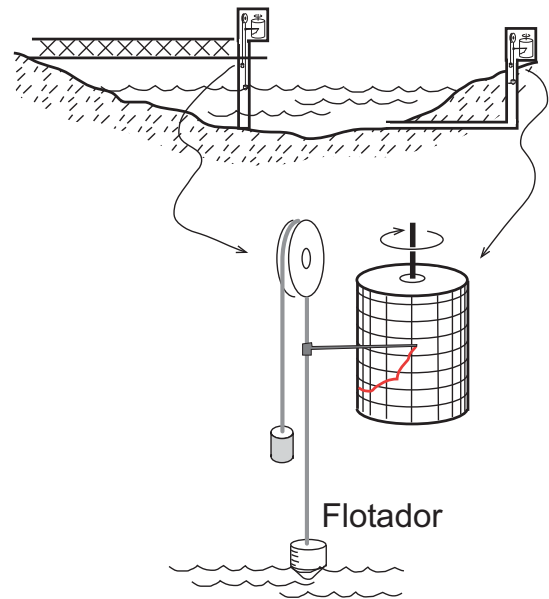
Fig. 8.- Escalas limnimétricas escalonadas

## Limnógrafos

Miden el nivel guardando un registro gráfico o digital del mismo a lo largo del tiempo. El gráfico que proporcionan (altura del agua en función del tiempo) se denomina **limnigrama**. No solamente evitan la presencia diaria de un operario, sino que permiten apreciar la evolución del caudal de un modo continuo.

El modelo clásico funciona con un flotador que, después de disminuir la amplitud de sus oscilaciones mediante unos engranajes, hace subir y bajar una plumilla sobre un tambor giratorio. En la figura se muestran dos posibles accesos al centro del cauce: aéreo o subterráneo

Los equipos más modernos almacenan los niveles del flotador digitalmente, para después leerlos en un ordenador, o bien los envían instantáneamente al organismo de control. Otro tipo de dispositivos sin ninguna pieza móvil se colocan en el fondo del cauce, miden la presión y la traducen a altura de columna de agua sobre él.



## Curva de gastos (*Rating curve*)

En cualquiera de los casos, el limnógrafo o la escala limnimétrica solamente miden el **nivel del agua**, necesitamos disponer de una relación que nos permita convertir el nivel en caudal. Para obtener esta relación para un punto concreto de un cauce, será necesario realizar numerosos aforos directos que nos proporcionen varias parejas de valores nivel-caudal; con ellas dibujaremos una curva, y si es posible obtener su ecuación, que reflejará la relación buscada.

En la figura 10 se muestran unos puntos de aforos directos sobre los que se ha realizado un ajuste polinómico y otro potencial. En este ejemplo, con cualquiera de las dos ecuaciones obtendremos el caudal a partir de un dato de nivel del agua en el cauce.

Esta relación hay que actualizarla periódicamente ya que la sección del cauce puede sufrir variaciones por erosión o por deposición de sedimentos.

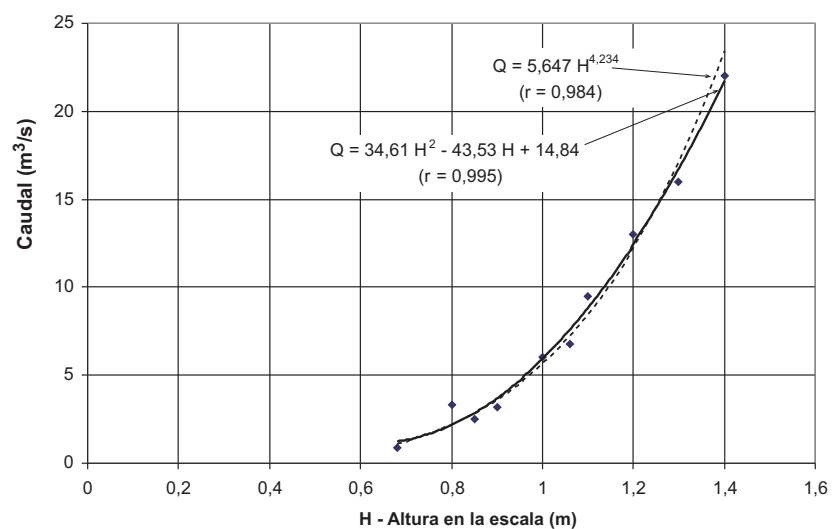


Fig. 10.- Curva de gastos (relación altura-caudal)

No en todos los puntos de un cauce el caudal es función solamente de la altura. Puede ser función de la altura y de la pendiente del agua. A veces es necesario instalar una presa o barrera para conseguir que sea sólo función de la altura.

## Aforadores de vertedero (*Weirs*)

Un vertedero es cualquier estructura transversal a la corriente que eleva el nivel aguas arriba y permite la circulación a través de una abertura de forma triangular, trapezoidal o rectangular (Figura 11<sup>4</sup>). La forma triangular es más sensible a la medida de caudales pequeños que ocuparán solamente el vértice el triángulo invertido.

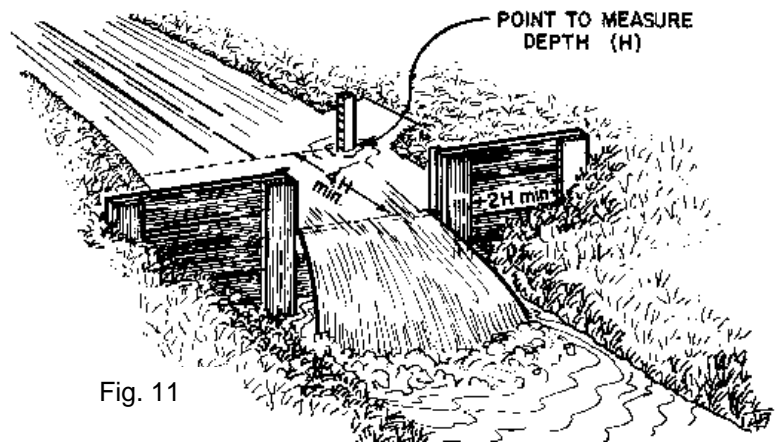
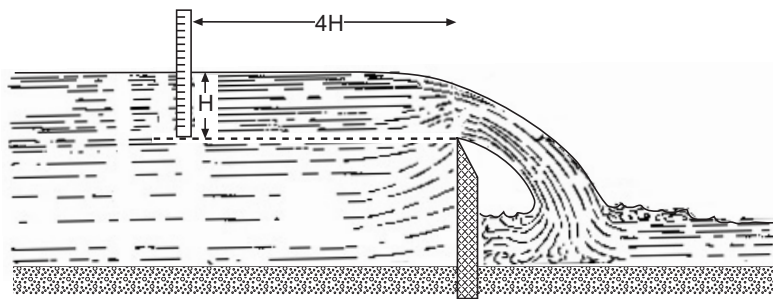


Fig. 11

En cauces pequeños a veces se realiza una instalación provisional con una placa de metal, plástico o de madera (figura 11), mientras que en otras ocasiones se trata de construcciones fijas y de mayores dimensiones.



Existen diversas fórmulas que relacionan la altura del agua con el caudal. Para el vertedero rectangular es muy utilizada la clásica fórmula de Francis (1883, en Kraatz, 1975, p.185):

$$Q = 1,84 (b - 0,2 H) \cdot H^{3/2} \quad [8]$$

Aunque es más exacto incluir un coeficiente para cada caso concreto, como en esta sencilla ecuación (Bansal, 2005):

$$Q = \frac{2}{3} C \cdot b \sqrt{2g} \cdot H^{3/2} \quad [9]$$

Para un vertedero triangular con el pico de la V a 90°, Bansal (op.cit.) propone<sup>5</sup>:

$$Q = \frac{8}{15} C \sqrt{2g} \cdot H^{5/2} \quad [10]$$

donde:  $Q$  = caudal ( $m^3/s$ )

$C$  = constante propia del vertedero; si no se conoce, aprox.: 0,60

$b$  = anchura de la abertura rectangular (metros)

<sup>4</sup> Esta figura procede de: Smajstrla, A.G. (1981).-*Weirs for Open-Channel Flow Measurement*, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida (<http://ufdc.ufl.edu/IR00001503/00001>), documento de tres páginas al que inexplicablemente le faltan las fórmulas.

<sup>5</sup> La expresión general para una V con un ángulo cualquiera  $\theta$ , es:  $Q = \frac{8}{15} C \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \sqrt{2g} \cdot H^{5/2}$

$g$  = aceleración de la gravedad ( $9,81 \text{ m}^2/\text{s}$ )

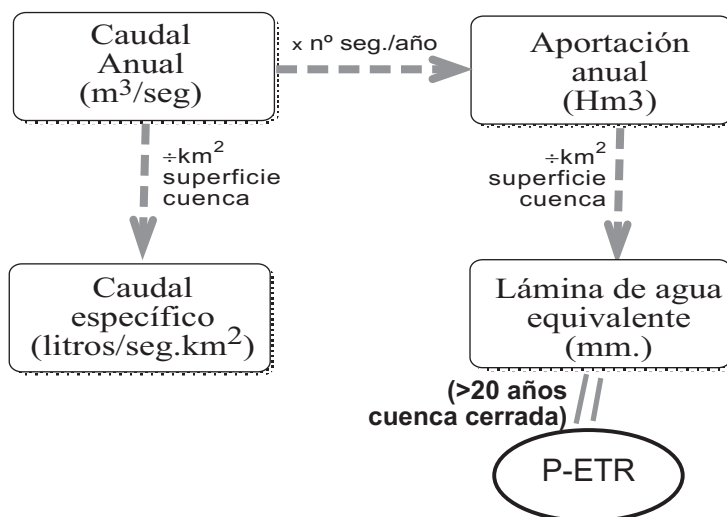
$H$  = altura del agua sobre la base de la abertura rectangular (metros)

## Presentación de los datos de aforos

Los datos de aforos pueden presentarse de los siguientes modos, según la utilización que se vaya a hacer de ellos:

- ◆ **Caudales** ( $\text{m}^3/\text{seg}$ ,  $\text{litros}/\text{seg}$ ), que, aunque se trata de un dato instantáneo, pueden referirse al valor medio de distintos periodos de tiempo:
  - **Caudales diarios.** Lectura diaria de una escala limnimétrica u ordenada media del gráfico diario de un limnígrafo.
  - **Caudales mensuales, mensuales medios.** Para un año concreto es la media de todos los días de ese mes. Para una serie de años se refiere a la media de todos los Octubres, Noviembre, etc. de la serie estudiada.
  - **Caudal anual, anual medio (módulo).** Para un año concreto es la media de todos los días de ese año, para una serie de años se refiere a la media de todos los años de la serie considerada.

- ◆ **Aportación**, normalmente referida a un año, **aportación anual**, aunque a veces la referimos a un mes, **aportación mensual**. Es el volumen de agua aportado por el cauce en el punto considerado durante un año o un mes ( $\text{Hm}^3$ ). Puede referirse a un año concreto o la media de una serie de años.



- ◆ **Caudal específico:** Caudal por unidad de superficie. Representa el caudal aportado por cada  $\text{km}^2$  de cuenca. Se calcula dividiendo el caudal (normalmente el caudal medio anual, en  $\text{m}^3/\text{seg}$ .) por la superficie de la cuenca considerada ( $\text{Litros}/\text{seg}/\text{km}^2$ ). Nos permite comparar el caudal de diversas cuencas, siendo sus superficies distintas. Las áreas de montaña proporcionan más de 20  $\text{litros}/\text{seg}/\text{km}^2$ , mientras que, en las partes bajas de la misma cuenca se generan solamente 4 ó 5  $\text{litros}/\text{seg}/\text{km}^2$
- ◆ **Lámina de agua equivalente.** Es el espesor de la lámina de agua que se obtendría repartiendo sobre toda la cuenca el volumen de la aportación anual (Unidades:  $\text{mm.}$ ). Se obtiene dividiendo la aportación anual por la superficie de la cuenca. Es útil especialmente cuando queremos comparar la escorrentía con las precipitaciones. Si la cuenca es hidrogeológicamente cerrada y los datos proceden de más de 20 años, este valor debe ser similar a las precipitaciones no evapotranspiradas (P-ETR).

La **Curva de Caudales Clasificados (CCC)** (en inglés *Flow Duration Curve, FDC*) representa los 365 caudales del año ordenados de mayor a menor. Nos permite conocer el número días al año que un río supera (o no alcanza) un caudal determinado.

En la figura 14 representamos los 365 caudales diarios del río Eresma en Olmedo, año 1996-97 ordenados de mayor a menor (de 107,2 a 0,48 m<sup>3</sup>/s):

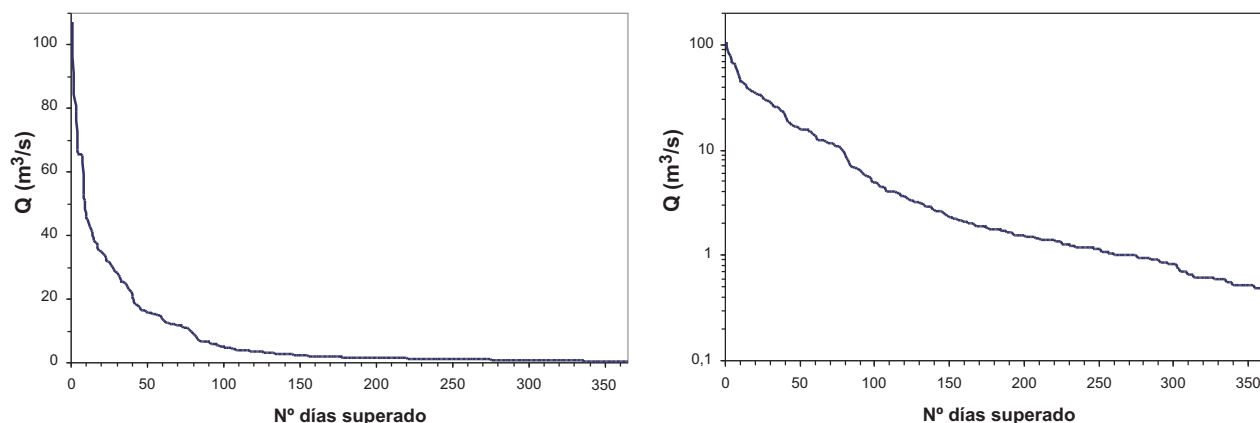


Figura 14.- Curva de Caudales Clasificados para el río Eresma en Olmedo, año 1996-97

A la izquierda ambos ejes son aritméticos, mientras que a la derecha los caudales están representados en escala logarítmica. En ambos se puede leer fácilmente qué caudal es superado durante 50 días al año, o inversamente cuántos días al año se supera un caudal de 20 m<sup>3</sup>/s.

### Curva de caudales clasificados para varios años<sup>6</sup>

Los gráficos anteriores son representativos solamente para ese año concreto. Si pretendemos mostrar el comportamiento del río, debemos considerar los caudales diarios de varios años. En la figura 15 se muestra la CCC para el río Eresma en Olmedo con datos de 29 años (10591 caudales diarios ordenados de mayor a menor).

La representación de la curva CCC es similar a la de un año individual, exceptuando que en el eje de abscisas en lugar de figurar los 365 días del año se expresa la probabilidad. El significado es el mismo: una probabilidad de 10% indica que ese caudal se superará 36 días al año. (Figura 15). Se utiliza la escala logarítmica en el eje vertical porque de otro modo la curva aparece aplastada contra ambos ejes.

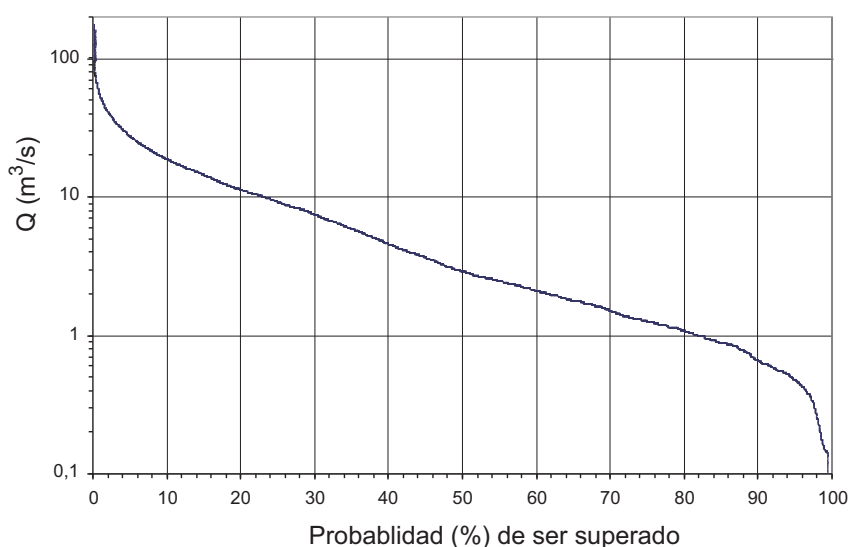


Figura 15.- Curva de Caudales Clasificados para el río Eresma en Olmedo, con datos diarios de 29 años

<sup>6</sup> Ver el documento *Curvas de Caudales Clasificados*