

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 4	39
MEDICION DE CAUDALES (AFOROS).....	39
4.1 INTRODUCCIÓN	39
4.2 PRESENTACIÓN DE LOS DATOS DE AFOROS.....	39
4.3 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS DE AFORO	40
4.4 MÉTODOS PARA MEDIR CAUDALES.....	41
4.5 MÉTODO VOLUMÉTRICO	41
4.6 MÉTODO ÁREA VELOCIDAD (FLOTADOR- MOLINETE)	42
a.) <i>Calculo del área</i>	42
b.) <i>Método 0.2 - 0.8,</i>	43
c.) <i>Calculo de Velocidad con flotadores</i>	43
d.) <i>Calculo de Velocidad con molinete o correntómetro</i>	44
4.7 MÉTODO DE DILUCIÓN CON TRAZADORES	45
a.) <i>Inyectar rápidamente un volumen de trazado (Inyección súbita)</i>	45
b.) <i>Inyección a caudal constante</i>	46
4.8 MÉTODO ÁREA-PENDIENTE	47
4.9 LIMNÍMETROS.....	50
4.10 CURVA DE DURACION DE CAUDAL	54
4.11 VERTEDEROS DE AFORO.....	56
4.11.1 <i>Ventajas y desventajas de los vertederos</i>	57
4.12 COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES	58
4.13 EJEMPLOS DE APLICACIÓN	59
4.14 EJERCICIOS PROPUESTOS	65
4.15 BIBLIOGRAFÍA	68

CAPÍTULO 4

MEDICION DE CAUDALES (AFOROS)

4.1 INTRODUCCIÓN

El régimen de caudales de una corriente de agua durante un período determinado, es el único término del balance hidrológico de una cuenca que puede ser medido directamente con una buena precisión. Los otros elementos de ese balance, como las precipitaciones, la evaporación, etc, no pueden ser sino estimados a partir de mediciones observadas en distintos puntos de la cuenca o deducidos de fórmulas hidrológicas, los cuales son siempre estimativos muy aproximados. El régimen de caudales es un dato básico, indispensable, para todos los diseños hidráulicos y para muchas obras civiles en los que ellos son parte importante como las carreteras, puentes, acueductos, presas, etc. El objeto de toda estación de aforo es poder establecer la curva de caudales contra el tiempo, así la instalación de muchas "estaciones de aforo" que permitan observar, en una serie de años tan larga, como sea posible, los caudales escurridos en puntos característicos del río principal y, si fuere oportuno, de sus diversos afluentes, es el principio de todo estudio hidráulico de una cuenca. Sin embargo en países como el nuestro las estaciones de aforo de caudales son inexistentes en muchos sitios, lo que ha obligado a recurrir a métodos aproximados para la estimación de los caudales de diseño, como son los métodos de regionalización. Sin embargo jamás debe olvidarse que ningún método por bueno que sea reemplaza la medida directa de la variable.

4.2 PRESENTACIÓN DE LOS DATOS DE AFOROS

Estos datos pueden presentarse como:

1. Caudales (m^3/seg , *litros/seg*), que, aunque se trata de un dato instantáneo, pueden referirse al valor medio de distintos periodos de tiempo:

Caudales diarios. Pueden corresponder a la lectura diaria de una escala limnimétrica o corresponder a la ordenada media del gráfico diario de un limnógrafo.

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.

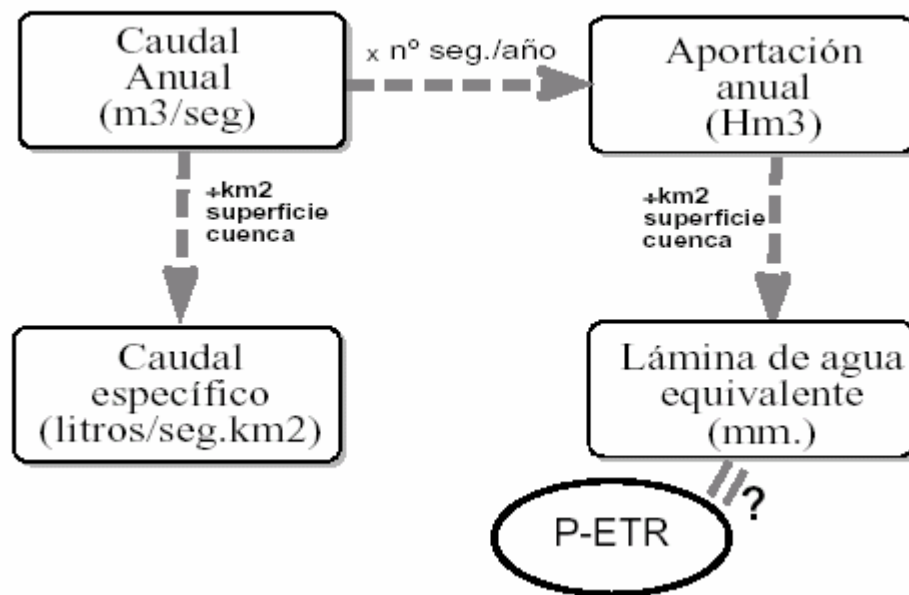
Caudal anual, anual medio (módulo). Para un año concreto es la media de todos los días de ese año, para una serie de años se refiere a la media de todos los años de la serie considerada.

2. 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 (Hm^3).

3. Caudal específico: Caudal por unidad de superficie. Representa el caudal aportado por cada km^2 de cuenca. Se calcula dividiendo el caudal (normalmente el caudal medio anual) por la superficie de la cuenca o subcuenca considerada ($litros/seg.km^2$). Nos permite comparar el caudal de diversas cuencas, siendo sus superficies distintas. Las áreas de montaña

proporcionan más de 20 litros/seg.km², mientras que, en las partes bajas de la misma cuenca se generan solamente 4 ó 5 litros/seg.km².

4. 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: milímetros o metros). Se obtiene dividiendo la aportación anual por la superficie de la cuenca. Es útil especialmente cuando queremos comparar la escorrentía con las precipitaciones.



4.3 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS DE AFORO

Supongamos que disponemos de n datos de caudales. Es deseable que sean más de 20, y es frecuente disponer de series históricas correspondientes a 30 ó 40 años. El tratamiento estadístico más común está encaminado a evaluar la probabilidad de que se presente en el futuro un caudal mayor o menor que un determinado valor, o (la operación inversa) evaluar qué caudal se superará un determinado % de los años, para tener presente la probabilidad de que se produzcan crecidas o estiajes de efectos no deseados. Por ejemplo: ¿Qué probabilidad hay de que la aportación anual del río supere los 900 Hm³? ¿Qué aportación se superará el 10% de los años? ¿Qué caudal medio mensual se superará el 75% de los meses de Octubre?

Hay que ordenar los datos disponibles (42 aportaciones anuales, 36 caudales mensuales de 36 meses de Octubre, etc.) de menor a mayor, olvidando su orden cronológico, y calcular para cada uno de ellos la probabilidad de que el caudal o aportación alcance ese valor. Así, si son 42 datos, la probabilidad de que se alcance el mayor será 1/42, la probabilidad de que se alcance o supere el 2º será de 2/42, y así sucesivamente¹. Si representamos en un gráfico en

¹ En realidad se divide por $(n+1)$, ya que dividiendo por n , al llegar al último, serían, por ejemplo 42/42 lo que hace que la probabilidad de que se alcance el caudal más pequeño es 1 (certeza absoluta). Eso es cierto para la muestra de 42 datos, pero en los años futuros puede presentarse uno menor. Por otra parte, el cálculo 1/42, 2/42, etc... en realidad son las frecuencias, no probabilidades. Hablamos de frecuencias si nos referimos a la muestra (en este ejemplo, 42 años), y de probabilidad si nos referimos a la población (en este caso: todos los años pasados y futuros)

un eje los datos de menor a mayor, y en el otro las probabilidades así calculadas obtendremos una curva que nos permitirá inferir gráficamente las cuestiones planteadas más arriba. Esto es sólo aproximado, para más exactitud hay que realizar el mismo proceso, pero ajustando los datos a una ley estadística. Los datos anuales suelen ajustarse a la ley normal o de Gauss, mientras que los datos extremos (los caudales máximos o mínimos de una serie de años) suelen ajustarse a la ley de Gumbel.

En cualquier caso, la probabilidad de que se alcance un determinado valor es el inverso de su **periodo de retorno**. Por ejemplo, si la probabilidad de que se alcance o supere un determinado caudal es del 5%, quiere decir que el 5% de los años el caudal será igual o mayor, el periodo de retorno de dicho caudal será de 20 años. Es decir, que si el caudal supera ese valor 5 años de cada 100, eso es igual que uno de cada 20 ($1/20=5/100$).

4.4 MÉTODOS PARA MEDIR CAUDALES

Entre los más conocidos tenemos los siguientes:

- Volumétrico.
- Método área velocidad.
- Dilución con trazadores.
- Método área pendiente.
- Limnímetros.
- Vertederos de aforo.

4.5 MÉTODO VOLUMÉTRICO

La forma más sencilla de calcular los caudales pequeños es la medición directa del tiempo que se tarda en llenar un recipiente de volumen conocido. La corriente se desvía hacia un canal o tubería que descarga en un recipiente adecuado y el tiempo que demora su llenado se mide por medio de un cronómetro. Para los caudales de más de 4 l/s, es adecuado un recipiente de 10 litros de capacidad que se llenará en segundos (Ver Figura 4.1). Para caudales mayores, un recipiente de 200 litros (Turriles) puede servir para corrientes de hasta 50 l/s.

El tiempo que se tarda en llenarlo se medirá con precisión, especialmente cuando sea de sólo unos pocos segundos. La variación entre diversas mediciones efectuadas sucesivamente dará una indicación de la precisión de los resultados.

Se deben realizar por lo menos 5 pruebas para obtener un caudal promedio. Nunca se debe llenar todo el turril, sólo hasta cierta altura, por lo que se deberá tener dentro del turril una escala que indique cual es el volumen. El proceso para calcular el caudal con este método es el siguiente:

Conocer el volumen del contenedor. [V]

Medir el tiempo de llenado. [t]

$$Q = \frac{V}{t} \quad (4-1)$$

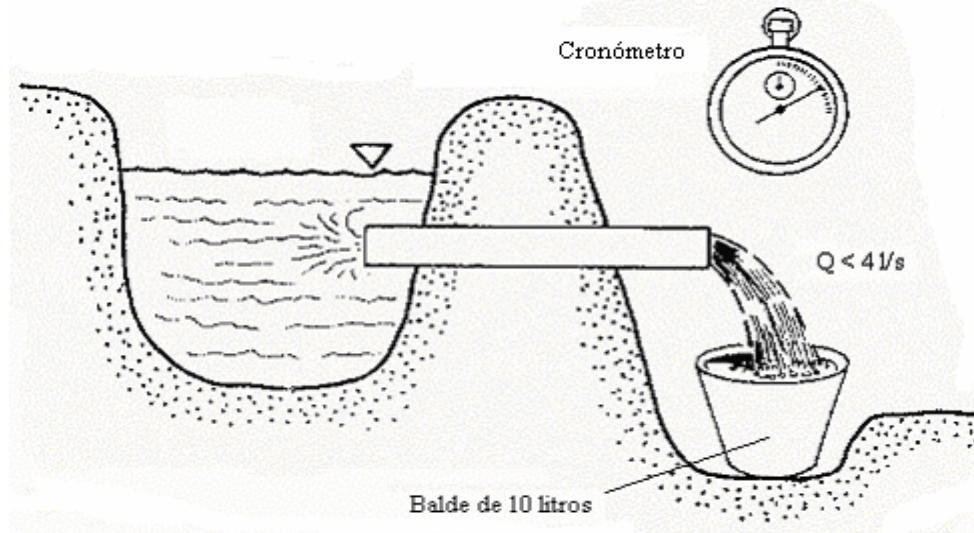


Figura 4.1 Método volumétrico para caudales menores a 4 lts/seg.

4.6 MÉTODO ÁREA VELOCIDAD (FLOTADOR- MOLINETE)

a.) Cálculo del área

Este método consiste básicamente en medir en un área transversal de la corriente, previamente determinada, las velocidades de flujo con las cuales se puede obtener luego el caudal. El lugar elegido para hacer el aforo o medición debe cumplir los siguientes requisitos:

La sección transversal debe estar bien definida y que en lo posible no se presente erosión o asentamientos en el lecho del río.

Debe tener fácil acceso.

Debe estar en un sitio recto, para evitar las sobre elevaciones y cambios en la profundidad producidos por curvas.

El sitio debe estar libre de efectos de controles aguas abajo, que puedan producir remansos que afecten luego los valores obtenidos con la curva de calibración.

Uno de los procedimientos más comunes empleados en este método es el descrito a continuación.

En el sitio que se decidió hacer el aforo, se hace un levantamiento topográfico completo de la sección transversal, el cual dependiendo de su ancho y profundidad, puede hacerse con una cinta métrica o con un equipo de topografía. La sección escogida se divide en tramos iguales tal como muestra la Figura 4.2. El ancho entre ellas no debe ser mayor que 1/15 a 1/20 del ancho total de la sección. El caudal que pasa por cada área de influencia A_i no debe ser mayor que el 10% del caudal total. La diferencia de velocidades entre verticales no debe sobrepasar un 20%. En cada vertical, de las varias en que se divide la sección, se miden velocidades con el molinete a 0.2, 0.6 y 0.8 de la profundidad total o con flotador. Cada vertical tiene su respectiva área de influencia (sombreado en la figura).

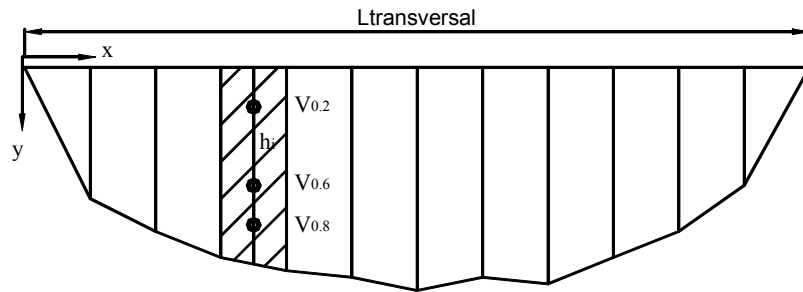


Figura 4.2 Sección transversal para el método área velocidad

b.) Método 0.2 - 0.8, consiste en medir la velocidad a 0.2 y 0.8 de profundidad a partir de la superficie, siendo V_m el promedio de ambas velocidades. Este método es el más usado en la práctica.

$$\bar{V}_i = \frac{V_{0.2} + V_{0.8}}{2} \quad (4-2)$$

La velocidad media siguiente se utiliza en corrientes turbulentas por irregularidad del lecho:

$$\bar{V}_i = \frac{V_{0.2} + V_{0.8} + V_{0.6}}{3} \quad (4-2.a)$$

y el caudal Q_i correspondiente a la respectiva área de influencia, A_i , es:

$$Q_i = \bar{V}_i * A_i \quad (4-3) \text{ (ecuación de continuidad).}$$

y el caudal total, Q_T , será entonces:

$$Q_T = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (4-4)$$

Cuando las profundidades de la sección son pequeñas, menores de 0.6 m, solo se mide la velocidad a 0.6 de la profundidad, velocidad que se considera representativa de la velocidad media de la vertical.

c.) Cálculo de Velocidad con flotadores

Son los más sencillos de realizar, pero también son los más imprecisos; por lo tanto, su uso queda limitado a situaciones donde no se requiera mayor precisión. Con este método se pretende conocer la velocidad media de la sección para ser multiplicada por el área, y conocer el caudal, según la ecuación de continuidad. (4-3)

Para la ejecución del aforo se procede de la siguiente forma. Se toma un trecho de la corriente de longitud L ; se mide el área A (como se indicó en los requisitos del método), de la sección, y se lanza un cuerpo que flote, aguas arriba del primer punto de control, y al paso del cuerpo por dicho punto se inicia la toma del tiempo que dura el viaje hasta el punto de control corriente abajo.

La velocidad superficial de la corriente, V_s , se toma igual a la velocidad del cuerpo flotante y se calcula mediante la relación entre el espacio recorrido L , y el tiempo de viaje t .

$$V_s = \frac{L}{t} \quad (4-5)$$

Se considera que la velocidad media de la corriente, V_m , es del orden de $0.75V_s$ a $0.90 V_s$, donde el valor mayor se aplica a las corrientes de aguas más profundas y rápidas (con velocidades mayores de 2 m/s). Habitualmente, se usa la siguiente ecuación para estimar la velocidad media de la corriente. $V_m = 0.85V_s$.

Si se divide el área de la sección transversal del flujo en varias secciones, de área A_i , para las cuales se miden velocidades superficiales, V_{si} , y se calculan velocidades medias, V_{mi} , el caudal total se podrá determinar como la sumatoria de los caudales parciales q_i , de la siguiente manera:

$$Q_T = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (4-6)$$

d.) Cálculo de Velocidad con molinete o correntómetro

El principio de la medición de velocidad con molinete es el siguiente: Supóngase un molinete puesto en un punto de una corriente que tiene una velocidad V . La longitud S , es el recorrido de una partícula fluida moviéndose a lo largo del contorno completo de la línea que determina una vuelta de la hélice. La situación es análoga al suponer quieta el agua y el molinete desplazándose a través de ésta con velocidad V . Para un desplazamiento S , la hélice también dará una vuelta.

Para un movimiento uniforme,

$$V = \frac{S}{t} \quad (4-7)$$

El espacio, S , recorrido por la hélice, o por la partícula líquida a través de ésta, se representa por el número de rotaciones, N , que da el molinete en t segundos.

Luego:

$$V = \frac{N}{t} \quad (4-8)$$

Como existen fricciones en las partes mecánicas del aparato, es necesario introducir un coeficiente de corrección, b .

Entonces

$$V = b * \frac{N}{t}$$

Donde $n = \frac{N}{t}$, que es la frecuencia de giro, se tiene: $V = b * n$

Con la sensibilidad del aparato se hace sentir a partir de determinada velocidad mínima, a , que en general, es del orden de 1 cm/s, por debajo de la cual el aparato no se mueve, la ecuación del aparato se transforma en:

$$V = a + b \cdot n$$

V : velocidad de la corriente (m/s)

n : número de revoluciones de la hélice en la unidad de tiempo (rad/s)

a : constante de paso hidráulico, obtenida experimentalmente en ensayos de arrastre (m).

b : constante que considera la inercia y la mínima velocidad para que la hélice se mueva (m/s).

Ecuación que corresponde a una línea recta. Los aparatos vienen con su respectiva ecuación de calibración, dependiendo del tipo de molinete y de la casa productora, o tabuladas las velocidades en función del número de revoluciones por minuto. Por ejemplo, para el correntómetro Prince's Electric Currentmeter No 17110B, Serial No 101-A, la ecuación de calibración para la velocidad, en m/s es:

$$V = 0.019 + 0.702 \cdot n \quad (4-9)$$

4.7 MÉTODO DE DILUCIÓN CON TRAZADORES

Esta técnica se usa en aquellas corrientes que presenten dificultades para la aplicación del método área velocidad o medidas con estructuras hidráulicas, como en corrientes muy anchas o en ríos torrenciales. Se puede implementar de dos maneras:

a.) Inyectar rápidamente un volumen de trazado (Inyección súbita)

Este método es llamado también método de integración. Supóngase que en una sección 1 de un río se adiciona un pequeño volumen de trazador (V_1) con una concentración alta C_1 . Si existe una concentración inicial, C_0 , en el río, el perfil de concentraciones se comporta con el tiempo de la siguiente manera:

Por continuidad se tiene:

$$V_1 C_1 = \int_{t_1}^{t_2} Q C_2 dt - \int_{t_1}^{t_2} Q C_0 dt$$

Donde Q es el caudal de la corriente que se desea conocer, resolviendo la ecuación para Q se tiene:

$$Q = \frac{V_1 C_1}{\int_{t_1}^{t_2} (C_2 - C_0) dt} \quad (4-10)$$

En donde el término $\int_{t_1}^{t_2} (C_2 - C_0) \cdot dt$, representa el área bajo la curva.

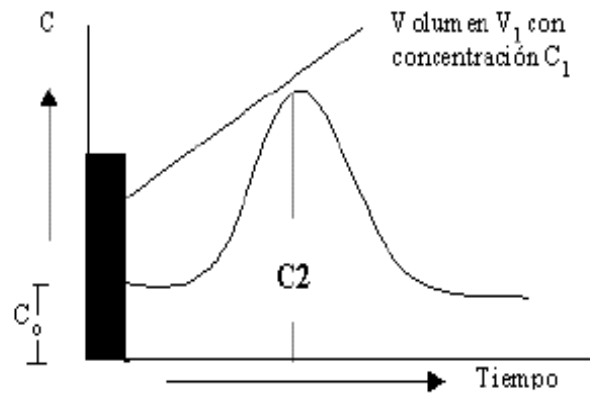


Figura 4.3 Inyección de un volumen conocido de trazador

b.) Inyección a caudal constante

Se inyecta un trazador en una sección dada a un caudal constante q_0 con una concentración de trazador C_1 , de la siguiente manera:

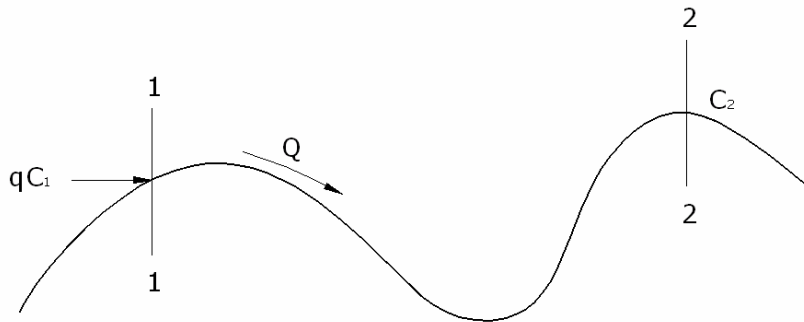


Figura 3.4 Inyección a caudal constante

Si se realiza un balance de masa de trazador entre el punto 1 y el punto 2 y suponiendo que la corriente lleva una concentración de trazador de C_0 se tiene:

$$QC_0 + qC_1 = (Q + q)C_2$$

Despejando el caudal Q :

$$Q = \frac{q(C_2 - C_1)}{(C_0 - C_2)} \quad (4-11)$$

Es importante anotar que para aplicar este método se supone que el flujo es permanente. Los trazadores deben tener las siguientes propiedades:

- No deben ser absorbidos por los sedimentos o vegetación, ni deben reaccionar químicamente.
- No deben ser tóxicos.

- Se deben detectar fácilmente en pequeñas concentraciones.
- No deben ser costosos

Los trazadores son de 3 tipos:

Químicos: de esta clase son la sal común y el dicromato de sodio.

Fluorescentes: como la rodamina.

Materiales radioactivos: los mas usados son el yodo 132, bromo 82, sodio.

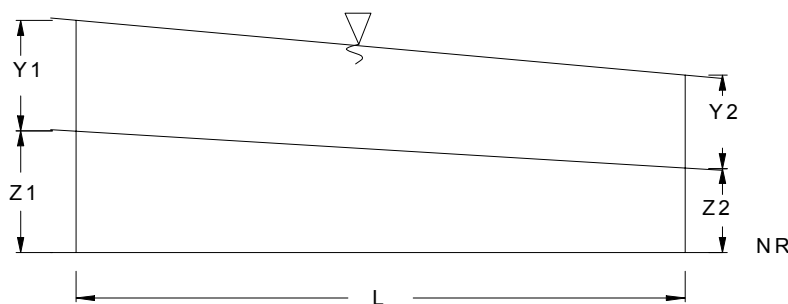
La sal común puede detectarse con un error del 1% para concentraciones de 10 ppm. El dicromato de sodio puede detectarse a concentraciones de 0,2 ppm y los trazadores fluorescentes con concentraciones de $1/10^{11}$. Los trazadores radioactivos se detectan en concentraciones muy bajas ($1/10^{14}$). Sin embargo su utilización requiere personal muy especializado.

La cantidad de trazador a dosificarse tiene relación con los siguientes factores:

- Nivel mínimo del método de detección.
- Dosificación continua o instantánea
- Tipo de reactor y grado de mezcla
- Duración de la prueba

4.8 MÉTODO ÁREA-PENDIENTE

A veces se presentan crecientes en sitios donde no existe ningún tipo de instrumentación y cuya estimación se requiere para el diseño de estructuras hidráulicas tales como puentes o canales. Las crecientes dejan huellas que permiten hacer una estimación aproximada del caudal determinando las propiedades geométricas de 2 secciones diferentes, separadas una distancia L y el coeficiente de rugosidad en el tramo. Supóngase que se tiene un tramo de río con profundidades Y_1 y Y_2 en las secciones 1 y 2 respectivamente, siendo NR el nivel de referencia:



Aplicando la ecuación de Bernoulli se tiene:

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = h_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (4-12)$$

Donde: $h = Y + Z$ y h_f son las pérdidas de energía que se pueden hallar usando la fórmula de Manning:

$$VA = Q = \frac{1}{n} R_H^{2/3} S_f^{1/2} \quad (4-13)$$

Donde:

V: velocidad en m/s.

R_H : radio hidráulico en m.

S_f : pendiente de la línea de energía.

A: área de la sección transversal en m^2 .

n: coeficiente de rugosidad de Manning.

La metodología que debe seguirse es la siguiente:

Asumir que $V_1 = V_2$ lo que implica que:

$$h_f = h_1 - h_2 \Rightarrow s_f = \frac{h_f}{L}$$

Si en la fórmula de Manning:

$$K = \frac{1}{n} R_H^{2/3} A \quad (4-14)$$

El caudal puede expresarse como:

$$Q = KS_f^{1/2}$$

Se encuentra un valor promedio de K para las dos secciones, el cual puede hallarse con la media geométrica así:

$$K = \sqrt{K_1 K_2} \quad (4-15)$$

Se calculan las cabezas de velocidad en cada sección usando el caudal, hallado con la expresión anterior ($V_1 = Q/A_1$; $V_2 = Q/A_2$).

Calcular un nuevo valor de h_f usando estas velocidades en la ecuación 3-12. Si se encuentra un valor de h_f igual al hallado en el primer paso, el problema está resuelto. Si no, se vuelve al paso 2 con el último valor de h_f hallado y se continúa hasta que dos cálculos sucesivos de las pérdidas hidráulicas difieran en muy poco. La mayor fuente de incertidumbre de este método es la estimación confiable del coeficiente de rugosidad de Manning, n. Sin embargo se puede definir una metodología para hallarlo a partir de datos tomados en el campo. Existen en la literatura numerosas expresiones que permiten estimar el coeficiente de rugosidad de Manning a partir de la granulometría del lecho y de las variables del flujo. Para cauces en lechos de grava, las expresiones que mejor se comportan² son:

² Posada, 1998

• Meyer - Peter & Muller, 1948 $n = 0.038 * D_{90}^{1/6}$ (4-16)

• Raudkivi, 1976 $n = 0.0411 * D_{65}^{1/6}$ (4-17)

• Simons y Senturk, 1976 $n = 0.0389 * D_{50}^{1/6}$ (4-18)

• Garde & Raju, 1978; Subramanya, 1982 $n = 0.047 * D_{50}^{1/6}$ (4-19)

• Bray, 1979 $n = 0.0593 * D_{50}^{0.179}$ (4-20)

* Cano, 1988. $\frac{1}{\sqrt{f}} = a \left[-\log(1.352a) + \log\left(\frac{4R}{K}\right) \right]$ (4-21)

$a = 5.7798K^{0.139633}$

$$n = \frac{R_H^{1/6}}{\sqrt{8 * g / f}} \quad (4-21.b)$$

En éstas ecuaciones D_{50} , D_{65} y D_{90} son diámetros característicos del material del lecho, hallados a partir de su curva granulométrica, R es el radio hidráulico y f es el factor de fricción de la ecuación de Darcy - Weisbach. La ecuación de Cano (1988) considera una altura de los elementos de rugosidad, k , variable según el material se encuentre en reposo o en movimiento, así:

Reposo, $k = 0.54 D_{50}$ para cascajos, piedras y rocas con diámetro medio mayor de 0.03 m; para tamaños menores, el coeficiente aumenta de 0.54 a 1.0.

Movimiento, $k = 0.56 D_{50}$, para tamaños medios del sedimento mayores de 0.03 m; el coeficiente aumenta de 0.56 a 0.78 para tamaños menores de 0.03 m.

Para determinar la curva granulométrica del material del lecho en una sección determinada se utilizan equipos apropiados para recoger muestras de arena o limos cuando el material del lecho esta constituido por material fino granular; si el material del lecho es grueso (tamaño mayor que la arena gruesa), se realiza el conteo aleatorio de granos según procedimiento ideado por Wolman (1954). Este procedimiento es el siguiente:

Seleccionada la sección en el cauce se determina el ancho B .

Se determina un área de ancho B a cada lado de la sección de aforo; en esta área se distribuye retícula o malla de un ancho tal que contenga al menos 70 interceptos. En cada intercepto se mide la cara expuesta mas larga del grano que allí se encuentre.

1. Los valores medidos se agrupan por rango de tamaños para con esto preparar la curva granulométrica del material. Los rangos puede definirse de la siguiente manera: sedimentos menores de 2 mm, entre 2 mm y 4 mm a 8 mm a 16 mm a 32 mm, de 32 mm a 64 mm, de 64 mm a 128 mm, etc. Adicionalmente se debe tomar una muestra de finos del fondo del cauce para realizar la curva granulométrica completa.

2. Se calculan los diferentes porcentajes de sedimentos. Estos valores se hallan a partir de curva granulométrica (D_{90} , D_{84} , D_{75} , D_{65} , D_{50} , D_s , D_{16} , etc.). Con muestreos realizados en numerosos ríos de Antioquia, Risaralda y el Quindío, se obtuvo la siguiente ecuación para calcular el coeficiente de rugosidad a partir del diámetro medio del material del lecho (Posada, 1998):

$$n = 0.0487 * D_{50}^{1/6} \quad (4-22)$$

Donde:

n : Coeficiente de rugosidad de Manning

D_{50} : Diámetro medio de las partículas en m.

4.9 LIMNÍMETROS

Este metodo consiste en medir la altura de la lamina de agua de una determinada seccion de canal para obtener el caudal que pasa por esta seccion con ayuda de una curva de gastos. La curva de gastos se determina experimentalmente por medidas repetidas de caudales y alturas en diversas condiciones. A partir de ella, basta con medir la altura para determinar el caudal, o lo que es lo mismo, basta con determinar la variación de la altura del agua con el tiempo, para obtener la variación de los caudales con el tiempo. Normalmente, la curva de gastos se obtiene mediante el dibujo de una curva suave que se ajuste lo mejor posible a los puntos obtenidos por los pares de valores (h_i , Q_i), pero también se puede hacer un ajuste estadístico para obtener la ecuación de la curva que normalmente es una parábola de segundo grado, del tipo:

$$Q = ah^2 + bh + c$$

En la que los parámetros a , b y c se obtienen por ajuste de mínimos cuadrados. Figura 4.5

Estas medidas(aforos) continuas permiten conocer las variaciones de caudal con el tiempo. Es más sencillo medir una variable que se relacione con el caudal, como es la altura de la lámina de agua. Se mide mediante: Escala limnimétrica o limnómetro y limnógrafo. Figura 4.5

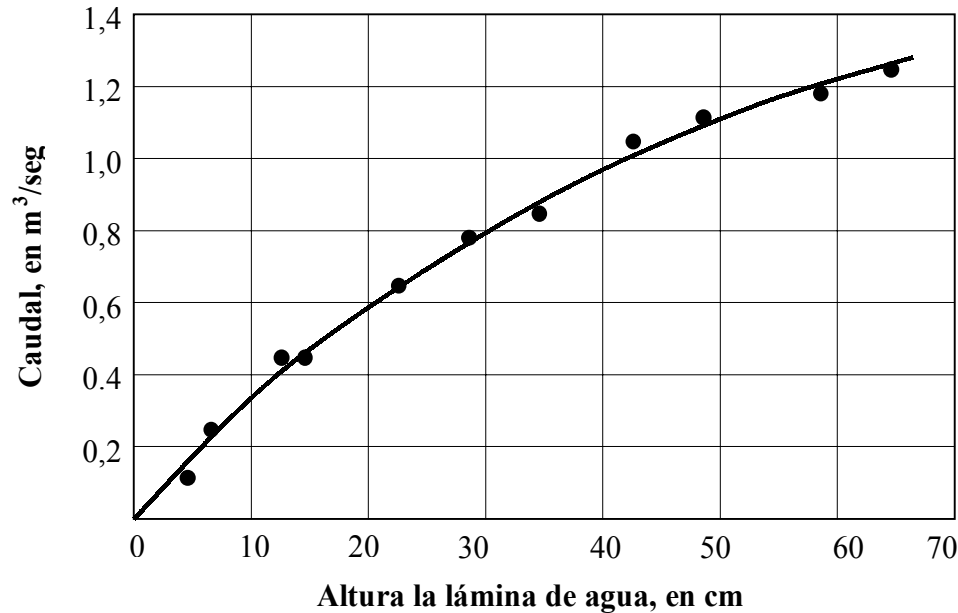


Figura 4.5 Curva de gastos $Q = f(h)$

El modo más simple de medir el nivel de un río es por medio de un limnómetro, o escala, dispuesta de forma que una porción de ella esté inmersa en el agua todo el tiempo. El limnómetro puede consistir en una sola escala vertical ligada a una pila de un puente, estribo u otra estructura que se prolongue en el lecho de aguas bajas de la corriente (Figura 4.6a). Si no existiese una estructura adecuada en un lugar accesible a todos los niveles, se puede emplear un limnómetro por secciones (Figura 4.6b). Se montan secciones cortas de jalón en las estructuras disponibles, o en apoyos especialmente contruidos, para que una sección quede siempre accesible. Una variante de la medición por secciones es el limnómetro inclinado (Figura 4.6c) que se coloca sobre el talud de la orilla de la corriente, graduado de forma, tal que su escala señale directamente profundidades verticales.

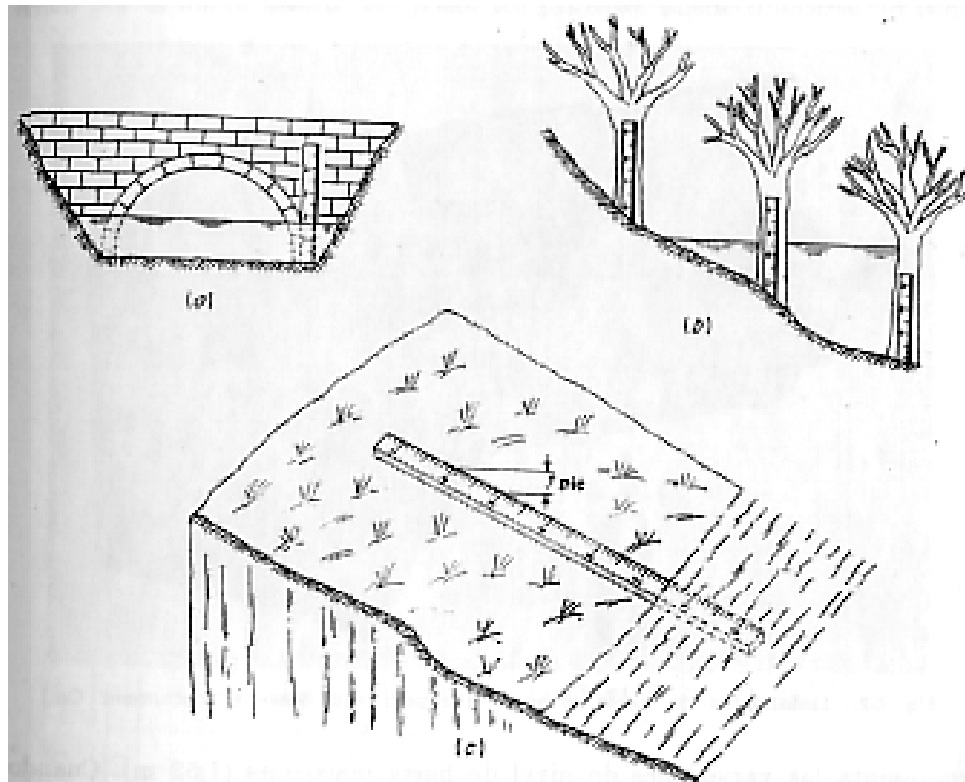


Figura 4.6 a) limnómetro vertical, b) limnómetro por secciones y c) limnómetro inclinado

La escala del limnómetro puede consistir en señales pintadas en una estructura existente o en un tablón de madera ligado a un apoyo. Las escalas pintadas están, generalmente, graduadas en centímetros. Las marcas se hacen, frecuentemente, según las normas empleadas en las miras taquimétricas. Cuando se desea obtener datos muy precisos de niveles se dispone de secciones metálicas esmaltadas graduadas en milímetros. Si una corriente acarrea gran cantidad de sedimentos finos o residuos industriales, las señales de la escala pueden quedar borradas rápidamente. En tal caso, puede ayudar un jalón con borde dentellado o con símbolos de marcas en relieve. De mucho más interés son los **limnógrafos**, que permiten obtener medidas continuas de la variación de la altura del agua y, por tanto, del caudal. Es decir, se obtiene una curva $h = f(t)$, que se denomina **limnigrama** (Figura 4.7), que no es más que el registro sobre un papel adosado a un tambor giratorio de una plumilla solidaria con un mecanismo sensible a las variaciones de nivel.

En los limnógrafos convencionales, la escala de tiempo es variable en función del mecanismo empleado pero normalmente la duración es de una semana, quince días o un mes. La curva del limnigrama, por sí misma, no da información cuantitativa sobre la variación de caudales si no se coteja con la curva de gastos. La curva resultante $Q = f(t)$ que representa la variación de los caudales con el tiempo se denomina **hidrograma**.

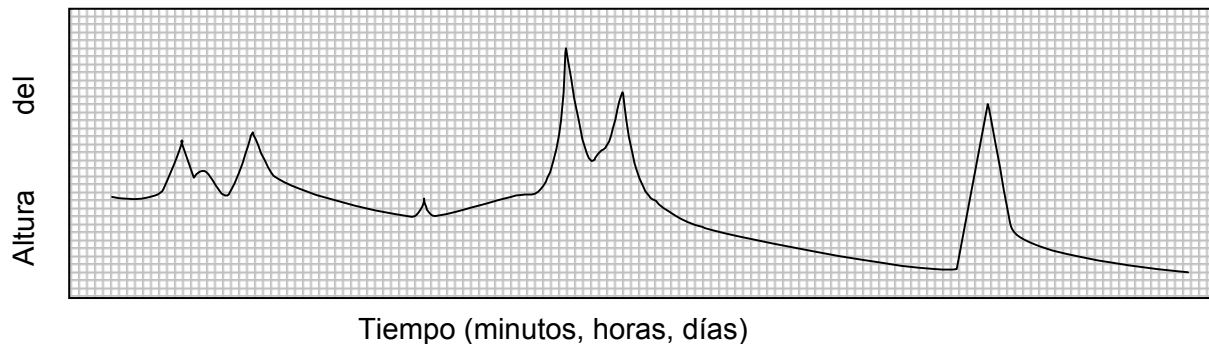


Figura 4.7. Ejemplo de limnigrama

Para el diseño de estructuras hidráulicas y en general obras relacionadas con el agua se trabaja con una serie de términos relacionados con el caudal que es necesario conocer. Los principales son:

Caudal medio diario: es la tasa promedio de descarga en m^3/s para un período de 24 horas. Si se dispone de limnógrafo (dispositivo que permite el registro continuo de los niveles en el tiempo) se puede obtener la hidrógrafa así:

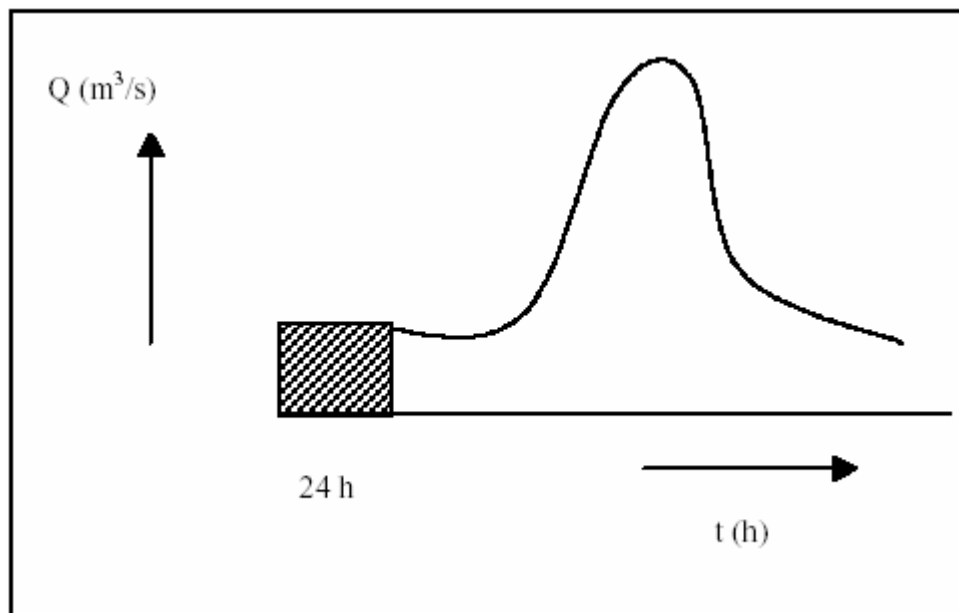


Figura 4.8 Caudal Promedio diario

El área sombreada representa un volumen de agua en 24 horas. Este volumen se divide por el tiempo en segundos y se obtiene el caudal promedio diario. Si no se tiene limnógrafo, para hallar el caudal promedio diario, es necesario hallar los caudales correspondientes al menos a 3 lecturas de mira diarias y luego promediarlos.

Caudal medio mensual Q_m . Se calcula hallando para cada mes la media aritmética de los caudales promedios diarios.

Caudal promedio mensual interanual. Es la media de los caudales medios mensuales para un mes dado durante un período de n años.

Caudal medio anual. Es la media de los caudales promedios diarios durante un año.

Caudal máximo instantáneo anual. Es el máximo caudal que se presenta en un año determinado. Para su determinación es necesario que la estación de aforo tenga limnógrafo. Si no es así se habla de **caudal máximo promedio anual** el cual es menor que el máximo instantáneo anual.

Caudal mínimo anual. Es el menor caudal que se presenta durante un año determinado.

4.10 CURVA DE DURACION DE CAUDAL

La curva de duración es un procedimiento gráfico para el análisis de la frecuencia de los datos de caudales y representa la frecuencia acumulada de ocurrencia de un caudal determinado. Es una gráfica que tiene el caudal, Q , como ordenada y el número de días del año (generalmente expresados en % de tiempo) en que ese caudal, Q , es excedido o igualado, como abscisa. La ordenada Q para cualquier porcentaje de probabilidad, representa la magnitud del flujo en un año promedio, que espera que sea excedido o igualado un porcentaje, P , del tiempo.

Los datos de caudal medio anual, mensual o diario se pueden usar para construir la curva. Los caudales se disponen en orden descendente, usando intervalos de clase si el número de valores es muy grande. Si N es el número de datos, la probabilidad de excedencia, P , de cualquier descarga (o valor de clase), Q , es:

$$P = \frac{m}{N} \cdot 100 \quad (4-23)$$

Siendo m el número de veces que se presenta en ese tiempo el caudal. Si se dibuja el caudal contra el porcentaje de tiempo en que éste es excedido o igualado se tiene una gráfica como la mostrada en la figura 4.9

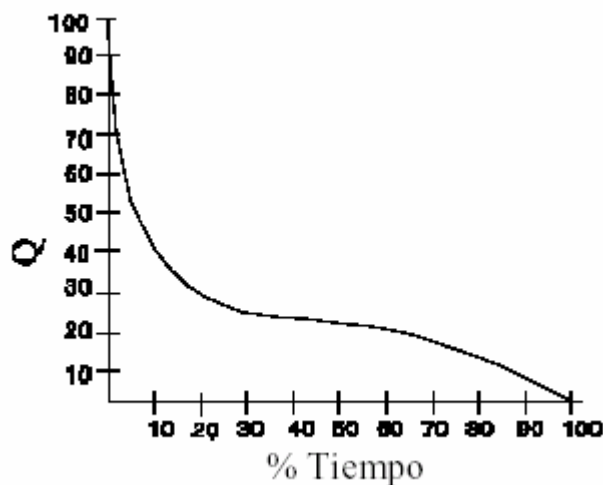


Figura 4.9 Curva de Duración

Las siguientes características de la curva de duración son de interés desde el punto de vista hidrológico:

La pendiente depende del tipo de datos. Por ejemplo caudales diarios producen una curva más pendiente que una calculada con caudales mensuales, debido a que los picos se suavizan con registros mensuales.

La presencia de un embalse modifica la naturaleza de la curva de duración, ver Figura 4.10.

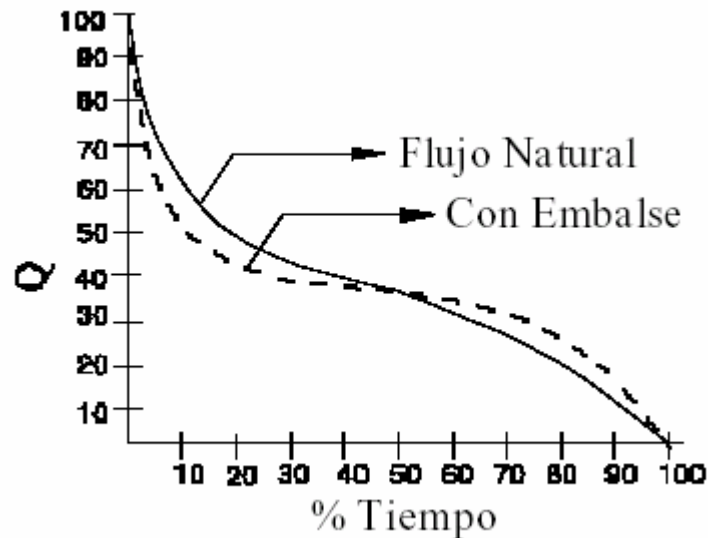


Figura 4.10 Curva de duración influenciada por un embalse

Cuando se dibuja en papel logarítmico la curva de duración se obtiene una línea recta, al menos en la región central. De esta propiedad se obtienen varios coeficientes que expresan la variabilidad del flujo en el río y que pueden usarse para describir y comparar varias corrientes.

Pendientes altas en la curva de duración dibujada en papel log-log, indican caudales muy variables. Pendientes bajas indican respuestas lentas a la lluvia y variaciones pequeñas del caudal. Una curva suave en la parte superior es típica de un río con grandes planicies de inundación.

Las curvas de duración se usan en la planeación de recursos hidráulicos, para evaluar el potencial hidroeléctrico de un río, para estudios de control de inundaciones, en el diseño de sistemas de drenaje, para calcular las cargas de sedimento y para comparar cuencas cuando se desea trasladar registros de caudal.

Por medio de esta curva se definen los siguientes caudales característicos:

- **Caudal característico máximo:** Caudal rebasado 10 días al año.
- **Caudal característico de sequía:** Caudal rebasado 355 días al año.
- **Caudal de aguas bajas:** caudal excedido 275 días al año o el 75 % del tiempo.
- **Caudal medio anual:** es la altura de un rectángulo de área equivalente al área bajo la curva de duración.

Existen muchos ríos del país que no tienen registros de caudal, siendo imposible obtener entonces la curva de duración. Sin embargo si se construye una curva de duración regional, que represente el comportamiento de una zona hidrológicamente homogénea, es posible hallar caudales de diseño en regiones donde se tenga poca o ninguna información.

El método para hallar esta curva regional, es comparar gráficamente las diferentes curvas de duración, existentes en la zona, adimensionalizadas por el caudal promedio diario correspondiente.

La adimensionalización se hace mediante la siguiente expresión:

$$Z = \frac{Q}{Q_{medio}} \quad (4-24)$$

Donde:

Z: Caudal adimensional

Q: Caudal registrado

Q_{medio} : Caudal promedio diario multianual. De esta forma se obtiene una serie cuyo valor esperado es la unidad y su desviación típica es equivalente al coeficiente de variación de la serie de caudales originales.

4.11 VERTEDEROS DE AFORO

Un vertedero consiste de una barrera vertical delgada con una cresta afilada que se pone en un arroyo, canal, o en un tubo parcialmente lleno. La Figura 4.11 muestra un perfil de un vertedero de cresta afilada e indica la nomenclatura apropiada. Tres tipos comunes de vertederos con una cresta afilada se muestran en la Figura 4.12. Esta Figura ilustra la diferencia entre los vertederos rectangulares sin contracciones, así como también ilustra los vertederos Cipolletti (trapezoidal) y de aforo en V (triangular).

Para determinar el flujo, es necesario medir la carga hidráulica del agua arriba de la cresta del vertedero. Para medidas precisas del flujo, la cresta debe de estar limpia, afilada, y nivelada. El borde de la cresta no debe de ser más grueso que 1/8 de pulgada. El flujo sobre el vertedero es directamente proporcional a la altura del agua (tirante) sobre la cresta a un punto aguas arriba del vertedero donde la superficie de la agua está a nivel. Para calcular la descarga sobre un vertedero, el tirante debe de ser medido por medio de un dispositivo colocado aguas arriba del vertedero, a una distancia de por lo menos 4 veces la medida aproximada del tirante. Una medida se puede tomar en la cresta del vertedero para aproximar la carga. Sin embargo, si esta medida se usa para calcular la descarga, este índice proveerá solamente una estimación de la descarga. Por lo tanto, cuando se evalúa el cumplimiento con límites basados en masa, es esencial que se use un método más refinado para determinar el flujo.

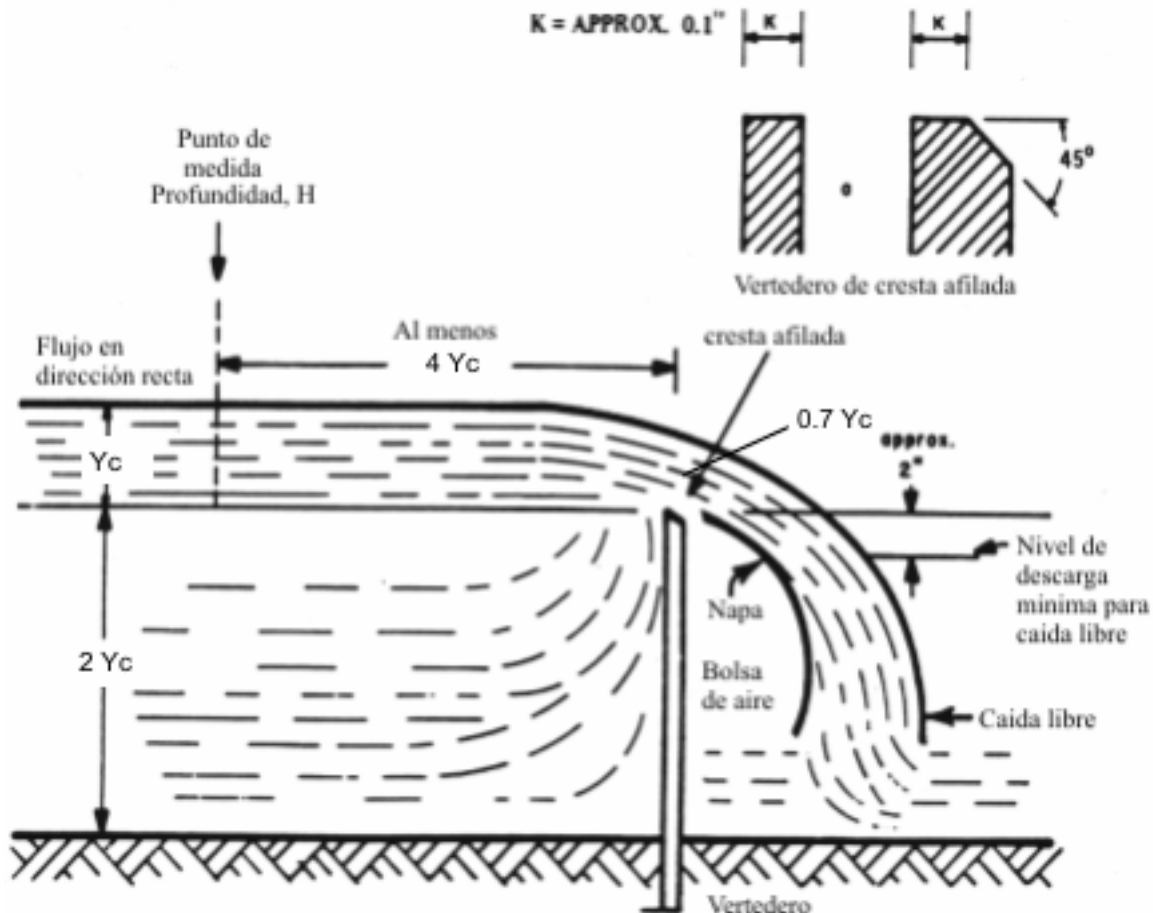


Figura 4.11 Perfil y nomenclatura de un vertedero de aforo

Fuente: Manual de Inspección y Cumplimiento de la NPDES, EPA, Mayo 1988

Las formulas que relacionan la carga y la descarga de los vertederos rectangulares no sumergidos con y sin contracciones, vertederos Cipolletti, y vertederos de aforo en V de 90°, se proveen en la Tabla 1 del anexo 4.1. La ecuación para el flujo para el vertedero de aforo en V de 90-grados (cuando la carga se mide en la cresta del vertedero) se incluye en la Tabla 2 del anexo 3.1. El flujo para vertederos de aforo en V de 60 y de 90-grados se puede determinar usando el nomograma de la figura a) del anexo 4.2. El flujo mínimo y máximo recomendado para el vertedero Cipolletti se provee en la Tabla 4.5. La Figura b) del anexo 4.2 es un nomograma para el flujo de los vertederos rectangulares que usan las fórmulas de Francis.

4.11.1 Ventajas y desventajas de los vertederos

El uso de vertederos como aforadores de agua ofrece las siguientes ventajas:

- Exactitud
- Simplicidad y sencillez de construcción
- No se obstruyen con cuerpos flotantes
- Duración

Entre las desventajas podemos anotar:

- Necesidad de saltos grandes de aguas, con la consiguiente pérdida de altura, lo que hace que su empleo en terrenos nivelados sea casi impracticable.
- Acumulación de grava, arena y limos aguas arriba del vertedero, lo que resta exactitud a las mediciones y obliga a una continua limpieza y manutención.

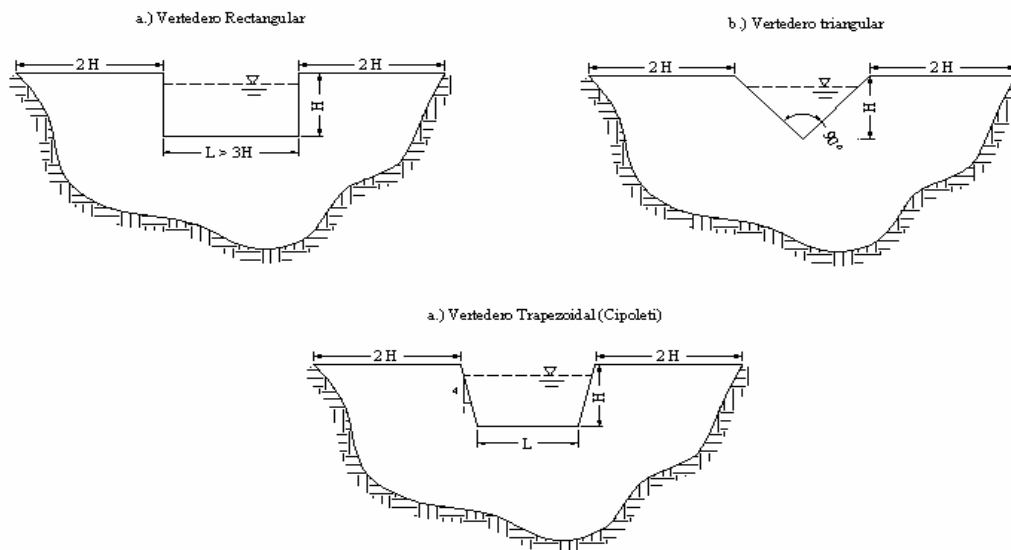


Figura 4.12 Vertederos de aforo

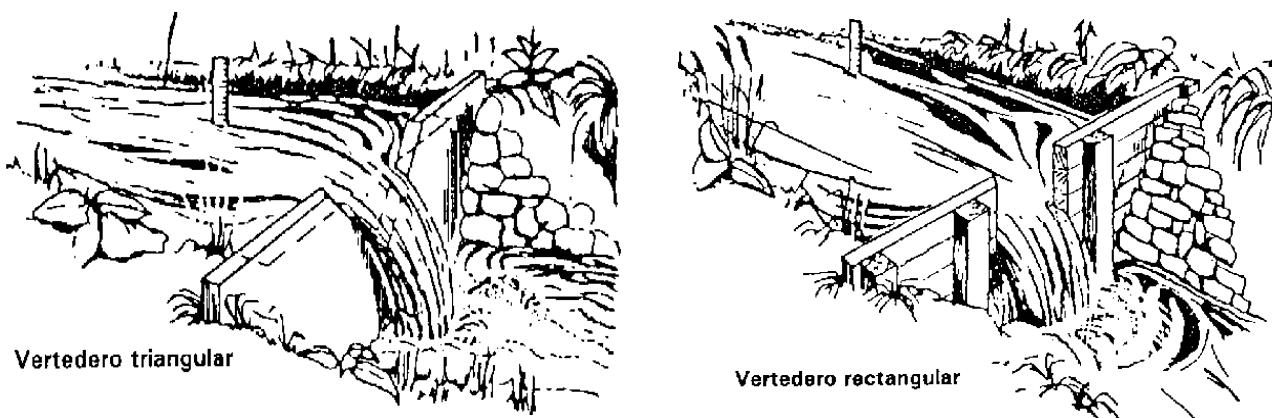


Figura 4.13 Vertederos con escotaduras rectangular y triangular

4.12 COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES

El método de los flotadores es el más impreciso, pero es el más sencillo para tener una idea de mostrar un caudal cualquiera.

Los métodos químicos están de acuerdo al aparato (su tecnología) con el que se esta midiendo, estos pueden dar hasta 3 ó 4 decimales. Se debe buscar la mayor turbulencia. No se recomienda usar trazadote en ríos que no sean de montaña. Pero si se pueden usar en plantas

de tratamiento, tanto de agua potable (ya que en un sector se crea resalto para que se mezcle), como de aguas residuales servidas, en este caso utilizar trazador Rodamina B. En 10 días mueren los microorganismos por lo que se debería conocer el tiempo en que las aguas son tratadas.

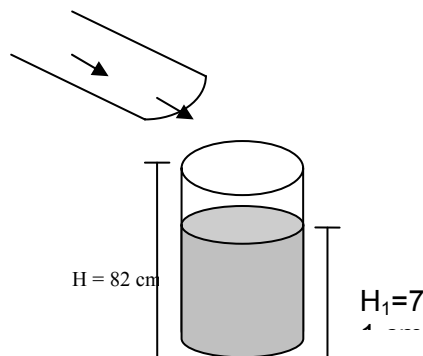
El molinete, puede ser el más exacto siempre y cuando se realice adecuadamente. Se debe registrar la hora y el nivel a la que se hace el aforo por que existen variaciones, el aforo puede ser por badeo (donde hay que verificar la verticalidad exacta) y aforo por cable. Cada molinete y cada hélice tienen diferente cartilla donde varía la curva e incluso el número de revoluciones por minuto. Los molinetes tienen aceite por dentro, el que si no es cambiado, gira con mayor dificultad, proporcionando datos erróneos.

Cuando el vertedero es bien calibrado, es el método más exacto y preciso, pero de manera permanente se deben realizar las mediciones.

4.13 EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Ejemplo 1.-

Se tiene un turril de 200 lts, con una altura de 82 cm., utilizado para la medición del caudal. Se construye una canaleta para conducir el caudal hasta el turril, con la ayuda de un cronómetro se mide el tiempo de llenado, que es igual a 3.6 seg. La altura de llenado en el turril es de 71 cm. Calcular el caudal.



Datos:

Volumen del turril	$V = 200 \text{ lts.} = 0.2 \text{ m}^3$
Altura total del turril	$H = 82 \text{ cm.} = 0.82 \text{ m}$
Altura de llenado	$H_1 = 71 \text{ cm.} = 0.71 \text{ m}$
Tiempo de llenado	$t = 3.6 \text{ seg.}$ (Para una altura de 71 cm.)

Solución:

Para poder calcular el caudal, se requiere conocer los datos de volumen y tiempo. En este problema el turril es llenado parcialmente en un tiempo conocido de 3.6 seg. Dicho volumen de llenado puede ser determinado, conociendo el diámetro del turril.

$$V_{Turril} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H$$

Despejando el diámetro: $D = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot H}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.2}{\pi \cdot 0.82}} = 0.557m$

Conocidos los valores de D y H₁, se procede a calcular el Volumen de llenado V₁:

$$V_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H_1 = \frac{\pi \cdot 0.557^2}{4} \cdot 0.71 = 0.173m^3 = 173lts$$

Para calcular el caudal, reemplazar los valores de V₁ (Volumen de llenado) y tiempo de llenado (t), en la fórmula siguiente:

$$Q = \frac{V_1}{t} = \frac{173}{3.6} = 48.1 \left[\frac{lts}{seg} \right]$$

Ejemplo 2.-

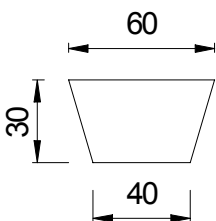
Calcular el caudal que pasa por la sección trapezoidal que se muestra en la Figura, utilizando el Método del Flotador, cuyo largo del canal 10 metros, tiempo de recorrido sobre el canal 20 seg. Y un porcentaje de eficiencia del 85%

a) Cálculo de la velocidad

Largo sección canal = 10 metros.

Tiempo en recorrerla = 20 segundos.

$$\text{Velocidad} = \frac{10}{20} = 0,5 \text{ m/s}$$



Figura

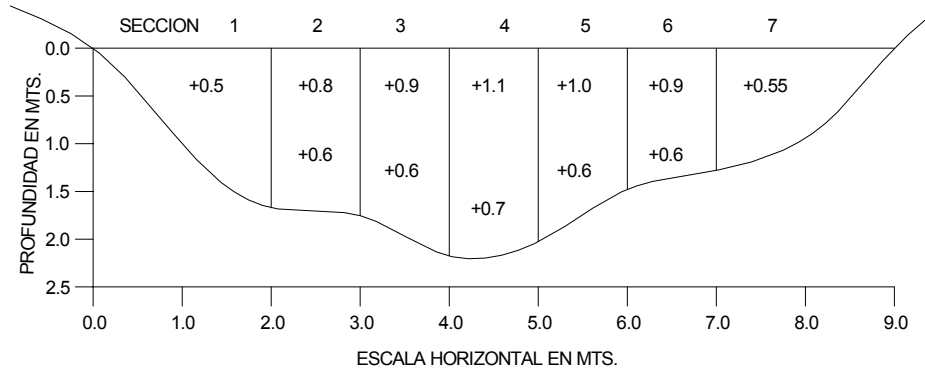
b) Cálculo del área (ver Figura)

$$A = \frac{(0,60 + 0,40)}{2} \cdot 0,30 = 0,15 \text{ m}^2$$

- c) Cálculo del caudal
 $Q = 0,15 * 0,5 * 1000 * .85 = 63,75 \text{ l/s.}$

Ejemplo 3.-

Cálculo del caudal de una corriente a partir de las mediciones efectuadas con un molinete. Los cálculos correspondientes a este ejemplo figuran en el Cuadro a continuación



Cálculo del caudal a partir de las lecturas en el molinete

1	2	3	4	5	6	7	8
Sección	Velocidad de flujo (m/s)			Profundidad (m)	Ancho (m)	Área (m²) 5x6	Caudal (m³/s) 4x7
	0,2D	0,8D	Media				
1	-	-	0,5	1,3	2,0	2,6	1,30
2	0,8	0,6	0,7	1,7	1,0	1,7	1,19
3	0,9	0,6	0,75	2,0	1,0	2,0	1,50
4	1,1	0,7	0,9	2,2	1,0	2,2	1,98
5	1,0	0,6	0,8	1,8	1,0	1,8	1,44
6	0,9	0,6	0,75	1,4	1,0	1,4	1,05
7	-	-	0,55	0,7	2,0	1,4	0,77
TOTAL							9,23

D es la profundidad de la corriente en el punto medio de cada sección.

Columna 1: Es la sección tomada para el cálculo.

Columna 2: Es la velocidad de flujo medida a 0.2 D

Columna 3: Es la velocidad de flujo medida a 0.3 D

Columna 4: Velocidad media

Columna 5: Profundidad del lecho

Columna 6: Ancho del segmento

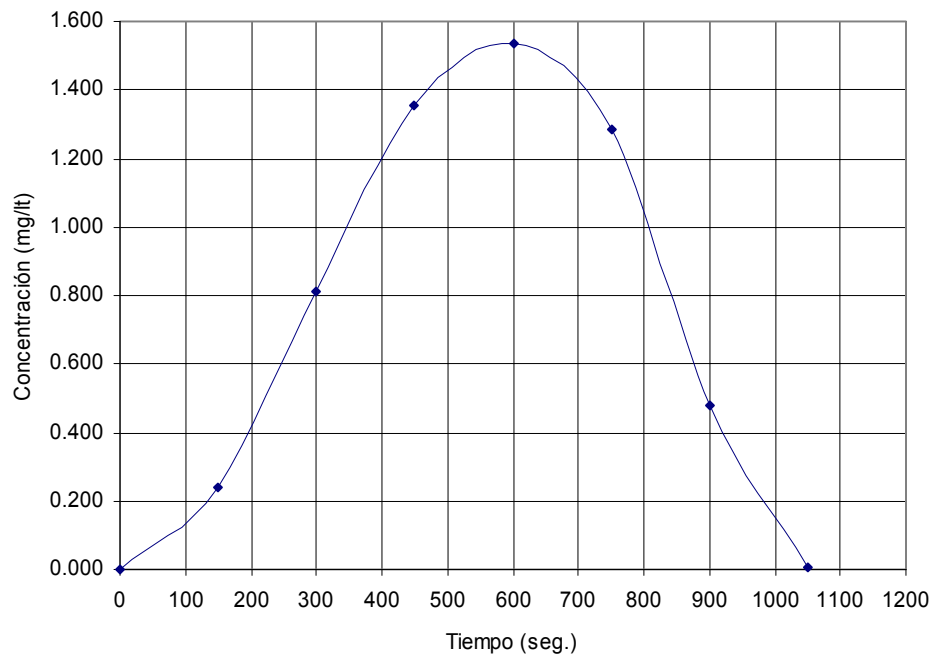
Columna 7: Área de la porción del canal.

Columna 8: caudal de esa área.

Ejemplo 4 (Inyección Súbita).-

En un río se ha seleccionado una sección adecuada para verter trazadores. Para el trazador de 15 litros de Cloruro de Litio en solución (85 g/l) se indica que las concentraciones existentes en el río son de 0.002 mg/lt. Calcular el caudal del río en base a los siguientes datos:

Tiempo (Seg.)	Concentración (mg./lt)
0	0.002
150	0.239
300	0.811
450	1.354
600	1.537
750	1.283
900	0.477
1050	0.003



Curva de concentración vs. Tiempo

Recuerde que algunos trazadores, como el cloruro de Litio, son absorbidos (de 5 a 10 %) por el lecho del río.

Solución:

Concentración inicial (medida en el río): $C_0 = 0.002 \text{ mg/lt}$

Concentración del trazador: $C_1 = 85 \text{ g/lit}$
 Volumen Vertido: $V_1 = 15 \text{ lit.}$

Procedimiento

Según la ecuación (3.8):

$$Q = \frac{V_1 C_1}{\int_{t_1}^{t_2} (C_2 - C_0) dt}; \quad Q = \frac{15 * 85000}{\int_{t_1}^{t_2} (C_2 - 0.002) \cdot dt};$$

En donde $\int_{t_1}^{t_2} (C_2 - C_0) \cdot dt$, representa el área bajo la curva.

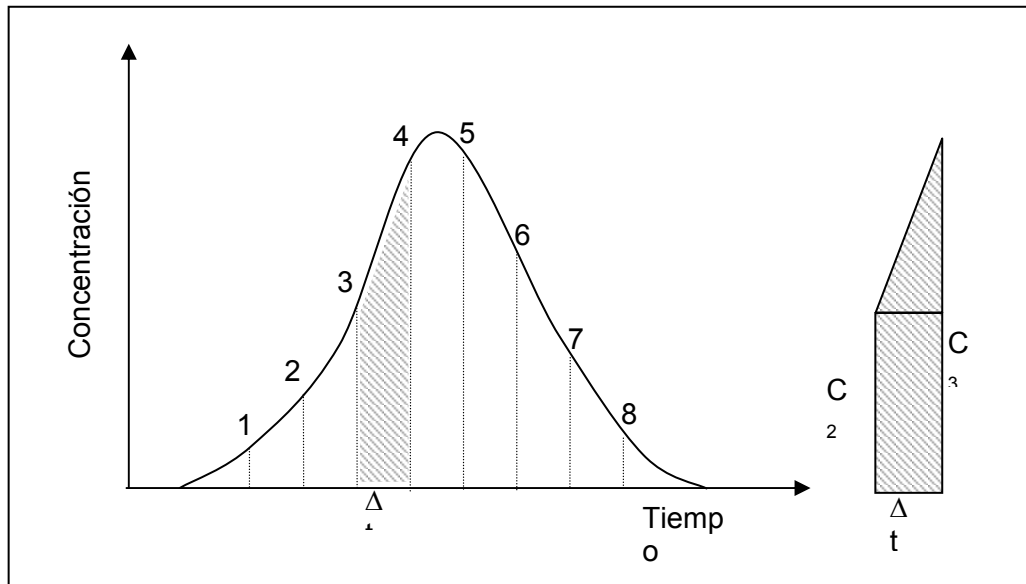
Tiempo (Seg.)	C_2 (mg./lt)	$C_2 - C_0$ (mg/lt)
0	0.002	0
150	0.239	0.237
300	0.811	0.809
450	1.354	1.352
600	1.537	1.535
750	1.283	1.281
900	0.477	0.475
1050	0.003	0.001

Debido a la absorción de trazador por el lecho del río:

Para 10 %: $C_1 = 85000 - 85000 * 0.1 = 76500 \text{ mg/lit}$

$$Area = \frac{150}{2} \cdot (0 + 0.001 + 2 \cdot (0.237 + 0.809 + 1.352 + 1.535 + 1.281 + 0.475)) = 853.43$$

Al área calculada esta en base al siguiente esquema:



Por lo tanto, $Q = \frac{76500 \cdot 15}{853.43} = 1344.57 \left[\frac{lbs}{seg} \right] = 1.34 \left[\frac{m^3}{seg} \right]$

Para 5 %: $C_1 = 85000 - 85000 \cdot 0.05 = 80750 \text{ mg/lit}$

De la misma manera, $Q = \frac{80750 \cdot 15}{853.43} = 1419.27 \left[\frac{lbs}{seg} \right] = 1.42 \left[\frac{m^3}{seg} \right]$

Considerando el porcentaje de absorción, se concluye que:

$$1.34 \left[\frac{m^3}{seg} \right] \leq Q \leq 1.42 \left[\frac{m^3}{seg} \right]$$

Ejemplo 5.-

Durante una creciente las profundidades del agua en un canal rectangular de 10 m de ancho, fueron 3 y 2,9 m en dos secciones apartadas 200 m. La pendiente del canal es 0,0001. Si $n = 0,025$ estimar el caudal. Recordar que el radio hidráulico R_H es el área, A , sobre el perímetro mojado, P .

Solución:

La geometría de las dos secciones es la siguiente:

$Y_1 = 3 \text{ m}$	$Y_2 = 2.9 \text{ m}$
$A_1 = 30 \text{ m}^2$	$A_2 = 29 \text{ m}^2$
$P_1 = 16 \text{ m}$	$P_2 = 15.8 \text{ m}$
$R_{H1} = 1.875 \text{ m}$	$R_{H2} = 1.875 \text{ m}$

$$K_1 = \frac{1}{0.025} \times 30 \times (1.875)^{2/3}$$

$$= 1824.7$$

$$K_2 = \frac{1}{0.025} \times 29 \times (1.835)^{2/3}$$

$$= 1738.7$$

Despreciando las velocidades se tiene:

$$h_f = (3 - 2.9) + (s_o \times 200) = 0.12$$

Donde:

So: pendiente del canal.

| K es calculado de la siguiente manera:

$$K = \sqrt{k_1 K_2} = 1781.2$$

Se inician los cálculos con $h_f = 0.12$ y se elabora la siguiente tabla:

Nº Iterac.	h_f m	$Sf \times 10^4$	Q (m ³ /s)	$V_1^2/2g$ m	$V_2^2/2g$ m	h_f m
1	0.12	6	43.63	0.1078	0.1154	0.1124
2	0.1124	5.615	42.21	0.1009	0.1080	0.1129
3	0.1129	5.645	43.32	0.1019	0.1085	0.1129

El valor de h_f se halla en la última columna con la ecuación 4-12 y con este valor se empieza la próxima iteración. El caudal es entonces 43.32 m³/s.

4.14 EJERCICIOS PROPUESTOS

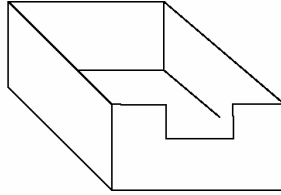
4.1 Calcular el caudal total, que pasa por una sección de río dadas las siguientes tablas:

Distancia (m) desde el este de la sección	Profundidad (m)
0	0
0,7	0,57
1,4	0,88
2,1	0,94
2,8	0,87
3,5	0,55
4,1	0

Distancia (m) desde el este de la sección	Profundidad (m) a la que ha sido media la velocidad	Velocidad del flujo (m/s)
0,35	0,17	0,23
1,05	0,44	0,52
1,75	0,55	0,66
2,45	0,54	0,64
3,15	0,43	0,55
3,75	0,17	0,21

- 4.2** Una solución de sal común con una concentración de 200 g/l fue descargada en un río con un caudal constante de 25 l/s. El río tenía inicialmente una concentración de sal de 10 ppm. Aguas abajo se midió una concentración de 45 ppm. Cuál es el caudal en el río?
- 4.3** Un laboratorio pretende probar en campo un molinete que nueva creación, en base a comparaciones con otros métodos de aforo. La primera prueba se la hace en un río en la parte media obteniendo un caudal de 0.75 m/s. la segunda prueba se la hace en base a limnómetros existentes en la sección, obteniendo un caudal de 0.4 m/s para un área mojada de 0.72 m. También se utiliza el molinete que se pretende calibrar obteniendo en la primera sección un número de revoluciones de la hélice igual a 0.4 Rad. /s. y en la segunda sección 0.765 Rad. /s. se desea obtener los coeficientes de calibración del molinete utilizando una ecuación lineal de la siguiente forma: $V = a + b \cdot n$
- 4.4** Dadas las profundidades de agua en un canal rectangular de 7,00 m de ancho, fueron 1,8 y 1,4 m en dos secciones apartadas 35 m, durante una crecida. La pendiente del canal es 0,00010. Donde el lecho del río tiene un tamaño de partículas de D_{50} igual 0,025 m. estimar el caudal mediante el método de Área- Pendiente empleando las formulas del coeficiente de Manning dados para el tamaño de partícula dado.
- 4.5** Durante una creciente las profundidades del agua en un canal rectangular de 10 m de ancho, fueron 2,7 y 2,5 m en dos secciones apartadas 50 m. La pendiente del canal es 0,00015. Si $n = 0,025$ estimar el caudal.
- 4.6** Calcular el caudal, en litros por segundo, que circula a través de un vertedero rectangular con dos contracciones, que tiene las siguientes dimensiones:
- Longitud de la cresta = 0,75 m
 Altura o carga de agua = 20 cm
- Nota: Considerar una velocidad de aproximación de 1.5 m/s
- 4.7** Un reservorio de concreto con paredes verticales tiene un área en planta de 56000 m². La descarga del reservorio toma lugar a través de un vertedero rectangular. En época de lluvias, el agua fluye del reservorio con un caudal de 9 m³/s. Encuentre a.) La longitud del vertedero requerida si la carga sobre el mismo no debe de exceder de 0.6

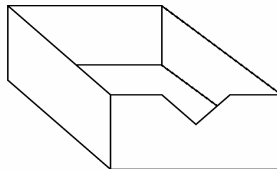
m; b) el tiempo necesario para que la carga baje de 60 cm a 30 cm si el flujo es interrumpido.



Nota: La ecuación general de descarga en vertederos en término del cambio de carga hidráulica es:

$$Q \cdot \partial t = -A \cdot \partial h$$

- 4.8** Dimensionar un vertedero rectangular si este será construido en un riachuelo en el cuál el flujo normalmente es de 200 lts/seg. Si el máximo caudal, como ocurre en el pequeño río, es 5 veces el flujo normal entonces determine la longitud del vertedero necesaria para limitar el crecimiento del tirante a 38.4 cm (1.26 pies) por encima del flujo normal.
- 4.9** Un tanque de sección de 16m por 6m en planta contiene agua, la cual fluye a través de un vertedero triangular, como se muestra en la figura. Determine el tiempo tomado por la carga, medida desde la parte más baja del vertedero, para bajar de una altura de 15 cm. a 7.5 cm. cuando el flujo es interrumpido



Nota: Utilizar la siguiente ecuación para la descarga (en m³/s) en este vertedero:

$$Q = 1.44 \cdot H^{5/2}$$

- 4.10** Un canal conduce 300 l/s de agua, en la salida se encuentra un vertedero triangular de aforo de 90°. ¿A que distancia por encima del fondo del canal debe de ser colocado dicho vertedero de manera que la profundidad en el canal sea de 1.30 m? ¿Con el vertedero en esta posición cuál es la profundidad del agua en el canal, cuando el caudal es de 200 lts/seg? La ecuación de descarga para dicho vertedero, en unidades del SI, es:

$$Q = 1.37 \cdot H^{5/2}$$

4.15 BIBLIOGRAFÍA

- Liotta Mario. “Medición del caudal del agua de riego”. Hoja informativa para el sector agropecuario, serie “Recursos Naturales” N°1. San Juan, Argentina. Abril de 2002
- Vélez Otalvaro María Victoria, “Análisis de caudales” (capítulo 7). Universidad Nacional de Colombia. Postgrado en Recursos Hidráulicos. Año 2003
- Vínculo en Internet: <http://poseidon.unalmed.edu.co/PARH/Materias/hidrologia/mariav/lecturas.html>
- Sánchez San Román Javier F. “Hidrología Superficial I - Medidas y tratamiento de los datos”. Universidad de Salamanca. España. Año 2003.
- Vínculo en Internet: <http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/T050.pdf>
- U.S. Bureau of Reclamation. “Water Measurement Manual”. 3rd edition, Revised 2001.
- Vínculo en Internet: http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/pubs/wmm/index.htm
- N.W. Hudson. “Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía. (Boletín de Suelos de la FAO - 68)”. FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, 1997
- Vínculo en Internet: <http://www.fao.org/docrep/T0848S/t0848s00.htm#Contents>
- Rocha Juan Carlos, “Obras Hidráulicas I”. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia. Año 2001.