HIDROMETRÍA

HIDROMETRÍA

La Hidrometría es el área de la Hidráulica Aplicada que tiene por función el estudio de las técnicas de la medición de caudales que circulan por las distintas secciones de los conductos, sean estos a presión o a gravedad. Su nombre deriva del griego hydro (agua) y metron (medida).

> La hidrometría es una de las partes más importantes de la hidráulica, justamente porque ella se ocupa de cuestiones tales como, medidas de tirantes, de variación del nivel del agua, de las secciones de escurrimiento, de las presiones de las velocidades, de los caudales o descargas, ensayos de bombas, turbinas, etc.
>
> Las determinaciones de caudal se realizan para diversos fines. Sistemas de abastecimiento de agua, estudios de desagües, instalaciones hidroeléctricas, obras de riego, defensa contra inundaciones, etc.

Además de medir la cantidad de agua que circula por la sección de un río, tubería o canal, también se ocupa de procesar la información, con el fin de conocer la disponibilidad del recurso.

MÉTODOS DE MEDICIÓN DE CAUDALES

Los Métodos de Medición de Caudales se pueden agrupar en:

A- Según los Parámetros a Medir

B- Según el Tipo de Escurrimiento en el cual se mide.

Los Parámetros pueden ser Volumen, Tiempo, Velocidad, Sección, Profundidad, Concentraciones de Colorantes, Sales o Isótopos Radiactivos, entre otros.

Según los Parámetros a Medir se acostumbra, a su vez, a clasificarlos en:

A.1- Directos

A.2- Indirectos.

Según el Tipo de Escurrimiento en el cual se mide, se clasifican en Métodos para Mediciones en Escurrimientos de los tipos:

B.1- a Presión,

B.2- Mixtos

B.3- a Gravedad

A- MÉTODOSDE MEDICIÓN DE CAUDALES SEGÚN PARÁMETROS A MEDIR

A.1- MÉTODOS DIRECTOS

Son aquellos que utilizan algún instrumento o procedimiento que permite medir directamente el caudal. En Técnicas de Laboratorio e Industrias se llaman así a los que miden tiempo en llenar un volumen conocido. En Técnicas de Campo se denominan como Directos los que miden velocidad discreta con Correntómetro.

Consisten en la medición directa en un recipiente de un volumen conocido. Se mide el tiempo, obteniéndose

$$Q = \frac{\text{Vol.}}{t}.$$

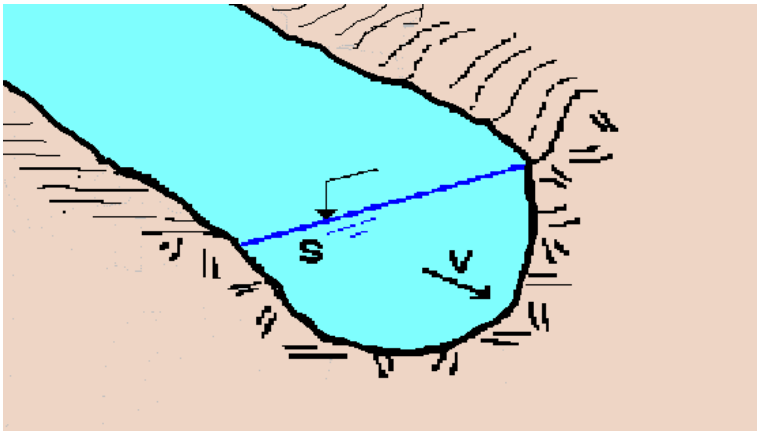
Cuanto mayor es el tiempo de determinación, tanto mayor es la precisión.

Este proceso, generalmente sólo es aplicable en los casos de pequeñas descargas, como por ejemplo, de fuentes, riachuelos, manantiales y tuberías de pequeño diámetro.

En los laboratorios de hidráulica, la medición directa de los caudales puede ser hecha en un tanque o depósito de dimensiones conocidas. Se puede además emplear una balanza (medida por el peso).

A.2- MÉTODOS INDIRECTOS

Son aquellos que realizan la medición de distintos parámetros a partir de los cuales se puede obtener indirectamente el caudal.



Por ejemplo, en el caso de una corriente de agua natural (río, arroyo), el caudal depende directamente de la superficie (S) de la sección transversal de la corriente de agua y de la velocidad media del agua (V), obteniéndose el caudal o gasto (Q) por medio de la multiplicación de ambos parámetros: $Q = V_x S$

B- SEGÚN EL TIPO DE ESCURRIMIENTO EN EL CUAL SE MIDE

Como referimos precedentemente, estas mediciones se pueden hacer en distintos tipos de escurrimientos, a saber:

B.1- Escurrimientos a Presión, caso de las Tuberías a Presión, Impulsiones, etc.

B.2- Escurrimientos Mixtos, caso de salida de Depósitos por Orificios, Compuertas, Tubos, etc.

B.3- Escurrimientos a Superficie Libre, caso de Canales, Ríos, Tuberías Cloacales y Pluviales, etc.

B.1- MEDICIÓN DE CAUDALES EN ESCURRIMIENTOS A PRESIÓN

Se puede realizar mediante una gran cantidad de elementos, refiriéndose a continuación los de utilización mas generalizada.

B.1.1- MEDIDORES DIFERENCIALES

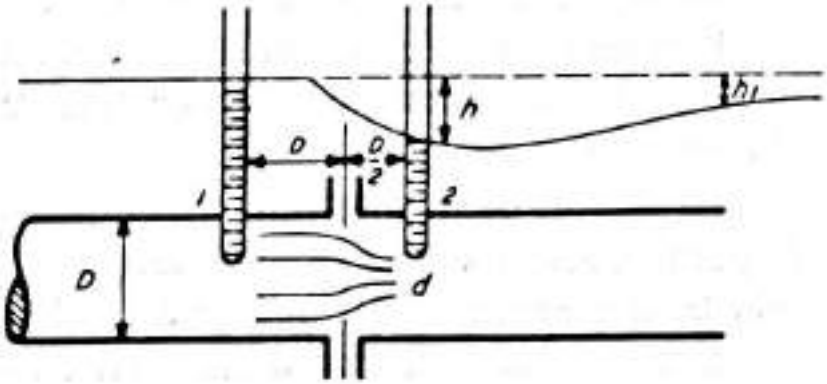


Figura 28-4

Los medidores diferenciales son dispositivos que consisten en una reducción en la sección de flujo de una tubería, de modo que se produzca una diferencia de presión, a consecuencia del aumento de velocidad.

Consideremos, por ejemplo, el caso de un diafragma instalado en el interior de una tubería de diámetro D; la diferencia de presión h, entre los puntos (1) y (2), es dada por

$$h = \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \therefore V_2^2 - V_1^2 = 2gh.$$

siendo d el diámetro de la abertura.

$$V_2 = V_1 \frac{D^2}{d^2},$$

$$V_1^2 \frac{D^4}{d^4} - V_1^2 = 2gh,$$

$$V_1 = \frac{\sqrt{2g}\sqrt{h}}{\sqrt{\left(\frac{D}{d}\right)^4 - 1}},$$

obteniéndose para el caudal

$$Q = C_d S_1 A_1 = \frac{\pi D^2}{4} C_d \frac{\sqrt{2g}\sqrt{h}}{\sqrt{\left(\frac{D}{d}\right)^4 - 1}};$$

ó

$$Q = 3{,}48 \frac{C_d D^2 \sqrt{h}}{\sqrt{\left(\frac{D}{d}\right)^4 - 1}},$$

siendo
Q = el caudal, en m^3/s;
C_d = coeficiente de descarga para el caudal;
D = diámetro de la tubería, m;
d = diámetro de la sección, reducida, m;
h = diferencia de presión provocada entre dos puntos.

Esta fórmula general se aplica a todos los medidores diferenciales: orificios, diafragmas, boquillas internas, Venturis cortos, Venturis largos, etc.

Una vez conocidos los diámetros y medido el valor h, se determina el caudal Q.

Para los orificios concéntricos, el valor de C_d varía de 0,60 a 0,62, pudiendose admitir el valor medio 0,61. Para los medidores Venturi del tipo largo, el valor medio de C_d está alrededor de 0,975.

La pérdida de la carga final, en estos medidores es menor que la diferencia de presión h, porque, después de pasar por la sección contraída, hay una recuperación de carga piezométrica que proviene de la reducción de la velocidad (Fig. 28-4).

Los medidores Venturi se caracterizan por una capacidad mayor de recuperación, debido a su sección de difusión (ampliación gradual).

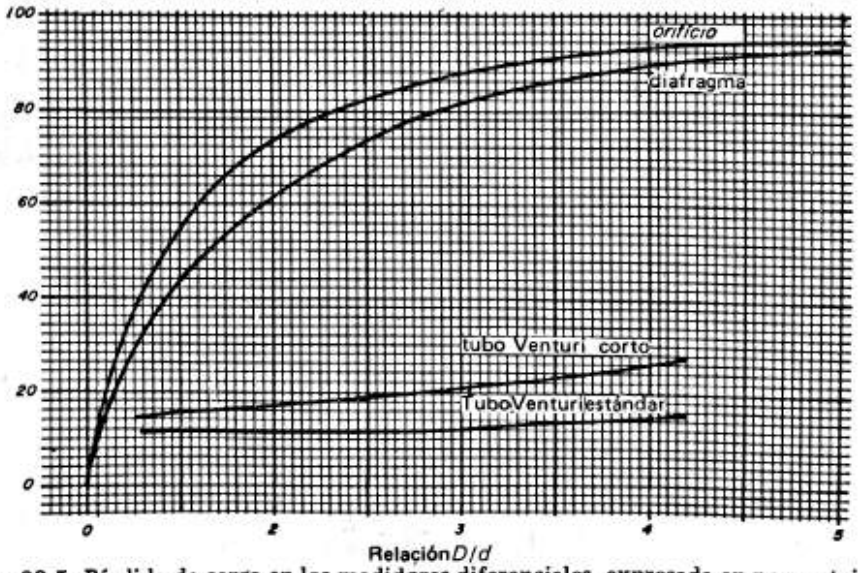


Figura 28-5. Pérdida de carga en los medidores diferenciales, expresada en porcentajes de la diferencia provocada de presión (W. W. S.)

Aumentándose el valor de la relación $\frac{D}{d}$ (estrechamiento), se aumenta el porcentaje de la pérdida (Fig. 28-5).

B.1.1.1- PIEZÓMETRO + TUBO DE PITOT

Tubos de Pitot

Estos tubos fueron empleados por primera vez por el físico francés Pitot, en 1730 (río Sena).

Un tubo de Pitot consiste en un tubo de material transparente con una extremidad doblada en dirección a la corriente del agua, como muestra la Figura 28-25.

Teóricamente

$$H = \frac{V^2}{2g}$$

$$V = \sqrt{2gH}.$$

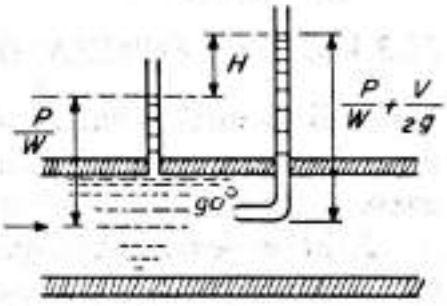


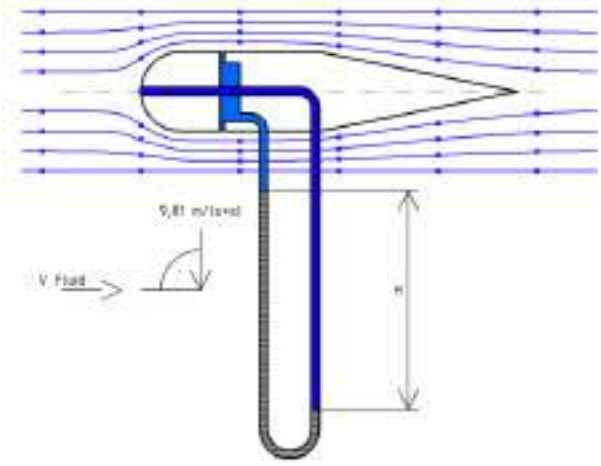
Figura 28-25

En realidad, sin embargo, se debe introducir un coeficiente de corrección C,

$$V = C\sqrt{2gH}.$$

El tubo de Pitot solamente conduce a buenos resultados en el caso de corrientes de gran velocidad, siendo por ello más comúnmente empleado en tuberías, etc.

B.1.1.2- TUBO DE PRANDTL



$$v_{0t} = \sqrt{\frac{2.g.l(\rho_m - \rho)}{\rho}}$$

En el caso particular de que la medición de velocidad se efectúe en un flujo de agua:

$$v_{0t} = \sqrt{2.g.l(\delta - 1)}$$

(velocidad teórica de la corriente, tubo de Prandtl)

Donde: δ - densidad relativa del líquido manométrico.

B.1.1.3- PLACA ORIFICIO, TOBERA O BOQUILLA INTERNA

En los medidores instalados, la manera más simple de verificarse h para la determinación del caudal consiste en el empleo de un manómetro en U.

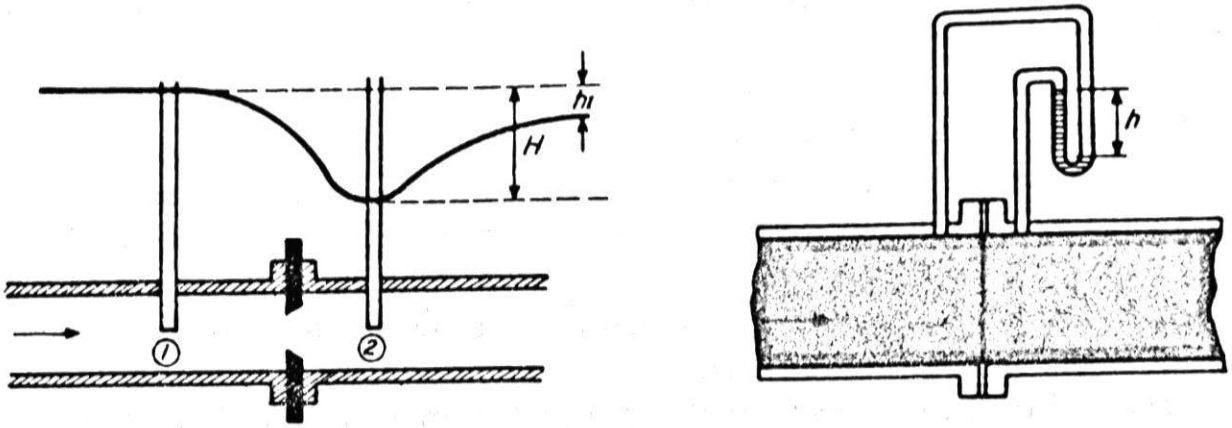


Figura 28-6. Orificio y boquilla interna

Orificios concéntricos

Los orificios concéntricos, intercalados en las tuberías constituyen uno de los procesos más simples para la medición de caudales.

La ejecución del orificio es relativamente fácil. El orificio de diámetro conveniente es construido en una placa metálica instalada entre bridas de la tubería.

Placa. La placa utilizada puede ser de bronce o acero inoxidable. Su espesor puede ser de 2,5 mm (3/32″), para tuberías de 200 a 250 mm y 5,0 m (3/16″), para tuberías de hasta 550 mm.

En el caso de emplearse placas más gruesas, se debe dar una terminación en bisel a 45° a fin de obtener el espesor recomendado.

Tamaño del orificio. El diámetro del orificio debe estar comprendido entre 30 y 80% del diámetro de la tubería. Valores inferiores a 30% corresponden a pérdidas excesivas y valores superiores a 80% no permiten una buena precisión en las determinaciones.

Usualmente, el valor de d es establecido entre 50 y 70% del valor de D.

Conexiones. En las tuberías horizontales, las conexiones para medida de presión deben ser hechas en la pared lateral de los tubos, en el plano horizontal (Fig. 28-4).

La toma de aguas arriba deberá quedar a una distancia corrrespondiente a un diámetro (D), de la cara del orificio; la de aguas abajo es colocada a una distancia $D/2$.

Se recomiendan las dimensiones para las derivaciones dadas en la Tabla 28-2.

Las conexiones deben ser hechas sin penetración excesiva, eliminando las asperezas.

Instalación del orificio. El orificio debe ser instalado en tramos rectilíneos horizontales, o verticales, sin cualquier causa perturbadora próxima (derivaciones, curvas, válvulas, etc.), recomendándose las distancias mínimas dadas en la Tabla 28-3.

Siempre que la diferencia de diámetro D-d sea superior a 50 mm, se debe hacer una pequeña perforación, de 3 mm (1/8″) de diámetro, en la parte superior de la placa del orificio, junto a la generatriz superior de los tubos, para permitir el paso de aire, evitándose la formación de bolsas de aire.

Diferencia de presión producida (h), puede ser calculada por la fórmula general, no debiendo exceder 2,50 m, por razones económicas.

Tabla 28-2

D (mm y pul)		Mínima (pul)	Máxima (pul)
50	2	1/4	1/4
75	3	1/4	3/8
100-200	4-8	3/8	1/2
250	10	3/8	5/8
300-350	12-14	3/8	3/4
400	16	3/8	1

Tabla 28-3

D/d	Longitud aguas abajo	Longitud aguas arriba
1,25	20 × D	5 × D
1,50	12 × D	4 × D
2,00	7 × D	3,5 × D
3,00	3 × D	3 × D

B.1.1.4- MEDIDOR VENTURI LARGO (22 Θ) Y CORTO (7 Θ)

El medidor Venturi es un aparato inventado por Clemens Herschel, en 1881, que lleva el nombre de Venturi, filósofo italiano, que fue el primer hidráulico que experimentó tubos divergentes.

El aparato comprende tres secciones principales: una pieza convergente, otra divergente (difusor) y una sección intermedia, que constituye la garganta o estrechamiento, conforme se indica en la Figura 28-7 y 28-8.

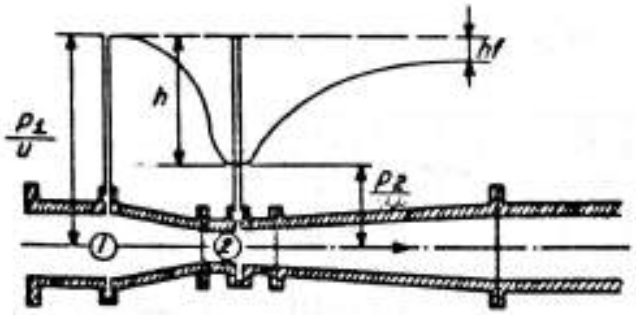


Figura 28-7

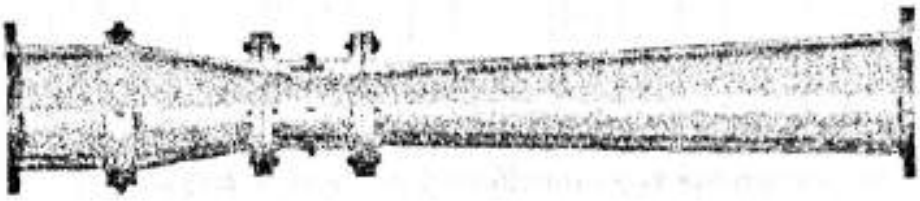


Figura 28-8

El diámetro de la garganta generalmente está comprendido entre 1/4 y 3/4 del diámetro de la tubería.

Los aparatos Venturi son fabricados en dos tipos:

a) Venturis largos (Herschel);
b) Venturis cortos (Orivent).

Las extensiones de los tubos Venturi largos generalmente están comprendidos entre 5 y 12 veces el diámetro de la tubería. Los Venturi cortos se presentan con extensiones entre 3,5 y 7 veces el diámetro nominal de la tubería.

El medidor Venturi debe ser precedido de un tramo rectilíneo de por lo menos 6 veces el diámetro de la tubería.

Aguas abajo del aparato se puede instalar cualquier pieza especial, porque la extensión de la sección divergente (difusor) es suficientemente grande para asegurar las condiciones de medida

En la toma de presión, existen cámaras anulares (coronas), conectadas al tubo por una serie de orificios convenientemente dispuestos en su periferia.

En la tubería donde va a ser instalado el medidor, la presión deberá ser superior al valor de H (Fig. 25-6).

Aplicándose el teorema de Bernoulli, tomándose como referencia el eje horizontal de la tubería,

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{2g} + \frac{V_2^2}{2g},$$

$$\frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} = \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} = h = \frac{1}{2g}(V_2^2 - V_1^2),$$

$$V_1^2 = \frac{Q^2}{A_1^2} \qquad V_2^2 = \frac{Q^2}{A_2^2}$$

$$\therefore\ h = \frac{Q^2}{2g}\left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2}\right),$$

$$Q = \sqrt{\frac{2g}{\left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2}\right)}}\sqrt{h} = m\sqrt{h}.$$

Se debe además introducir un coeficiente correctivo k, de modo que

$$Q = km\sqrt{h}.$$

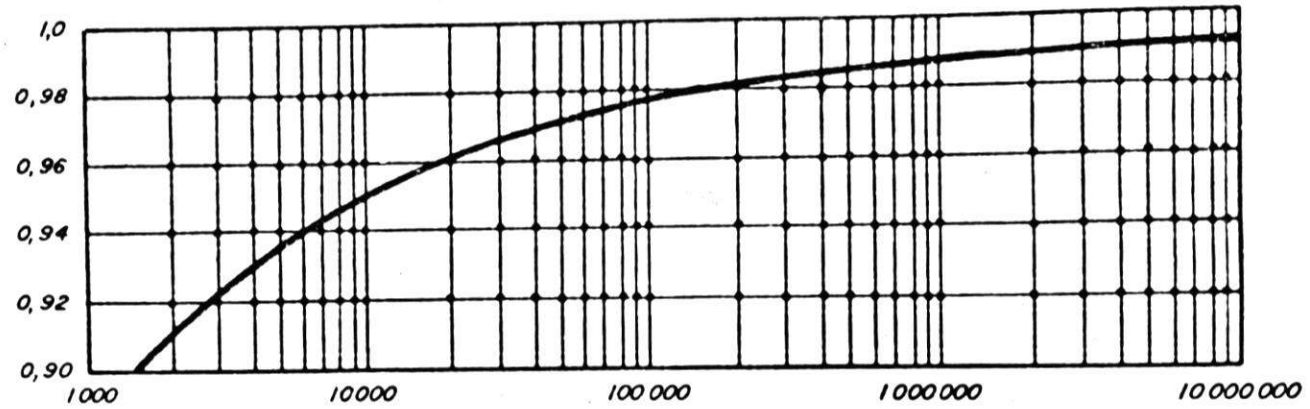


Figura 28-9. Valores del coeficiente k, en función del número de Reynolds (escala logarítmica)

B.1.1.5- TUBO DALL (2 Θ)

Es un nuevo tipo de medidor diferencial introducido por la fábrica Kent (Inglaterra) y que presenta las siguientes ventajas:

a) dimensiones y pesos reducidos;
b) pérdida de carga muy pequeña;
c) bajo costo.

La pérdida de carga en los medidores Dall, es inferior a la que se verifica en los tubos Venturi clásicos (largos).

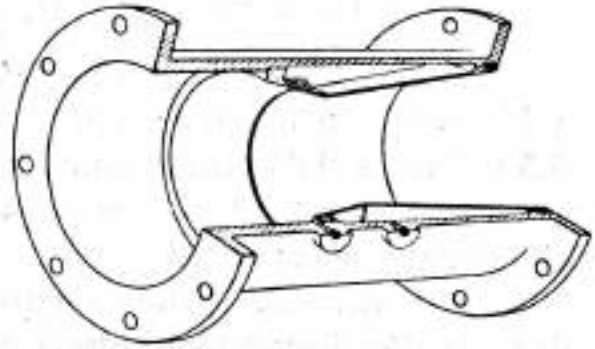


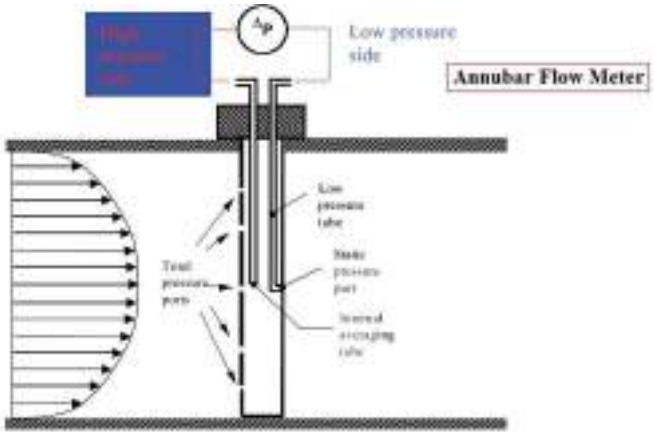
Figura 28-10. Medidor Dall (corte)

Tabla 28-4. Tubos Venturi y Dall. Límites usuales de aplicación

D (mm y pul)	Venturi (caudales) l/s)	Dall (caudales l/s)
150- 6	60- 400	125- 900
200- 8	110- 700	220- 1 500
250-10	170- 1 100	340- 2 400
300-12	245-1 600	525- 3 400
350-14	335-2 200	630- 4 700
400-16	435-2 800	950- 6 000
450-18	550-3 600	1 135- 7 500
500-200	680-4 400	1 385- 9 500
600-24	980-6 400	2 015-13 800

Observación. Diferencias de presión de 1,50 a 4,00 m H_2O. Longitudes T. Venturi largos 10 a 22 veces el diámetro; T. Venturi cortos, de 5 a 7 veces el diámetro y T. Dall, 2 veces el diámetro.

B.1.1.6- MEDIDOR ANNUBAR



El medidor de flujo Annubar o tubo Annubar es una especie avanzada o una evolución del tubo de Pitot. Está conformado por un tubo exterior el cual va ubicado perpendicularmente al área transversal de la tubería y en su interior hay dos tubos.

El tubo exterior presenta una serie de orificios ubicados en la cara aguas arriba de la corriente de flujo, y la misma cantidad de orificios ubicados en forma paralela en la cara aguas abajo de la corriente de flujo, con la finalidad de poder estimar el perfil de velocidad y realizar un promedio de esas estimaciones.

El tubo Annubar posee (en la parte central del tubo exterior) otro orificio ubicado en cara aguas abajo de la corriente. Uno de los tubos internos del Anubbar es utilizado para estimar un promedio de las presiones medidas por los orificios (presión total), mientras que el otro tubo interno mide la presión estática a través del orificio central.

B.1.1.7- SINGULARIDADES

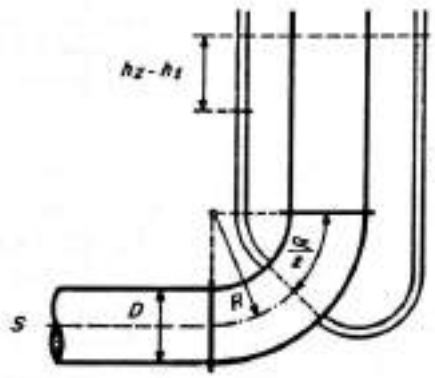


Figura 28-17

Curvas, registros y otras piezas y singularidades pueden ser aprovechadas para la medida de caudales en las tuberías, siempre que no se exija mucha precisión.

En las curvas, por ejemplo, se verifican diferencias de presión que pueden servir para la medición de la descarga.

$$Q = KA\sqrt{2g(h_2 - h_1)}.$$

Valores prácticos de K son dados en función de R/D, como se muestra en la Tabla siguiente

R/D	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
K	0,701	0,849	0,992	1,112	1,224

B.1.1.7- VÁLVULAS

Los registros de compuerta también pueden ser utilizados para la medición de caudal.
De acuerdo con las observaciones de W. J. Tudor, se tiene que

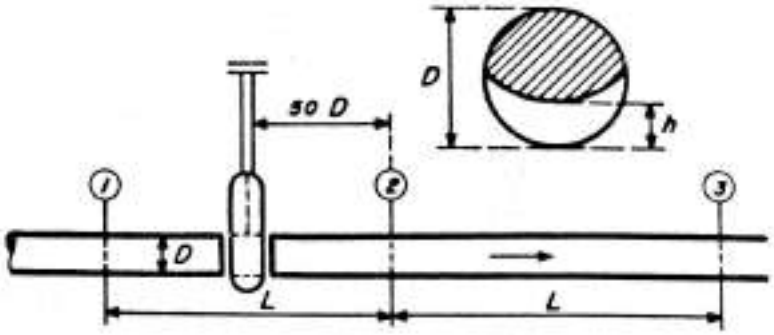
$$Q = 2 \cdot 1 \sqrt{h_f A^2 g \left(\frac{h}{D}\right)^3},$$

donde
Q = caudal, m^3/s;
h_f = pérdida de carga apenas en el registro, m;
A = área de la tubería, m^2;
h = altura de la abertura, m;
D = diámetro del tubo, m.

Se miden las cargas en puntos equidistantes 1, 2 y 3, dado que la medición en el tramo 2-3 sirve sólo para indicar la pérdida de carga debida a la propia tubería. (Si esta pérdida fuere despreciada se simplifica el proceso).

$$h_f = (p_1 - p_2) - h_{f_{2-3}} = (p_1 - p_2) - (p_2 - p_3).$$

Figura 28-18



B.1.2- ROTÁMETROS

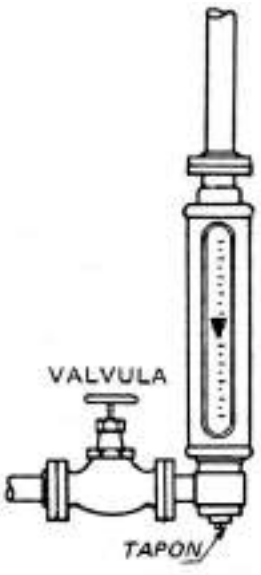


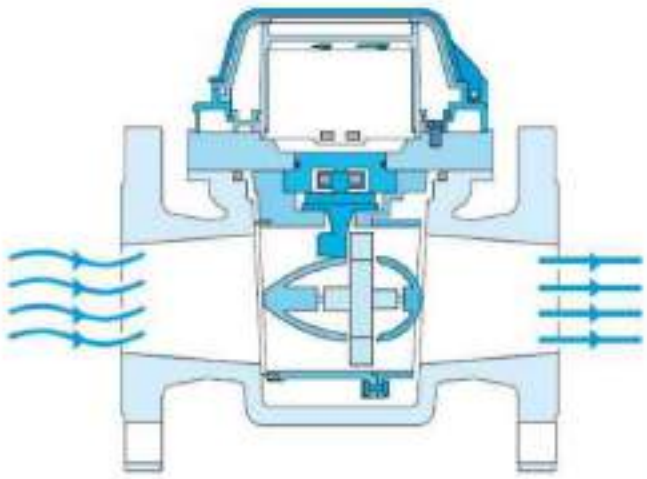
Figura 28-16

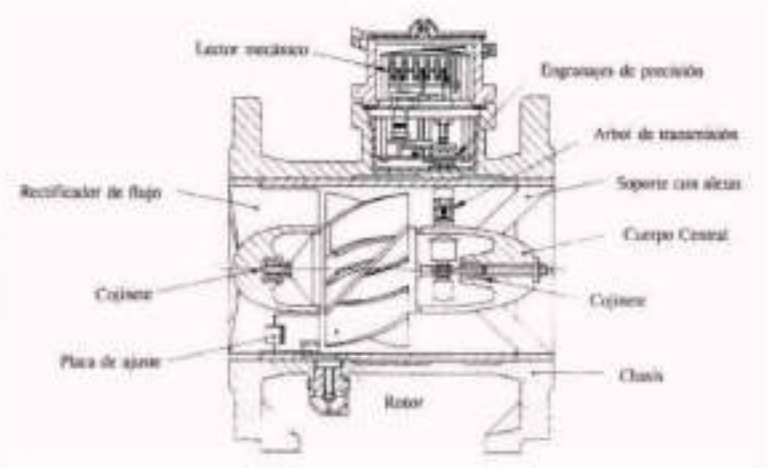
El medidor de área variable o rotámetro, es un aparato constituido por un tubo cónico transparente con la sección mayor vuelta hacia arriba.

Por este tubo pasa el líquido cuyo caudal debe ser medido existiendo un flotador de forma adecuada, que se desplaza con el movimiento del líquido.

Para cada caudal existe una posición correspondiente del flotador, una vez que varía el área del paso existente entre el flotador y las paredes del tubo (Fig. 28-16).

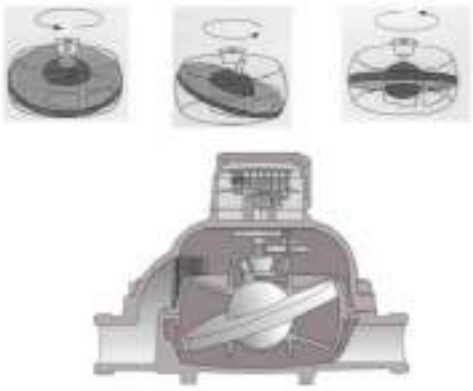
B.1.3- MEDIDORES (CONTADORES) DE TURBINA Y VOLUMÉTRICOS





De Turbina

Volumétrico de Pistón Rotativo



Volumétrico de Disco Nutante

Los medidores son aparatos destinados a medir la cantidad de agua que fluye en intervalos de tiempo relativamente largos.

Son muy empleados para medir el consumo de agua en las instalaciones de edificios e industrias.

Son dos los tipos principales:

a) medidores de velocidad (tipo turbina);
b) medidores de volumen (compartimiento que se eleva y vacía continuamente).

Medidores de velocidad. Son más baratos, más simples, de reparación más fácil y más insensibles a las impurezas del agua. Tienen el inconveniente de límites de sensibilidad pobres.

Medidores de volumen. Son más precisos y más sensibles, indicando consumos muy pequeños.

Inconvenientes más caros y más sensibles a las impurezas de las aguas. Reparación más difícil.

Los medidores de volumen son recomendables para las localidades en que el agua es muy cara y de buena calidad.

El Woltmann es un medidor de velocidad con gran capacidad de caudal. Consiste en una turbina, cuyo número de revoluciones mide indirectamente la cantidad de agua que pasa por el aparato.

En servicios de abastecimiento de agua, el medidor Woltmann se aplica para la determinación de caudal en líneas de conducción principales y secundarias, salidas de depósitos, etc. Se aplica también en los edificios de gran consumo de agua.

B.1.4- MÉTODOS QUÍMICOS, COLORIMÉTRICO Y RADIACTIVO

Aunque interesantes, estos procesos son empleados sólo en casos particulares.

Uno de ellos consiste en descarga en la corriente que debe medirse, una solución concentrada de sal, con un caudal constante, q. Esta solución naturalmente se diluye en las aguas, alterando la concentración. Determinándose la concentración final, se obtiene el caudal:

c_o = concentración inicial en la corriente;
c_1 = concentración de la solución;
c_2 = concentración final en la corriente;
q = caudal de la solución concentrada;
Q = caudal de la corriente.

$$c_1 q + c_0 Q = (Q + q)c_2$$
$$= c_2 Q + c_2 q,$$
$$c_1 q - c_2 q = c_2 Q - c_0 Q,$$

$$c_1 q - c_2 q = (c_2 - c_0) Q$$

$$\therefore \quad \boxed{Q = \frac{q(c_1 - c_2)}{c_2 - c_0}}.$$

El proceso descrito puede ser aplicado, satisfactoriamente, sólo en el caso de corrientes turbulentas y de aguas que pasan por bombas o turbinas, para garantizar la mezcla de la solución con el agua.

Otro proceso químico se basa en la conductividad eléctrica del agua, que se eleva cuando una sal es disuelta.

Se emplean dos pares de electrodos, cada par es instalado en una sección del conducto. En un determinado instante, se lanza en el conducto una solución salina concentrada. El paso de esta por las secciones 1 y 2 indicada por un medidor, registra de este modo el tiempo transcurrido en el trayecto. Como la distancia entre las secciones es conocida, se obtiene la velocidad del agua. El medidor de corriente puede registrar una gráfica (Fig. 2820).

Los procesos colorimétricos son semejantes; se verifica visualmente el paso del líquido coloreado. En el caso de alcantarillas, se usa el proceso colorimétrico para determinar el caudal, empleándose una anilina o aserrín. También sirven para indicar la influencia de una fosa negra en un pozo de agua. Las sustancias usadas en este caso son la fuxina y la fluoresceína.

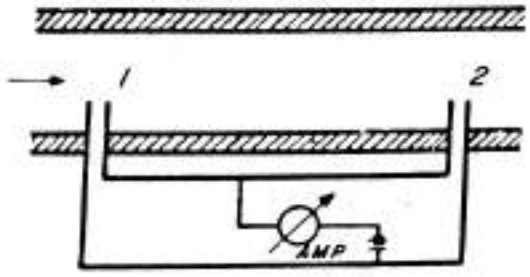


Figura 28-19

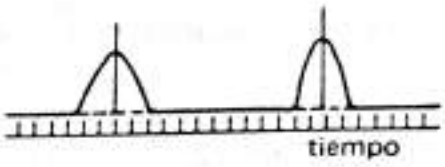


Figura 28-20

La tecnología moderna ofrece a los ingenieros la posibilidad del empleo de isótopos radiactivos (trazadores), para el estudio del movimiento del agua, determinación de velocidades, caudales, etc.

B.2- MEDICIÓN DE CAUDALES EN ESCURRIMIENTOS MIXTOS

B.2.1- ORIFICIOS, TUBOS Y TOBERAS

Los orificios son aplicados para el control y medida de caudal en recipientes, tanques y tuberías.

En las instalaciones de tratamiento de agua, son empleados frecuentemente, orificios calibrados y ajustables, para medir caudales de soluciones químicas. El nivel del agua es mantenido constante por una válvula de boya.

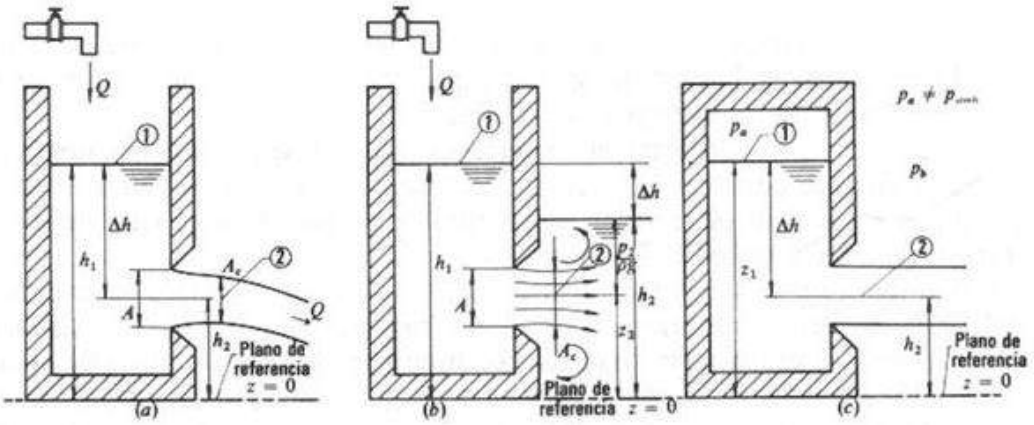


FIG. 14-1. Tres casos de *desagüe de un líquido por un orificio:* (a) depósito con superficie libre a la atmósfera; (*b*) ídem, pero con orificio sumergido; (*c*) depósito no abierto a la atmósfera. En los tres casos el nivel del agua en el depósito debe permanecer constante: en las Figs. (*a*) y (*b*) esto se consigue regulando el caudal de alimentación del depósito, y en el caso (*c*) de una manera análoga o suponiendo la sección transversal del depósito suficiente grande.

ECUACION GENERAL DEL DESAGÜE POR ORIFICIOS, TUBOS Y TOBERAS

$$Q = C_q A \sqrt{2g\,\Delta h} \qquad (14\text{-}1)$$

donde $C_q = C_c C_v$ — coeficiente de caudal
Δh — diferencia de *alturas piezométricas* (no necesariamente coincidente con la diferencia de alturas geodésicas), antes y después del orificio.

TABLA 14-1

COEFICIENTES DE CONTRACCION, DE VELOCIDAD Y DE CAUDAL PARA TUBOS Y TOBERAS DIVERSOS DE SECCION CIRCULAR

FIGURA							
C_c							
C_v							
C_q							

Los valores de estos coeficientes se obtienen experimentalmente. Algunos de los más principales para orificios y tubos diversos *de sección circular* pueden verse en la tabla 14-1.

Advertencias sobre esta tabla:

1.ª El llamado *tubo standard*, tabla 14-1 *c*, tiene una longitud igual a 2,5 veces el diámetro y aristas vivas, y un coeficiente de contracción $C_c = 1$.
2.ª La llamada *boquilla de Borda*, tabla 14-1 *d*, está formada por un tubo que penetra en el depósito, tiene aristas vivas y su longitud es igual a su diámetro.
3.ª La tobera conoidal, tabla 14-1 *g*, tiene un C_q más favorable que la tobera cónica, debido a su forma bien *fuselada*, que ha eliminado las pérdidas de *forma*, quedando únicamente las de *superficie* (véase Secs. 8.3 y 8.9).
4.ª Los valores de C_c, C_v y C_q de esta tabla deben usarse con precaución. Si los diámetros son menores a 25 mm o los Δh menores de 1 m, estos coeficientes ya no son constantes, sino que dependen del número de Reynolds. Los coeficientes para cualquier tubo y orificio pueden obtenerse mediante un tarado «*in situ*».

B.2.2- COMPUERTA DE FONDO

Una abertura de compuerta, Fig. 14-3, no es más que un orificio rectangular de altura a y de ancho b, que supondremos constante e igual al ancho del canal. En el fondo no hay contracción; pero sí en la lámina superior.

$$Q = C_q\, ab \sqrt{2g\,\Delta h}$$

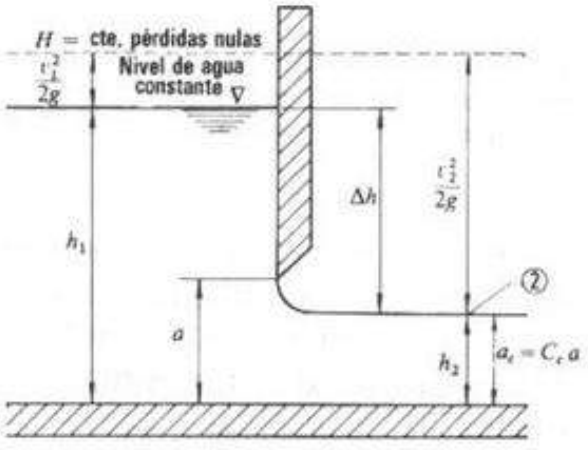


FIG. 14-3. El *desagüe por una compuerta* es un caso particular de desagüe por un orificio.

B.2.3- BOQUILLAS

Estos dispositivos se basan en la descarga de líquidos a través de orificios con chorro libre.

La boquilla Kennison está diseñada en forma tal que conduce la vena líquida hacia el punto de descarga, de manera que no perturbe el flujo del agua en la tubería principal. Estas boquillas se aplican para la medición de gastos de aguas industriales y desagües debido a su propiedad de "autolimpieza", que impide la acumulación de los sólidos arrastrados por esas aguas.

Asociado a estas boquillas, se instala un sensor de nivel, que consigue accionar los instrumentos necesarios para la indicación, registro, integración, etcétera, tanto local como a distancia.

Boquilla de Kennison, es una boquilla calibrada, cuyo empleo es indicado para la medida de caudal en tuberías que conducen líquido lodoso.

En las estaciones de tratamiento de aguas negras, las boquillas Kennison son empleadas comúnmente para la determinación de caudal de lodos. El caudal es determinado por la posición de la vena en régimen de descarga libre. Figura 28-1.

El Brasil fue uno de los primeros países en emplearla.

Figura 28-1

B.2.4- CUBA DANAIDE

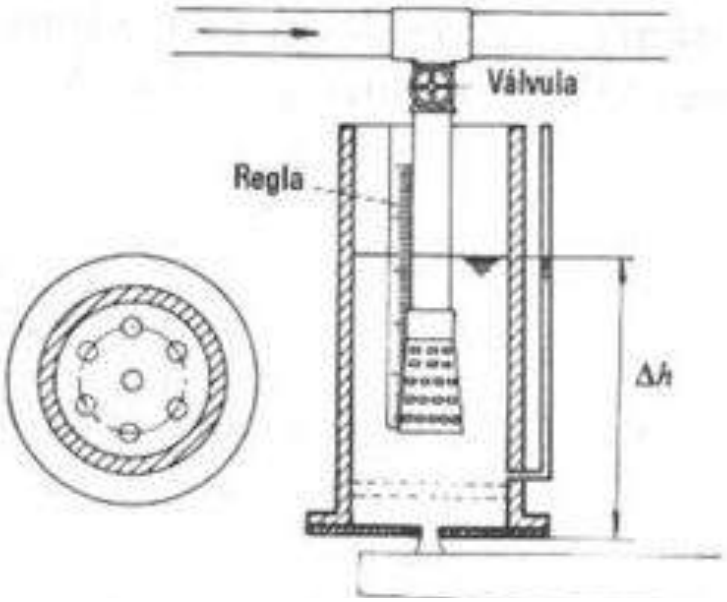
El aparato antiguo y muy sencillo conocido con el nombre de *cuba Danaide* (1), que se representa en la Fig. 14-2, posee uno o varios orificios en el fondo y mide caudales de 5 a 500 l/s. Si entra un caudal constante de agua en una Danaide, después de un cierto tiempo de estabilización, el nivel se mantendrá constante a una altura que dependerá del caudal y del área disponible para el flujo de salida.

La fórmula general [Ec. (14-1)] particularizada para una Danaide se escribirá así:

$$Q = nC_q \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2g\,\Delta h}$$

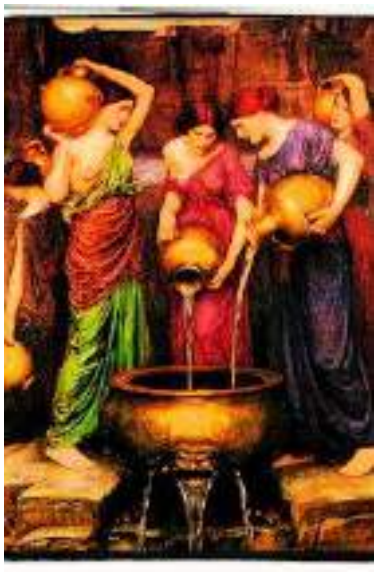
$$Q = nC_q \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2g\,\Delta h}$$

donde n — número de orificios abiertos. Todos los orificios que se ven en la planta de la figura llevan un tapón roscado para abrir más o menos



orificios según el orden de magnitud del caudal;
d — diámetro de un orificio.

Las Danaides se han utilizado con frecuencia en los ensayos de bombas hidráulicas.



B.2.5- COORDENADAS DE CHORRO (HORIZONTAL, INCLINADO)

La velocidad teórica de un chorro es

$$V_t = \sqrt{2gh}.$$

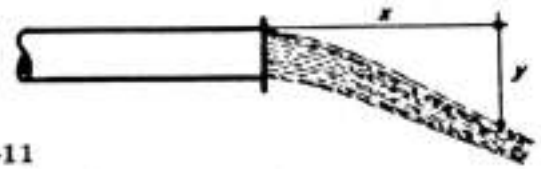


Figura 28-11

El movimiento de la vena líquida puede ser descompuesto según los ejes horizontal (x) y vertical (y). El primer movimiento es uniforme y el segundo acelerado, debido a la acción de la gravedad.

Las ecuaciones de estos movimientos serán

$$x = V_t t \tag{1}$$

y

$$y = \frac{1}{2} g t^2. \tag{2}$$

Tomándose el valor de t de la ecuación (1) y sustituyéndose en (2),

$$y = \frac{1}{2} g \frac{x^2}{V_t^2}. \tag{3}$$

Se verifica por lo tanto, que la trayectoria es una parábola

$$V_t^2 = \frac{g}{2} \frac{x^2}{y},$$

$$V_t = 2{,}21 \frac{x}{\sqrt{y}}. \tag{4}$$

El caudal será

$$Q = AV = 2{,}21 A \frac{x}{\sqrt{y}}. \tag{5}$$

Este es uno de los procesos más simples para la medida del caudal, en el caso de descarga libre.

Tabla 28-5

h/D	% de la sección total	Area hidráulica
0,95	0,981	3,082 × r^2
0,90	0,948	2,978 × r^2
0,85	0,905	2,846 × r^2
0,80	0,857	2,694 × r^2
0,75	0,805	2,528 × r^2
0,70	0,747	2,349 × r^2
0,65	0,688	2,162 × r^2
0,60	0,627	1,969 × r^2
0,55	0,564	1,771 × r^2
0,50	0,500	1,571 × r^2

El tubo de descarga puede estar en posición horizontal (conforme indica la Fig. 28-11), o puede estar inclinado; en este segundo caso, se debe medir x en la dirección de la longitud de la generatriz superior del tubo y y en la vertical.

En la fórmula (5), A es el área hidráulica a la salida del tubo. Si el tubo no funciona con la sección de salida completamente llena, se debe medir h, altura de la lámina pudiendo aplicarse los datos de la Tabla 28-5.

28.2.8. *MEDIDA APROXIMADA DEL CAUDAL QUE SALE DE UN TUBO HORIZONTAL* (E. R. Yassuda, P. Nogami, R. Montrigaud)

Tubo horizontal lleno. $Q = 12{,}5\, LD^2$,

donde

L = distancia en cm para $y = 25$ cm;
D = diámetro interior del tubo (cm);
Q = caudal en litros por hora.

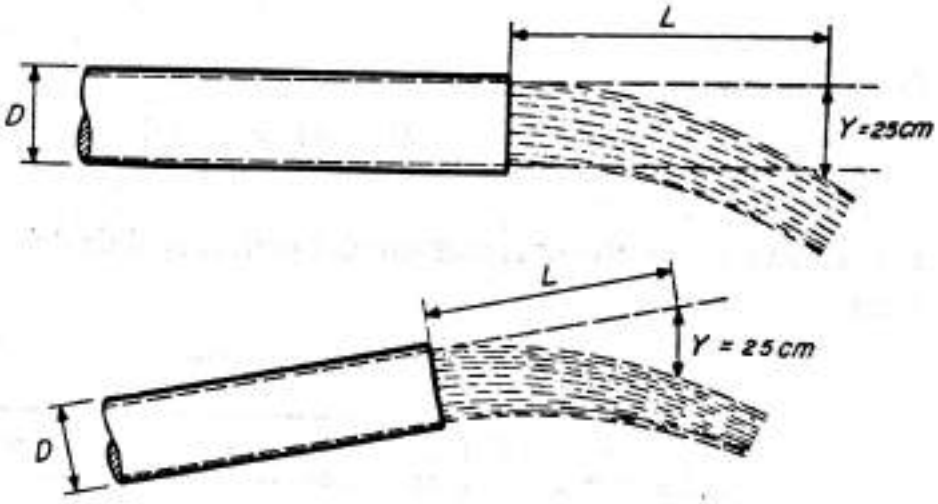


Figura 28-12

Midiéndose la distancia L en cm; entre la boca del tubo y el punto donde el chorro cae 25 cm, podremos fácilmente evaluar el caudal. L es siempre medido en dirección a la generatriz del tubo y V en la vertical.

Tabla 28-6. Caudal aproximado en litros por hora. Distancia L en cm para $Y = 25$ cm

Diámetro interno del tubo (cm y pul)	Distancia L en cm para $Y = 25$ cm									
	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
7,5-3	17 500	21 000	24 500	28 000	31 500	35 000	38 500	42 000	45 500	49 000
10 -4	31 000	37 500	44 000	50 000	56 500	62 500	69 000	75 000	81 500	87 500
15 -6	70 500	84 500	98 500	112 500	126 500	140 500	154 600	169 000	178 000	197 000

Tubo horizontal parcialmente lleno. En el caso de que el flujo no se dé con la sección de salida totalmente llena, interesa medir el abatimiento t de la lámina, en la salida del tubo.

En este caso, la altura de caída (25 cm) del chorro es medida a partir de la línea que pasa sobre la superficie libre de la lámina vertiente y paralela a la generatriz del tubo.

El caudal será una fracción obtenida con la sección llena. Podemos, para facilitar este cálculo, organizar la Tabla 28-7.

Tabla 28-7

t/D %	A/A_0	t/D %	A/A_0
5	0,981	40	0,627
10	0,948	45	0,564
15	0,905	50	0,500
20	0,858	60	0,375
25	0,805	70	0,253
30	0,747	80	0,142
35	0,688	90	0,052

*(De Yamamoto, Tokio)

A = área hidráulica;
A_0 = área hidráulica (tubo lleno);
D = diámetro del tubo.

El caudal será dado por la fórmula $Q = \frac{A}{A_0} Q_0$.

Figura 28-13

B.2.6- TUBO VERTICAL

$$\therefore -Q = 0{,}858 \times 112{,}500 = 96\,500 \text{ l/h.}$$

Tubo vertical. Fórmula:

$$Q = 125\, D^2 \sqrt{H},$$

Q = l/h,
H = cm,
D = cm.

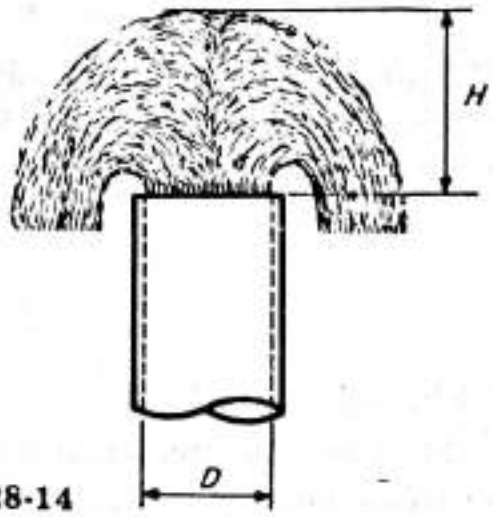


Figura 28-14

Tabla 28-8. Caudal aproximado en litros por hora

Diámetro interno del tubo (cm pul)	(H = altura del chorro a partir de la boca del tubo en cm)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
10- 4	28 000	39 500	48 500	56 000	62 500	68 500	74 000	79 000	84 000	88 500
15- 6	63 000	89 000	109 000	126 000	140 500	154 000	166 500	178 000	188 500	199 000
20- 8	112 000	158 000	193 500	223 500	250 000	274 000	296 000	316 000	335 500	353 500
25-10	174 500	247 000	302 500	349 500	390 500	428 000	462 000	494 000	524 000	552 000

La presente tabla calculada para diámetro interno del tubo igual al diámetro nominal.

B.2.7- MÉTODO CALIFORNIA

Es un proceso muy empleado para la medición del caudal de pozos profundos, bombas de aguas negras, etc.

Consiste en ejecutar una instalación como indica la Figura 28-15, haciéndose verter agua por un tubo horizontal.

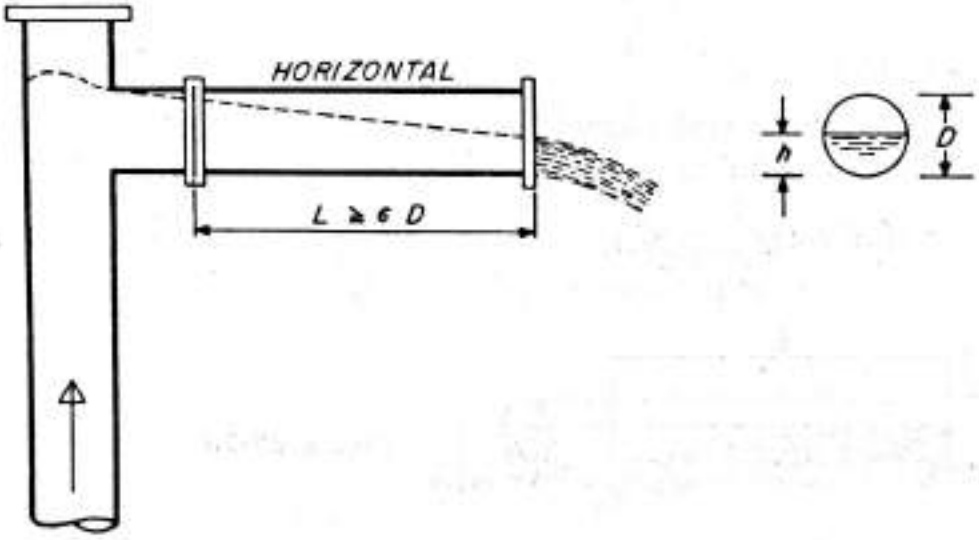


Figura 28-15

El caudal será obtenido por la siguiente expresión:

$$Q = Kh^{1.88},$$
$$K = 0.057 + 0{,}01522\,D,$$

siendo

D = diámetro, en cm;
Q = caudal, en l/s;
h = altura de la lámina, en cm.

B-3- MEDICIÓN DE CAUDALES EN ESCURRIMIENTOS A SUPERFICIE LIBRE

B.3.1- LLENADO DE DEPÓSITO O EMBALSE

Es el Método Directo por medición de tiempo y conocimiento del volumen, explicado precedentemente

B.3.2- VERTEDEROS: GENERALIDADES

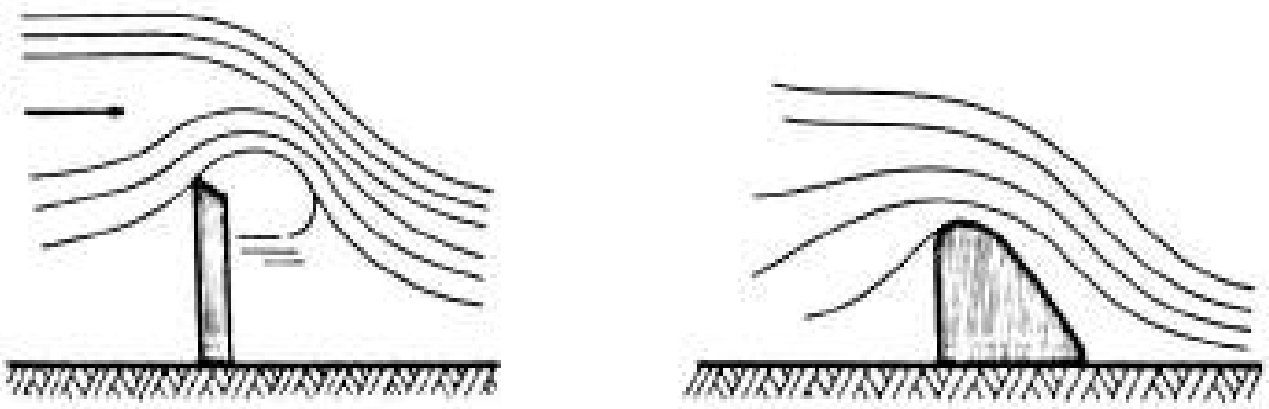


Figura 9-1

Los vertedores pueden ser definidos como simples aberturas, sobre los cuales un líquido fluye. El término se aplica también a obstáculos en el paso de la corriente y a las excedencias de los embalses.

Los vertedores son, por así decirlo orificios sin el borde superior.

Los vertedores son de empleo generalizado en Hidrometría. Deben ser tomados los siguientes cuidados:

a) se debe usar un vertedor de tipo experimental;
b) la carga debe ser libre;
c) la cresta debe ser bien tallada y debe quedar en posición horizontal;
d) toda el agua debe pasar sobre el vertedor;
e) la carga H debe ser medida aguas arriba, a una distancia comprendida entre cerca de $3H$ y $10H$ y nunca inferior a $2{,}5H$.

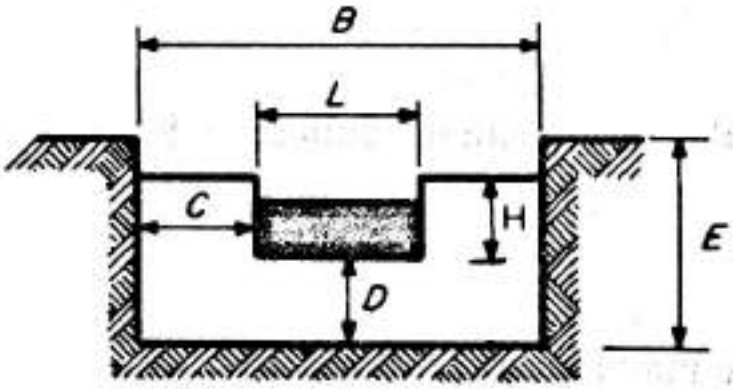


Figura 28-2

Tabla 28-1. Dimensiones sugeridas y límites de aplicación para vertedores rectangulares (con contracciones laterales)

Límites de caudal, l/s	$H_{máx}$, cm	L, cm	B, cm	E, cm	C, cm	D, cm
2,0 – 85,0	30,5	30,5	121,5	91,5	45,5	45,5
5,7 – 160,0	38,0	45,5	151,5	99,0	53,0	45,5
7,0 – 225,0	38,0	61,0	183,0	106,5	61,0	53,0
9,4 – 480,0	45,5	91,5	213,5	122,0	61,0	61,0
14,2 – 650,0	45,5	122,0	274,0	122,0	76,0	61,0
21,2 – 990,0	45,5	183,0	351,0	137,0	84,0	76,0

Los vertedores rectangulares más usuales son los de contracción completa.

Adoptándose, con aproximación, las dimensiones indicadas a continuación, se puede obtener una apreciable precisión.

$$C \cong 2H \quad \text{y} \quad D \cong 3H.$$

El borde horizontal se denomina cresta o umbral (Fig. 9-3). Los bordes verticales constituyen las caras del vertedor. La carga del vertedor, H, es la altura alcanzada por el agua, a partir de la cresta del vertedor. Debido a la depresión de la lámina vertiente junto al vertedor la carga H debe ser medida aguas arriba, a una distancia aproximadamente igual o superior a $5H$.

H = carga del vertedor
L = longitud de cresta
B = ancho del canal de acceso

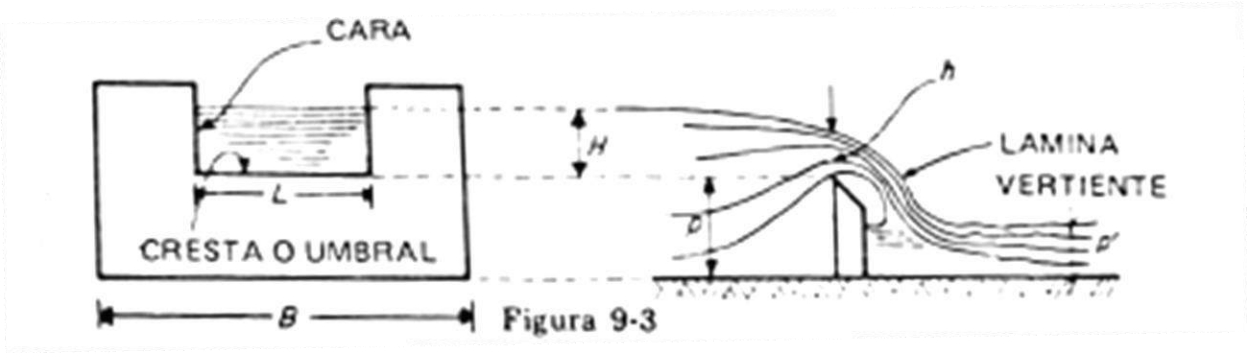


Figura 9-3

CLASIFICACIÓN DE VERTEDEROS

1. *Forma:*
   a) Simples: rectangulares, trapezoidales, triangulares, etc.
   b) Compuestos: secciones combinadas.
2. *Altura relativa del umbral:*
   a) Vertedores: completos o libres: $(p > p')$;
   b) Vertedores incompletos o ahogados: $(p < p')$.
3. *Espesor de la pared:*
   a) Vertedores de pared delgada: placas o madera biselada
   b) Vertedores de pared gruesa: $(e > 0.66\,H)$.
4. *Longitud de cresta*
   a) Vertedores sin contracciones laterales: $(L = B)$.
   b) Vertedores con contracciones $(L < B)$.

Figura 9-4

Son considerados con contracciones los vertedores cuya longitud (L) es menor que el ancho del canal de acceso (Fig. 9-5).

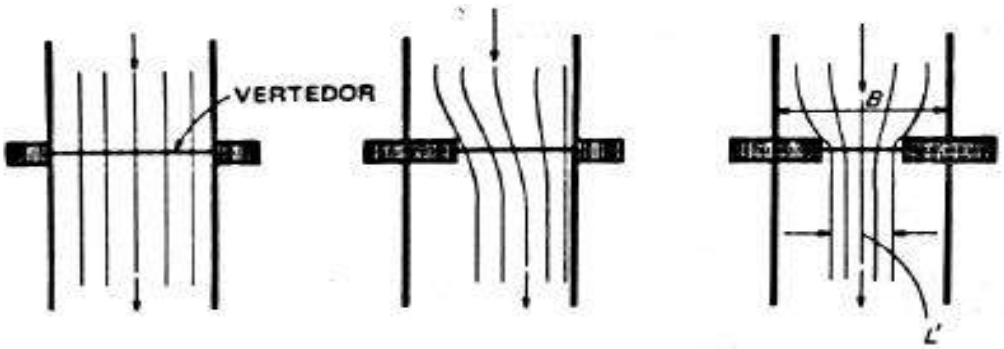


Figura 9-5 Vertedores sin contracciones, con una contracción y con dos contracciones

B.3.2.1- VERTEDEROS DE PAREDES DELGADAS

B.3.2.1.1- VERTEDEROS RECTANGULARES

La Figura 9-6 muestra un vertedor rectangular de paredes delgadas con contracciones y otro sin contracciones.

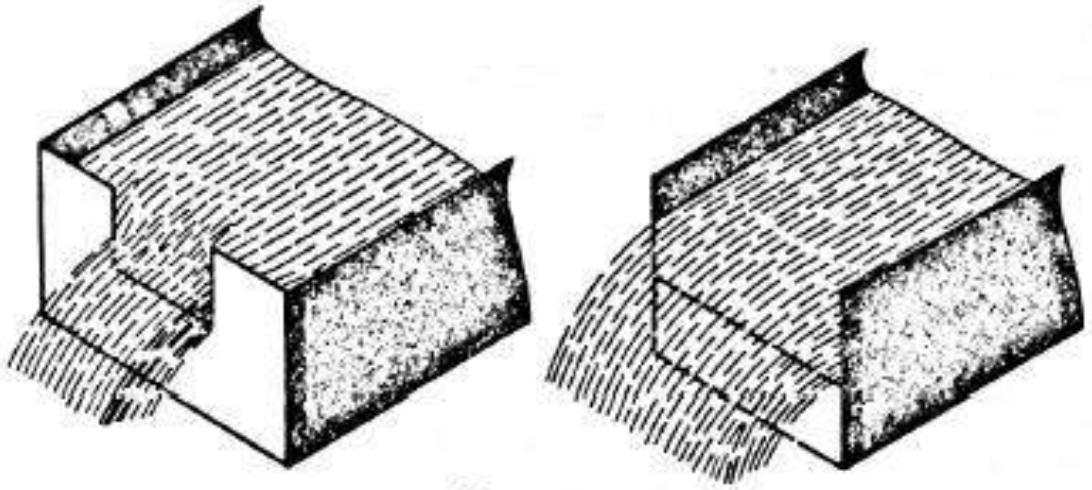


Figura 9-6

Examinándose el movimiento del agua en un vertedor (Fig. 9-7), se observa que los filetes inferiores, aguas arriba, se elevan, tocan la cresta del vertedor y se elevan ligeramente a continuación. La superficie libre del agua y los filetes próximos bajan.

En estas condiciones, se verifica un estrechamiento de la vena, como sucede con los orificios.

Para los orificios de grandes dimensiones fue deducida la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2g} \, (h_2^{3/2} - h_1^{3/2}).$$

Figura 9-7

Haciéndose:

$$h_1 = 0,$$
$$h_2 = H,$$

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2g} \, H^{3/2},$$

$$\boxed{Q = K L H^{3/2}},$$

Tabla 9.1. Vertedores rectangulares: de pared delgada, sin contracciones. Fórmula de Francis: caudal por *m* lineal de cresta*

Altura *H*, cm	*Q*, l/s	Altura *H*, cm	*Q*, l/s
3	9,57	25	230,0
4	14,72	30	302,3
5	20,61	35	381,1
6	27,05	40	465,5
7	34,04	45	555,5
8	41,58	50	650,6
9	49,68	55	750,5
10	58,14	60	855,2
11	67,12	65	964,2
12	76,53	70	1 077,7
13	86,24	75	1 195,1
14	96,34	80	1 316,5
15	106,90	85	1 442,0
20	164,50	90	1 571,0

***Para los vertedores con ancho menor o mayor de 1 (un) metro, se multiplican los valores indicados por el valor correspondiente al ancho real.**

Los valores de *m* se encuentran tabulados en diversos libros de Hidráulica, resultando la siguiente fórmula:

$$Q = m l \sqrt{2g} H^{3/2}$$

Las fórmulas precedentes son válidas para los vertedores, en los cuales actúa la presión atmosférica de la lámina vertiente (espacio *h'* ocupado por el aire -Fig. 9-1). En la fórmula anterior, de Francis, se despreciá la velocidad de llegada del agua.

9.6. INFLUENCIA DE LAS CONTRACCIONES

Las contracciones ocurren en los vertedores cuyo ancho es inferior a la del canal en que se encuentran instalados ($l < B$).

Francis, después de muchos experimentos concluyó que todo pasa como si en el vertedor con contracciones al ancho fuese reducido.

Según Francis, se debe considerar en la aplicación de la fórmula un valor corregido para *l*. Para una contracción:

$$L' = L - 0{,}1H,$$

Para dos contracciones:

$$L' = L - 0{,}2H,$$

Para el caso de dos contracciones (Fig. 9-8), la fórmula de Francis sería:

$$Q = 1{,}838\left(L - \frac{2H}{10}\right)H^{3/2}$$

(sin tener en cuenta la velocidad de llegada del agua).

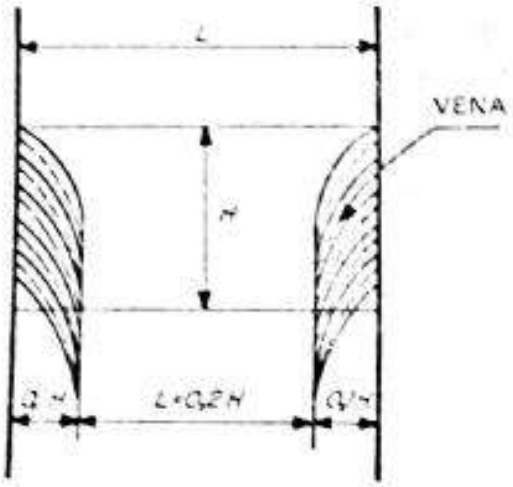


Figura 9-8

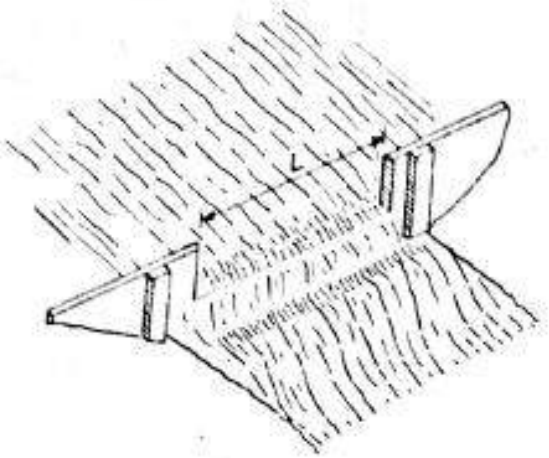


Figura 9-9

Las correcciones de Francis también han sido aplicadas a otras expresiones incluyéndose, entre éstas, la propia fórmula de Bazin.

B.3.2.1.2- VERTEDERO TRAPECIAL (CIPOLLETTI)

Cipolleti procuró determinar un vertedor trapezoidal que compensase el decrecimiento del caudal debido a las contracciones.

$$Q = Q_2 + 2Q_1.$$

La inclinación de las caras fue establecida de modo que la descarga a través de las partes "triangulares" del vertedor correspondiese al decrecimiento de la descarga debido a las contracciones laterales, con la ventaja de evitar la corrección en los cálculos.

Para estas condiciones, el talud resulta 1:4 (1 horizontal para 4 vertical).

Figura 9-12

9.8. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE LLEGADA DEL AGUA

La fórmula de Francis, que considera la velocidad del agua en el canal de acceso, es la siguiente:

$$Q = 1{,}838L\left[\left(H + \frac{V^2}{2g}\right)^{3/2} - \left(\frac{V^2}{2g}\right)^{3/2}\right],$$

Donde V es la velocidad en el canal.

En muchos casos prácticos esa influencia es despreciada. Ella debe ser considerada en los casos en que la velocidad de llegada del agua es elevada, en los trabajos en que se requiere gran precisión, y siempre que la sección del canal de acceso sea inferior a 6 veces el área de flujo en el vertedor (aproximadamente $L \times H$).

9.9. INFLUENCIA DE LA FORMA DE LA VENA

En los vertedores en que el aire no penetra en el espacio W (Fig. 9-7) debajo de la lámina vertiente puede ocurrir una depresión, modificándose la posición de la vena y alterándose el caudal.

Esta influencia se puede verificar en vertedores sin contracciones o en vertedores con contracciones, como el indicado en la Figura 9-13, en los cuales la prolongación de las caras encierra totalmente la vena vertiente, aislando el espacio W. En estas condiciones, la lámina líquida puede tomar una de las siguientes formas:

Cuando se emplea un vertedor para medir caudales, se deben evitar esas condiciones particulares.

a) *Lámina deprimida.* El aire es arrastrado por el agua, ocurriendo un vacío parcial en W, que modifica la posición de la vena. (Fig. 9-14b).

b) *Lámina adherente.* Ocurre cuando el aire sale totalmente (Fig. 9-14c).
En cualquiera de estos casos el caudal es superior al previsto o dado por las fórmulas indicadas.

c) *Lámina ahogada.* Cuando el nivel aguas abajo es superior al de la cresta (Fig. 9-14d).

$$p' > p.$$

En los vertedores ahogados, el caudal disminuye a medida que aumenta la sumersión.

De acuerdo con los datos del U.S. of Board Waterways, el caudal de estos vertederos puede ser estimado teniendo como base los valores relativos a la descarga de los vertedores libres, aplicándose un coeficiente de reducción.

Tabla 9-2 Coeficientes para vertedores ahogados

h/H	Coeficiente	h/H	Coeficiente
0,0	1,000	0,5	0,937
0,1	0,991	0,6	0,907
0,2	0,983	0,7	0,856
0,3	0,972	0,8	0,778
0,4	0,956	0,9	0,621

Siendo h la altura del agua, por encima de la cresta, medida aguas abajo:

$$h = p' - p.$$

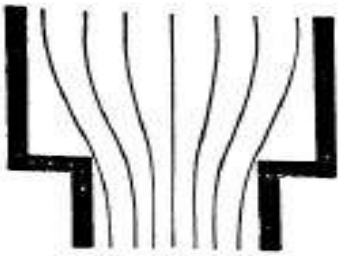


Figura 9-13 (Planta)

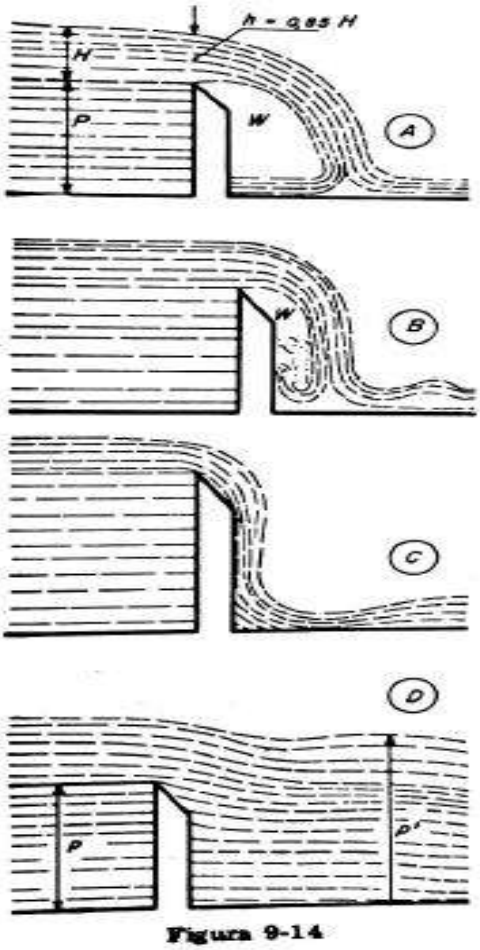


Figura 9-14

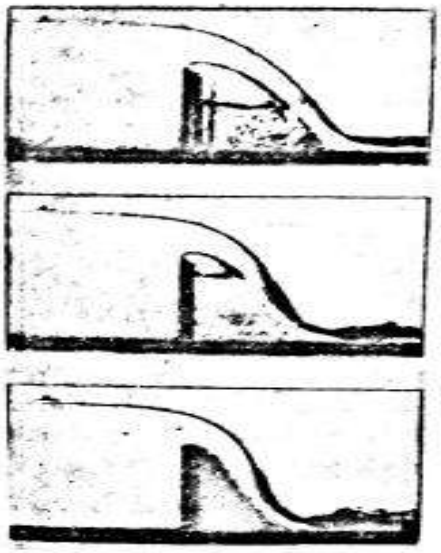


Figura 9-15 Fotografía de laboratorio mostrando la depresión y adherencia de la vena líquida.

Figura 9-16 En los vertedores triangulares no existe la cresta horizontal; la influencia de la velocidad de llegada del agua es depreciable y es perfecta la ventilación de la lámina vertiente.

B.3.2.1.3- VERTEDEROS TRIANGULARES

Los vertedores triangulares hacen posible una mayor precisión en la medida de cargas correspondientes a caudales reducidos. Estos vertedores generalmente son construidos en

placas metálicas. En la práctica, solamente son empleados los que tienen forma isósceles, siendo más usuales los de 90°.

Para estos vertedores, se adapta la fórmula de Thomson:

$$Q = 1{,}4H^{5/2},$$

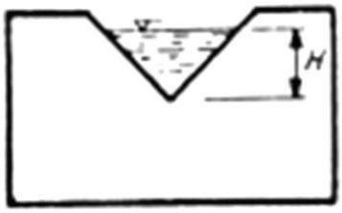


Figura 9-17

donde Q es el caudal en m^3/s y, H es la carga, en m.

El coeficiente dado (1,4), en realidad, puede tomar valores entre 1,40 y 1,46.

La Tabla 9-3 incluye los caudales ya calculados para las cargas más comunes

Tabla 9-3 Vertedores triangulares pared delgada y lisa. Fórmula de Thomson

Altura H, cm	Q, l/s	Altura H, cm	Q, l/s
3	0,14	17	16,7
4	0,42	18	19,2
5	0,80	19	22,0
6	1,24	20	25,0
7	1,81	21	28,3
8	2,52	22	31,8
9	3,39	23	35,5
10	4,44	24	39,5
11	5,62	25	43,7
12	6,98	30	69,0
13	8,54	35	101,5
14	10,25	40	141,7
15	12,19	45	190,1
16	14,33	50	247,5

B.3.2.1.4- VERTEDERO CIRCULAR (EN PARED VERTICAL)

Vertedores de sección circular, aunque se emplean rara vez, ofrecen como ventajas:
a) facilidad de construcción;
b) no requiere el nivelamiento de la cresta.
En unidades métricas, la ecuación del caudal de un vertedor circular es el siguiente:

$$Q = 1{,}518 D^{0{,}693} H^{1{,}807}$$

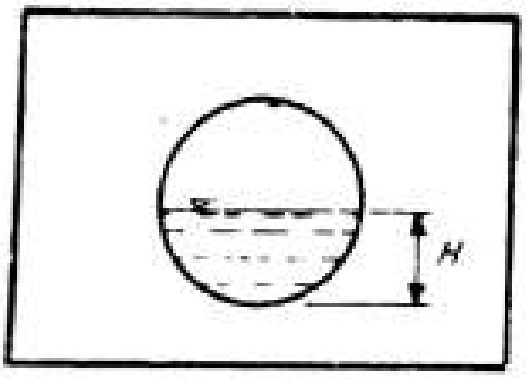


Figura 9-18

B.3.2.1.5- VERTEDERO TUBULAR

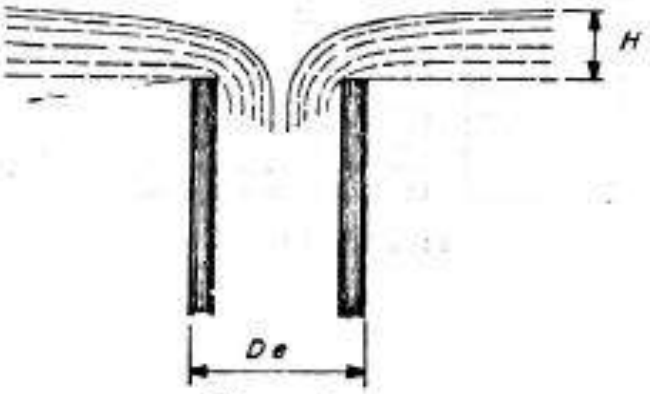


Figura 9-19

Los tubos verticales instalados en tanques, recipientes, depósitos de agua, etc., pueden funcionar como vertedores de la cresta curva, siempre que la carga sea inferior a la quinta parte del diámetro externo:

$$H < \frac{D_e}{5}.$$

En este caso, se aplica una fórmula del tipo:

donde:

$$Q = KLH^n,$$
$$L = \pi D_e.$$

Los experimentos llevados a cabo, en la Universidad de Cornell, muestran que $n = 1{,}42$ y que el coeficiente K depende del diámetro del tubo:

Valores de D_e, m	K
0,175	1,435
0,25	1,440
0,35	1,455
0,50	1,465
0,70	1,515

Para los valores de H, comprendidos entre $1/5\ D_e$ y $3D_e$, el tubo funciona como orificio, con interferencias provocadas por el movimiento del aire (formación de vórtice).

Los tubos verticales, instalados en los depósitos de agua para funcionar como excedencias, presentan las siguientes descargas para esas condiciones de lámina vertiente:

Valores de D, mm	Q, l/s
200	12 a 54
300	32 a 154
400	64 a 320
500	108 a 530
600	174 a 870

B.3.2.1.6- VERTEDEROS PROPORCIONALES

Los vertedores proporcionales son construidos con una forma especial, para la cual el caudal varía proporcionalmente a la altura de lámina líquida (primera potencia de H). Por eso también se denominan vertedores de ecuación lineal.

Se aplican ventajosamente en algunos casos de control de las condiciones de flujo en canales, particularmente en canales de sección rectangular, en plantas de tratamiento de aguas negras, etc.

B.3.2.1.6.1- VERTEDEROS PROPORCIONALES SUTRO Y RETTGER

Vertedor Sutro

$$Q = 2{,}74 \sqrt{ab}\left(H - \frac{a}{3}\right) = 2{,}74\, b \sqrt{a}\left(H - \frac{a}{3}\right)$$

Q = Caudal, m^3/s;
a = altura mínima, m;
b = ancho de la base, m;
H = altura del agua, m.

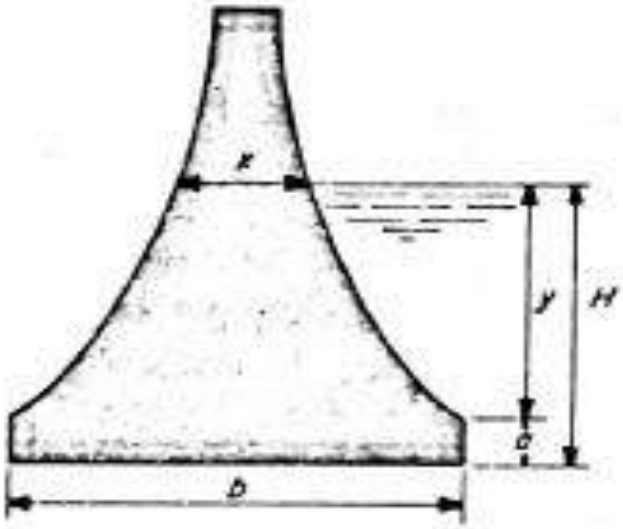


Figura 9-23

La forma de las paredes del vertedor es dada por:

$$\frac{x}{b} = 1 - \frac{2}{\pi} \operatorname{arc\,tg} \sqrt{\frac{y}{a}}.$$

La Tabla siguiente facilita los cálculos.

Tabla 9-5

y/a	x/b	y/a	x/b	y/a	x/b
0,1	0,805	1,0	0,500	10,0	0,195
0,2	0,732	2,0	0,392	12,0	0,179
0,3	0,681	3,0	0,333	14,0	0,166
0,4	0,641	4,0	0,295	16,0	0,156
0,5	0,608	5,0	0,268	18,0	0,147
0,6	0,580	6,0	0,247	20,0	0,140
0,7	0,556	7,0	0,230	25,0	0,126
0,8	0,536	8,0	0,216	30,0	0,115
0,9	0,517	9,0	0,205	35,0	0,107

B.3.2.1.6.2- VERTEDERO PROPORCIONAL DI RICO

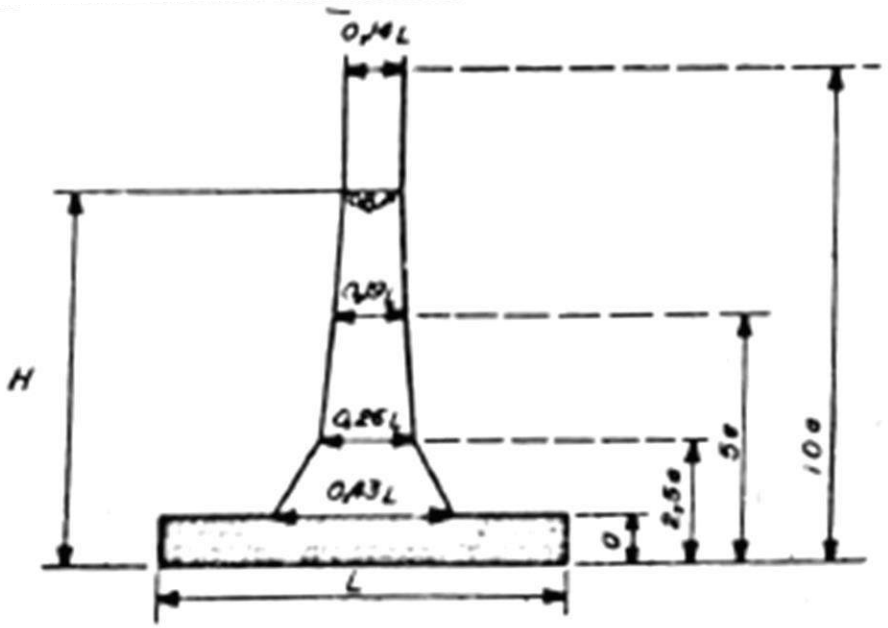


Figura 9-24

Vertedor de Di Ricco (Forma aproximada)

$$Q = KL\sqrt{a}\left(H + \frac{5}{8}a\right).$$

Expresión válida para láminas comprendidas entre 2,5a y 10a y para

$$\frac{10}{3} \leq \frac{L}{a} \leq 25,$$

L, *H* y *a* se expresan en metros

Tabla 9-6 Valores de K

L/a	3	5	7	10	15	20
K	2,094	2,064	2,044	2,022	1,997	1,978

B.3.2.2- VERTEDEROS DE PAREDES GRUESAS

Un vertedor es considerado de pared gruesa, cuando la cresta es suficientemente gruesa, para que en la vena adherente se establezca el paralelismo de los filetes.

Aplicando la expresión de Torricelli:

$$V = \sqrt{2g(H - h)},$$

y

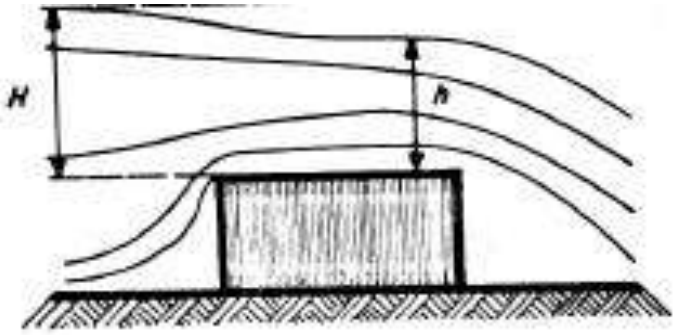
$$Q = Lh\sqrt{2g(H - h)} \qquad (1)$$

o para el ancho unitario $L = 1$

$$Q = \sqrt{2g(H\,h^2 - h^3)}.$$

Principio del Caudal Máximo, de Belanger: "La altura h se establece de forma que ocasione un caudal máximo". Con base en este principio, se puede investigar el valor máximo de Q:

Figura 9-20



Derivando $Hh^2 - h^3$ e igualando a cero

$$2H\,h - 3h^2 = 0,$$

$$2H = 3h.$$

Sustituyéndose este valor en (1):

$$h = \frac{2}{3}H,$$

$$Q = L\frac{2}{3}H\sqrt{2g\frac{1}{3}H},$$

$$Q = \frac{2}{3}\sqrt{\frac{2g}{3}}L\,H^{3/2},$$

$$\boxed{Q = 1{,}71\,L\,H^{3/2}},$$

Expresión confirmada en la práctica.

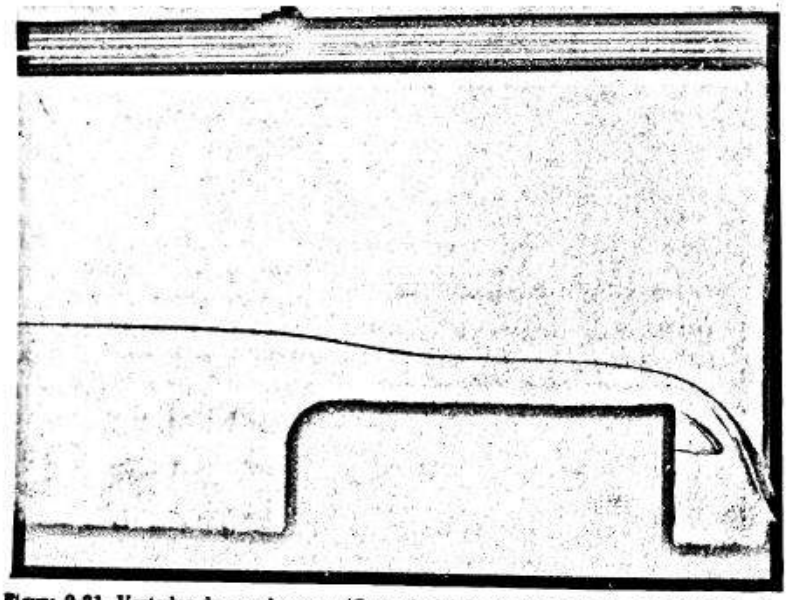


Figura 9-21. Vertedor de pared gruesa, (Cortesía del Centro Tecnológico de Hidráulica de Sao Paulo, Brasil).

B.3.2.2.1- VERTEDEROS DE EXEDENCIAS

En el trazado de la sección transversal de las obras de excedencias, o en el estudio del perfil de los propios diques, que funcionan ahogados, se busca adoptar la forma más satisfactoria, teniéndose en cuenta el flujo de la lámina vertiente.

La forma ideal es aquella que favorece el caudal o descarga y que al mismo tiempo, impide la eventualidad de efectos nocivos a la estructura, tales como el vacío parcial, las pulsaciones de la vena, las vibraciones, etc.

Tabla 9-4 Perfil de Creager

x	y	x	y	x	y
0.0	0.126	0.6	0.060	1.7	0.870
0.1	0.036	0.8	0.142	2.0	1.220
0.2	0.007	1.0	0.257	2.5	1.960
0.3	0.000	1.2	0.397	3.0	2.820
0.4	0.007	1.4	0.565	3.5	3.820

El trazado de la cresta debe ser hecho para el caudal máximo esperado, o sea, para la mayor carga admisible (carga de diseño).

De acuerdo con las experiencias de Creager y Escande, pueden ser adoptados los valores de la Figura 9-22 para una carga $H = 1\ m$. Para otros valores de H, basta multiplicar las coordenadas indicadas por los mismos. En las condiciones ideales de proyecto, se puede aplicar la siguiente expresión:

$$Q \cong 2{,}2 L H^{3/2}.$$

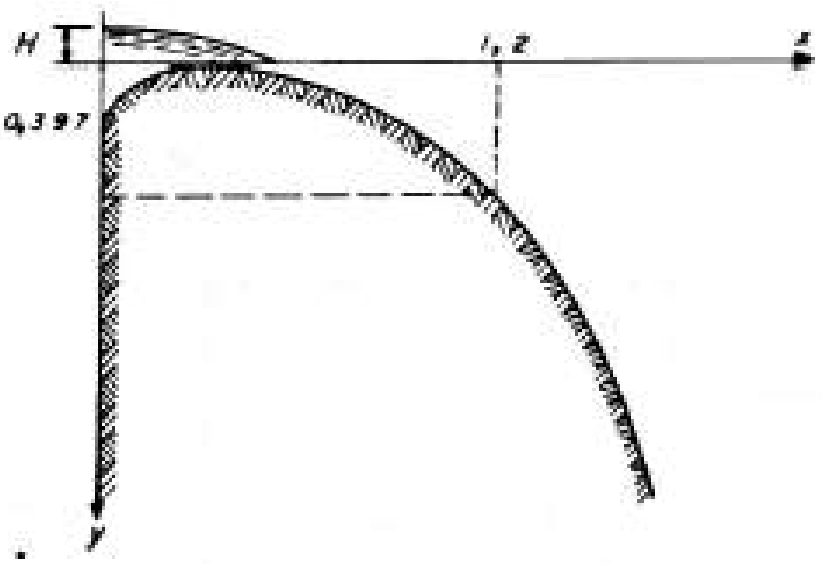


Figura 9-22

B.3.3- MEDIDORES DE RÉGIMEN CRÍTICO (CANALETA PARSHALL)

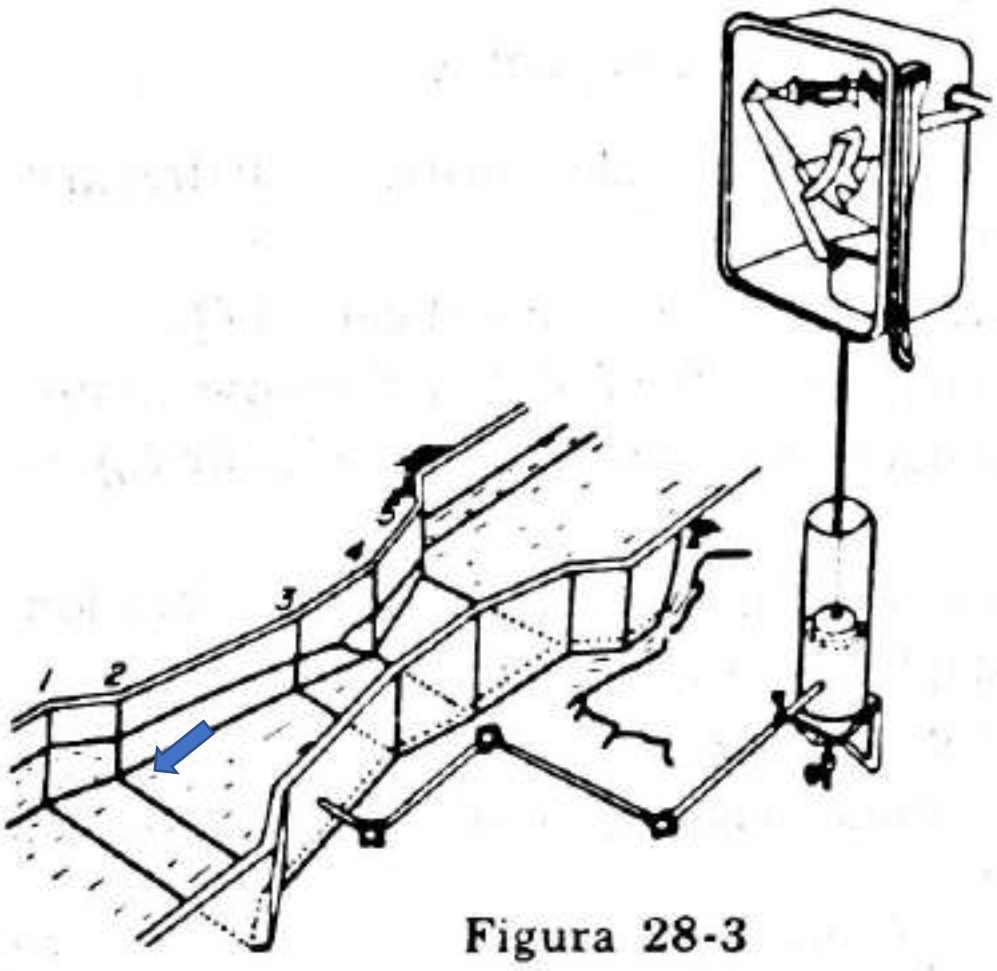


Figura 28-3

Los medidores de régimen crítico pueden consistir en un simple estrechamiento adecuado de sección, en el rebajamiento o en la elevación del fondo, o aún, en una combinación conveniente de estas singularidades, capaz de ocasionar el régimen crítico.

Hay una gran variedad de medidores de este tipo, siendo bastante conocidos los *medidores Parshall*.

Los medidores Parshall son constituidos por una sección convergente, una sección estrecha y una sección divergente, dispuestas conforme muestra la Figura 28-3.

Los medidores Parshall son muy indicados para la medida del caudal de alcantarillas, por el hecho de no presentar aristas vivas u obstáculos a la corriente líquida.

Como la pérdida de carga es relativamente pequeña, su empleo tiende a generalizarse.

Es un medidor que se incluye entre los de régimen crítico, siendo idealizado por R. L. Parshall, ingeniero del Servicio de Irrigación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Consiste en una sección convergente, una sección de paredes verticales paralelas llamada garganta y una sección divergente, dispuestas en planta, como muestra la Figura 29.2.

Los medidores Parshall son indicados nominalmente, por el ancho de la garganta; así, un Parshall de 9 pulgadas mide 0,23 m en la menor sección transversal.

El fondo a nivel en la primera sección, es inclinado en la garganta con un declive de 9 vertical: 24 horizontal, cualquiera que sea su tamaño.

En la sección divergente, el fondo es ascendente a razón de 1 vertical: 6 horizontal en el caso de los medidores de 1 a 8 pies. Para esos medidores, la diferencia de nivel entre aguas arriba y el extremo aguas abajo es de 3 pulgadas (7,6 cm).

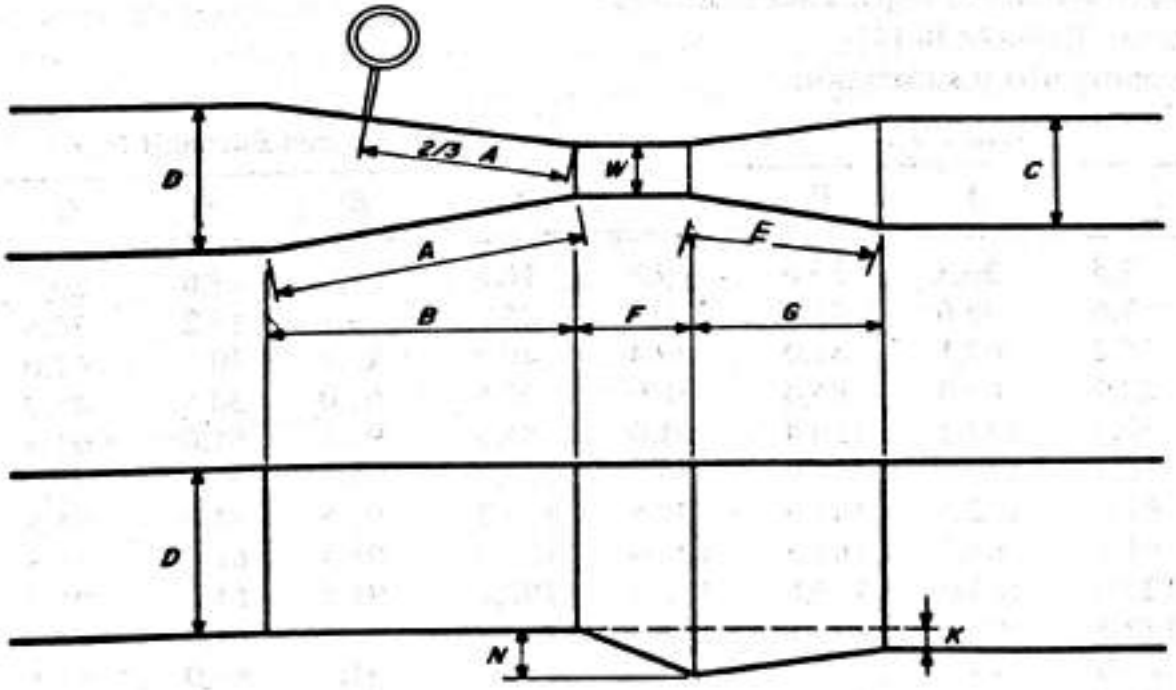


Figura 29-2

29.4.2. *CONDICIONES DE DESCARGA*

El flujo a través de un medidor Parshall se puede verificar en dos condiciones diferentes, que corresponden a dos regímenes distintos:

a) flujo o descarga libre;

b) ahogamiento o sumersión.

Tabla 29-1. Dimensiones típicas de medidores Parshall (cm)

W		*A*	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	*G*	*K*	*N*
1″	2,5	36,3	35,6	9,3	16,8	22,9	7,6	20,3	1,9	2,9
3″	7,6	46,6	45,7	17,8	25,9	38,1	15,2	30,5	2,5	5,7
6″	15,2	62,1	61,0	39,4	40,3	45,7	30,5	61,0	7,6	11,4
9″	22,9	88,0	86,4	38,0	57,5	61,0	30,5	45,7	7,6	11,4
1′	30,5	137,2	134,4	61,0	84,5	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
$1^{1/2}$′	45,7	144,9	142,0	76,2	102,6	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
2′	61,0	152,5	149,6	91,5	120,7	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
3′	91,5	167,7	164,5	122,0	157,2	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
4′	122,0	183,0	179,5	152,5	193,8	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
5′	152,5	198,3	194,1	183,0	230,3	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
6′	183,0	213,5	209,0	213,5	266,7	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
7′	213,5	228,8	224,0	244,0	303,0	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
8′	244,0	244,0	239,2	274,5	340,0	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
10′	305,0	274,5	427,0	366,0	475,9	122,0	91,5	183,0	15,3	34,3

B.3.4- QUÍMICOS, COLORIMÉTRICOS Y RADIACTIVOS

Son similares a los indicados para Escurrimientos a Presión

B.3.5- FLOTADORES

Consisten en objetos flotantes que adquieren la velocidad del agua que los circundan. Pueden ser de tres tipos.

a) *Simples o de superficie.* El inconveniente presentado por este flotador se debe al hecho de ser muy influido por el viento, por las corrientes secundarias y por las olas.

b) *Dobles o subsuperficiales.* Constituyen un pequeño flotador de superficies, al cual está unido por una cuerda un cuerpo sumergido, a la profundidad deseada. Se hace

que el volumen del primero sea despreciado frente al segundo. En estas condiciones, manteniéndose el cuerpo sumergido cerca de seis décimos de la profundidad, se determina la velocidad media (Fig. 28-23b).

c) *Bastones flotadores o flotadores lastrados.* Son tubos metálicos huecos o de madera, que tienen en la parte inferior un lastre de plomo para que flote en una posición próxima a la vertical (Fig. 28-23c). L debe ser igual aproximadamente a 0,95 H.

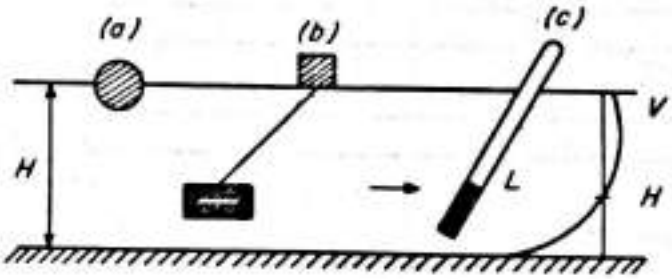


Figura 28-23

Francis presentó la siguiente fórmula:

$$V_{med} = V_{obs}\left(1{,}02 - 0{,}116\sqrt{1-\frac{L}{H}}\right),$$

válida para $\frac{L}{H} > \frac{3}{4}$,

H = profundidad del canal
L = extensión del bastón

Observación general. Actualmente, los flotadores rara vez son usados para mediciones precisas debido a muchas causas de errores (causas perturbadoras como los vientos, irregularidades del lecho del curso del agua, etc.). Son sólo empleados para determianciones rápidas y a falta de otros recursos.

Aplicación. Se elige un tramo rectilíneo del curso de agua de sección regular. Se extienden dos cuerdas de lado a lado, a una distancia de 25 a 50 m. Se divide transversalmente el curso del agua, en varias secciones. Se sueltan los flotadores, midiéndose el tiempo que se empleó en el trayecto. Siempre que un flotador se desvía de su curso, se abandona la lectura y se repite el lanzamiento. La sección del lecho del curso del agua es determinada por medio de medidas con regla graduada o por medio de sondeos.

$$Q = A_1 V_1 + A_2 V_2 + A_3 V_3 + \cdots$$

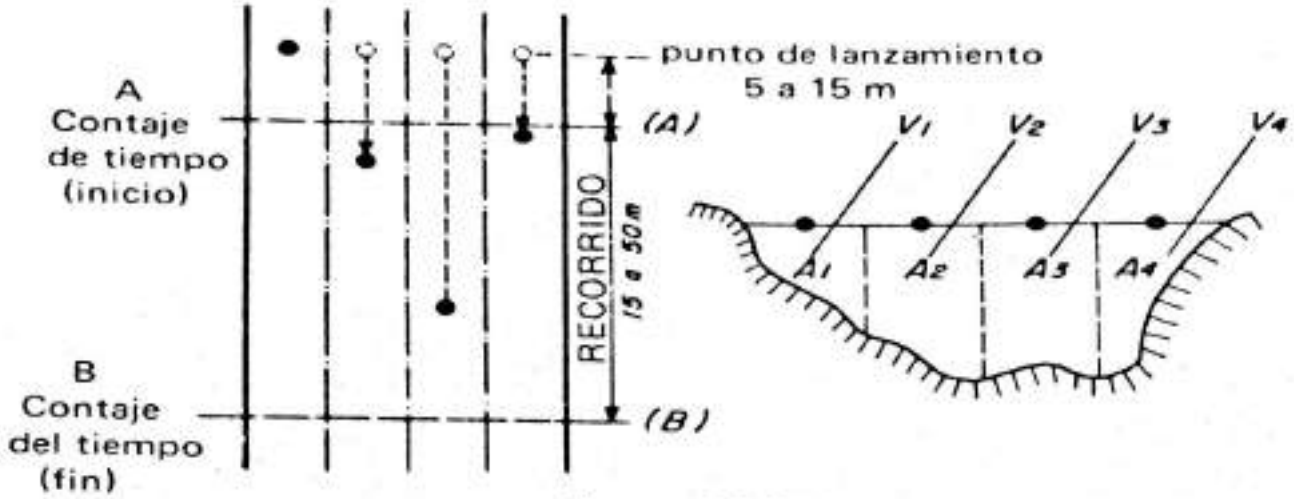
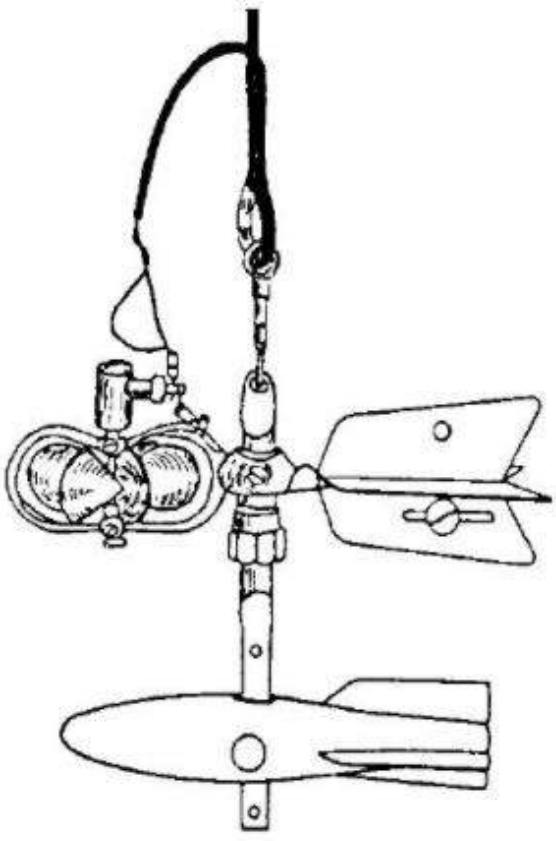
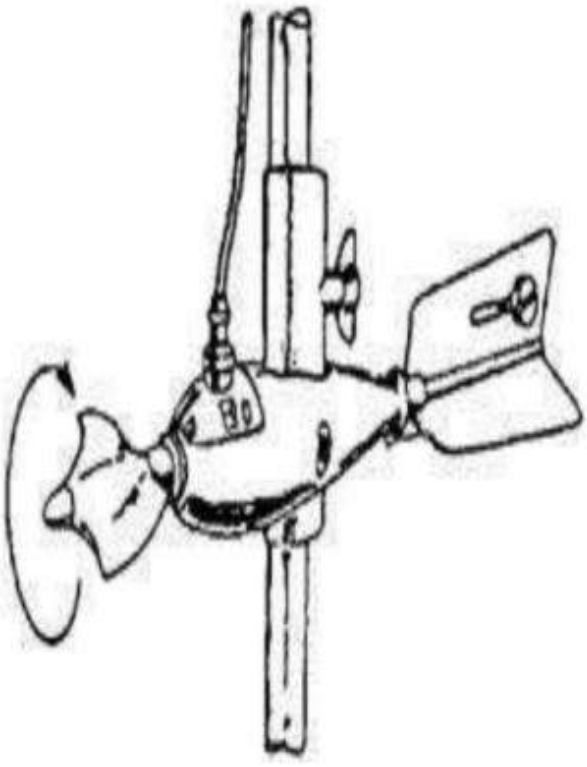


Figura 28-24

B.3.6- MOLINETE HIDROMÉTRICO O CORRENTÓMETRO

El Correntómetro o Molinete es un dispositivo que posee un rotor en forma de hélice, con eje horizontal, o constituido por una serie de cazoletas (Pigmy), con eje vertical, los cuales giran al estar en contacto con una corriente de agua, siendo el número de revoluciones proporcional a la velocidad de la corriente. Los molinetes pueden disponerse montados en soportes o suspendidos de cables.





Cada molinete viene calibrado de fábrica y acompañado de una tabla o ecuación, donde se relaciona la velocidad angular de la rueda giratoria con la velocidad de la corriente. Un molinete debe calibrarse una vez al año y también después de cada accidente que sufra o de cualquiera alteración de sus partes que pueda cambiar su graduación.

En las corrientes superficiales se montan pequeños molinetes sobre barras que sostienen operarios que caminan por el agua. Cuando hay que medir caudales de una avenida en grandes ríos, las lecturas se toman desde un puente o instalando un cable suspendido por encima del nivel máximo de la avenida; el molinete se baja por medio de cables con pesas para retenerlo contra la corriente del río.

Cuanto mayor sea el número de registros realizados en un mismo punto de aforo, más confiable será la apreciación de la velocidad medida; por lo mismo, se sugiere explotar las velocidades de corriente en diferentes puntos igualmente espaciados sobre el espejo del agua.

Un molinete mide la velocidad en un único punto, es por esto que, para calcular el caudal total se deben realizar varias mediciones. Según sea el grado de precisión que se quiera obtener en el aforo, se tomarán mayor o menor número de puntos de medida en la sección. Cuando se pretende obtener una alta precisión, se elegirán mayor número de verticales en la sección y se calculará la velocidad media en cada vertical. El número de revoluciones por intervalo de tiempo se transforma a velocidad de la corriente consultando la tabla del instrumento o su ecuación respectiva.

AFOROS LÍQUIDOS DE CURSOS DE AGUA

Aforar una corriente de agua es determinar en un momento dado el valor del caudal. A esta operación se la llama aforo y comprende a todas las Tareas de Campo y Gabinete que nos permiten determinar el caudal que pasa por una sección. A su vez, a la/s persona/s que la realiza/n, se la/s llama Hidromensor/es, o mas vulgarmente, Aforador/es.

Los métodos para hacer el aforo de un río, son: a) Sección de control, b) Relación sección-pendiente y c) Relación sección-velocidad.

a) SECCIÓN DE CONTROL

Tiene en cuenta las leyes que opera la hidráulica con un fluido como el agua. Es el más exacto, en especial para caudales bajos. Debe tener una sección de control donde se manifieste una energía específica, que es la mínima para escurrimiento del río, energía que se manifiesta por el tirante y la altura de velocidad. Esto produce el tirante crítico, que se puede provocar artificialmente en el cauce de un río, elevando el fondo del cauce, estrechando las márgenes de la sección, o combinando ambas modificaciones.

Las secciones artificiales construidas pueden ser vertederos, que son de pared delgada para caudales mínimos menores a 0,5 m3/s, y de pared gruesa para caudales mayores, con secciones de paso triangular o rectangular. Con la ecuación $Q = C * L * H^{3/2}$, se puede calcular el escurrimiento del río, con C coeficiente de contracción del vertedero, L ancho del vertedero y H altura de agua.

b) RELACIÓN SECCIÓN - PENDIENTE

Parte el análisis de la fórmula de velocidad propuesta por Manning: V = 1/n * R^⅔ * S^½, donde n es el coeficiente de rugosidad de Manning, R radio hidráulico y S pendiente del pelo de agua.

Requiere de un tramo del río lo mas recto posible, uniforme en la conformación de la sección de escurrimiento, dos secciones específicas y la medición de la altura hidrométrica del río en el lugar.

Con el promedio de las 2 secciones y los 2 radios hidráulicos, calculando la pendiente con el desnivel de agua dividido la longitud de separación entre secciones, y considerando que el delta h es la suma de la altura de agua mas altura de velocidad mas la altura de turbulencia, despreciando estas últimas por poca significación, se puede calcular el caudal multiplicando la sección de escurrimiento promedio por la velocidad según Manning.

La precisión se obtiene con una buena elección del coeficiente de rugosidad n.

c) RELACIÓN SECCIÓN - VELOCIDAD

Es el más usado de los métodos de aforos. El análisis parte de la ecuación Q = S * V (caudal = sección * velocidad).

Se puede realizar en forma expeditiva y aproximada mediante flotadores ó, en forma más exacta, con molinetes.

c.1) ESTIMACIÓN DE VELOCIDAD CON FLOTADORES

Es un método muy utilizado en determinaciones expeditivas. Es sencillo y prácticamente no requiere equipo especial alguno.

Es preciso tener en claro que se debe realizar aforos con flotadores:

- En aquellos casos en que por circunstancias imprevistas sea imposible realizar el aforo por métodos más confiables.
- Cuando es posible utilizar los datos en forma aproximada.
- Cuando la premura impide hacer el aforo por otro método (caso de una onda de crecida, por ejemplo).

El tramo donde se va a realizar el aforo debe ser lo más recto y uniforme posible, libre de cualquier obstáculo que pueda frenar a los flotadores (ramas de árboles, vegetación acuática, etc.), y cuya longitud sea no menor a seis veces el ancho del cauce.

Al ser este un caso especial en que para la determinación de la velocidad del agua se trabaja en un cierto tramo del curso, no específicamente en una sección, hay que tomar como sección de escurrimiento la media del tramo. Hay que delimitar claramente la sección de entrada y la de salida, con la longitud que las separa.

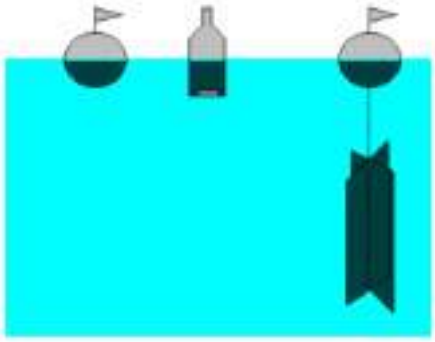
La velocidad media del tramo se determinará de acuerdo al tipo de flotador usado: superficiales o sumergidos. Los flotadores superficiales dan directamente la velocidad superficial, que para transformarla en velocidad media de la vertical hay que afectarla por un coeficiente:

Vmedia vertical = 0,85 x Vmedia superficial

esto hay que corroborarlo, ya que no siempre es constante ese coeficiente (varía entre 0,80 y 0,95).

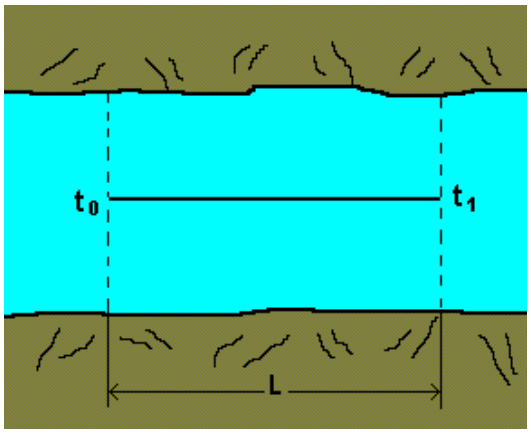
El flotador puede ser una simple madera o una botella lastrada, teniendo el inconveniente de que cuando hay viento durante las mediciones, éstas pueden verse afectadas, por ello la mayor parte del flotador debe estar hundida.

En el caso de los flotadores sumergidos, compuestos por un flotador superficial unido a una pantalla, de tal manera que la misma ofrezca una resistencia uniforme a la corriente horizontal del agua, o también pueden ser listones de maderas lastradas, no deben afectarse por el coeficiente anterior, pues ya lo llevan implícito. Éstos andan muy bien en canales o cauces uniformes, no para superficies de fondo irregulares donde los flotadores pueden trancarse:



Un método sumamente expeditivo consiste en arrojar a un curso de agua flotadores superficiales y tomar el tiempo que tardan en recorrer la longitud L que existe entre las dos secciones de paso anteriormente determinadas.

Para ello se arrojan las botellas lastradas unos 5 a 10 m aguas arriba de la sección inicial. Cuando el flotador pasa por esa sección inicial se pone en marcha el cronómetro (t0 = 0), parándolo cuando pasa por la sección final (t1):



La botella que demora menos tiempo se la toma para el cálculo de la velocidad máxima superficial:

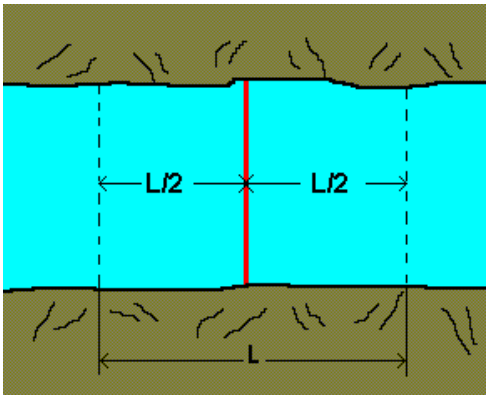
Vmáxima superficial = L / t1

Luego se transforma a la velocidad máxima superficial en velocidad media de la sección a través de un coeficiente:

Vmedia sección = coeficiente x Vmáxima superficial

Este coeficiente no es muy estable, tomando valores desde 0,55 a 0,90, por lo cual periódicamente se lo debe corroborar con métodos más precisos.

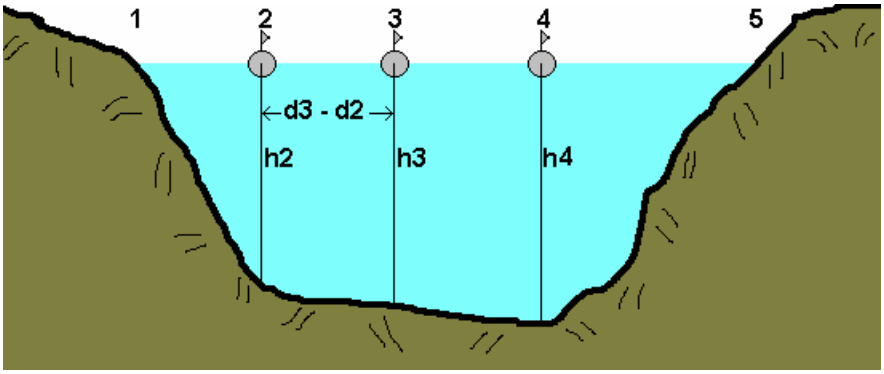
Se asume como sección media a la que se encuentra a la mitad de L:



Quedando:

Q = cfte. X Vmáxima superficial x Sección media

Si el curso de agua tiene un ancho considerable, o se requiere mayor precisión, se trabajará con más de un flotador:



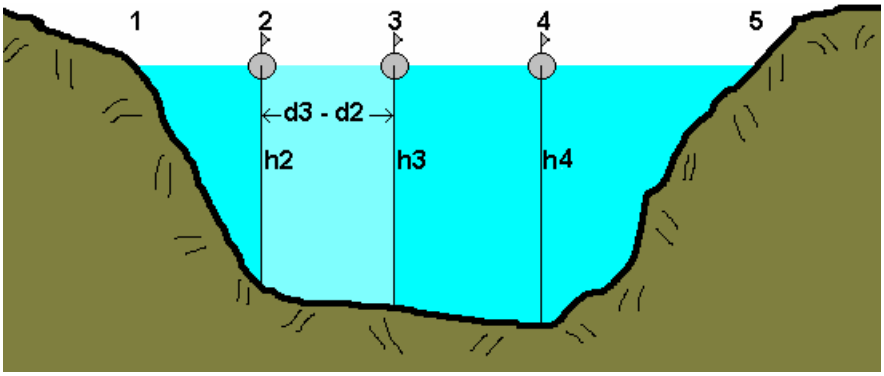
En este caso particular, supongamos que trabajaremos con 3 flotadores. El mismo trabajo que se hizo para el método expeditivo se realiza aquí, pero ahora se particiona la sección transversal en cuatro secciones más pequeñas, para tener mayor precisión. Se medirá cada una de las distancias horizontales:

d2: comprendida entre la orilla (1) y el primer flotador.
d3: comprendida entre la orilla (1) y el segundo flotador.

d4: comprendida entre la orilla (1) y el tercer flotador.
d5: comprendida entre la orilla (1) y la orilla (5), que es el ancho del cauce.

con sus respectivas profundidades (h2, h3 y h4) para cada uno de los flotadores.

El cálculo del caudal consiste ir haciéndolo en cada una de estas divisiones de la sección total, y por último sumar cada uno de estos valores. Por ejemplo, para calcular el caudal que pasa entre el primer y segundo aforador (2 y 3), que llamaremos Q2-3 se calcula:



La velocidad media entre esos dos flotadores es:

$$V_{media\ 2\text{-}3} = (V_{media\ vertical\ 2} + V_{media\ vertical\ 3}) / 2$$

La sección entre esos dos flotadores es:

$$S_{2\text{-}3} = (d_3 - d_2) \times (h_2 + h_3) / 2$$

Por lo tanto, el caudal que pasa entre 2 y 3 es:

$$Q_{2\text{-}3} = V_{media\ 2\text{-}3} \times S_{2\text{-}3}$$

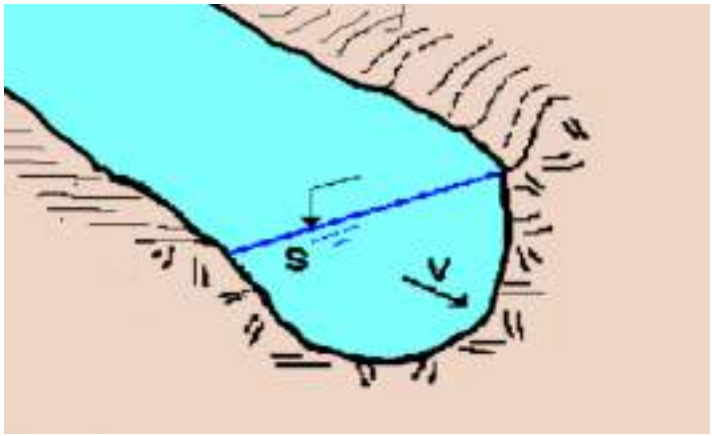
De igual manera se trabaja en las otras divisiones, siendo un caso especial las orillas (1 y 5) donde se trabaja exactamente igual asumiendo que:

$d_1 = 0$ $h_1 = 0$ $V_{media\ vertical\ 1} = 0$ $h_5 = 0$ $V_{media\ vertical\ 5} = 0$

c.2) MEDICIÓN DE VELOCIDAD CON MOLINETES

El caudal depende directamente de la superficie (S) de la sección transversal de la corriente de agua y de la velocidad media del agua (V), obteniéndose el caudal o gasto (Q) por medio de la multiplicación de ambos factores:

$$Q = S \times V$$

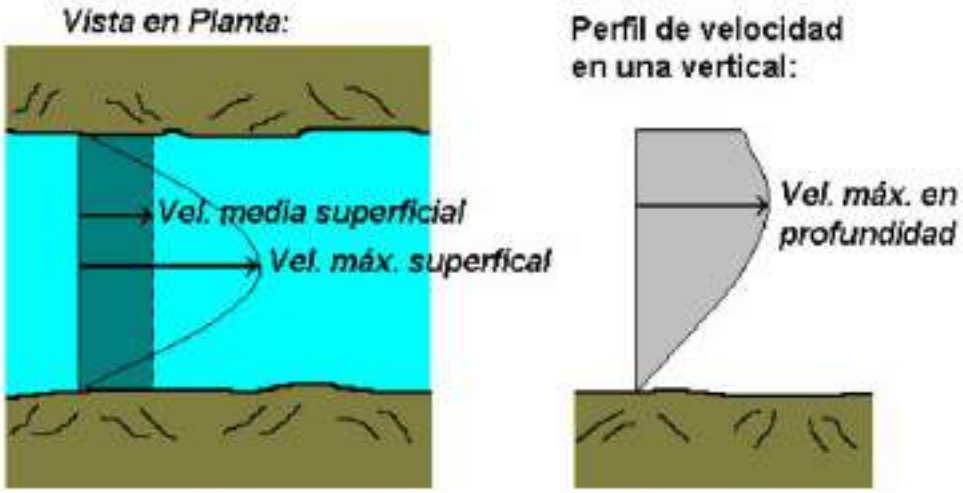


La superficie de la sección transversal de la corriente, como su velocidad, varían con la altura de agua (tirante), por lo cual, una vez conocida esa relación, pueden obtenerse los caudales por medio de las alturas de agua registradas en escalas colocadas en forma apropiada.

De allí la importancia de relacionar la altura del agua con el caudal, ya que resulta más práctico y rápido medir la primera que el segundo. Esta relación periódicamente debe ser revisada y, si es necesario, actualizada.

La determinación de la velocidad se realiza en la misma sección transversal, cuando se trabaja con molinete hidrométrico. Es de suma importancia para el Hidromensor conocer la distribución de las velocidades en la sección de aforo, cuya distribución no es uniforme.

Normalmente, va aumentando de las orillas hacia el centro y, en una misma vertical, va creciendo a partir de la superficie hacia abajo hasta alrededor de 0,2 (20 %) de la profundidad, para luego ir decreciendo hasta el fondo:

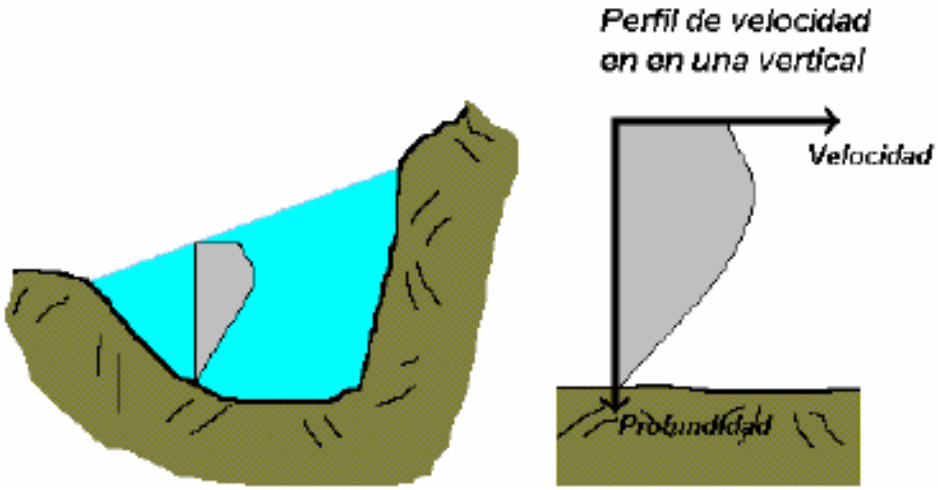


El punto de máxima velocidad se encuentra generalmente en las proximidades del centro del cauce y a 0,2 ó 0,3 de la profundidad.

Cuanto más profundidad tenga en la vertical y flujo no uniforme, mayor número de mediciones por vertical se deberá hacer.

En todos los casos (cualquiera sea la cantidad de puntos que se adopte en la vertical), lo que se pretende hacer es transformar velocidades puntuales medidas con el molinete en la media o promedio de esa vertical.

El más preciso es el método de los puntos múltiples, consiste en medir en la vertical cada 10 % de la profundidad , más la medición en superficie y la de fondo. La distancia mínima entre punto y punto está dada por el diámetro de la hélice. Este método permite dibujar con mayor definición la curva de velocidades en la vertical, que por lo general tiene esta forma:



Se lo utiliza como método patrón, pero tiene el inconveniente de que se necesitan muchos puntos de medición, es decir, que se incrementa mucho el trabajo de campo y también de gabinete.

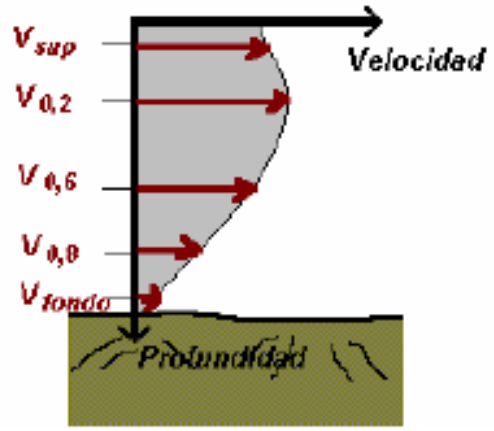
Se ha simplificado este método para distintas circunstancias: método de los 5 puntos, de los 3 puntos, de los dos puntos, de un punto y de la velocidad superficial.

El método de los 5 puntos se aplica normalmente a ríos, cuya fórmula es:

$$V_{\text{media vertical}} = (V_{\text{superficial}} + 3\,V_{0,2} + 2\,V_{0,6} + 3\,V_{0,8} + V_{\text{fondo}}) / 10$$

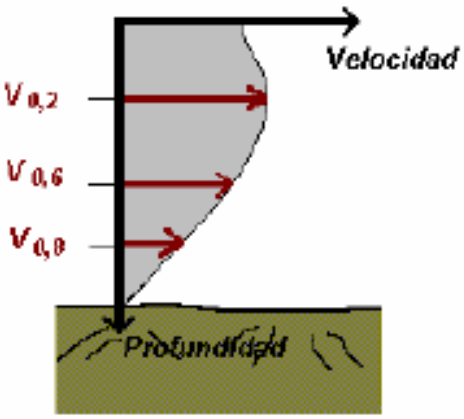
donde:

$V_{superficial}$ = velocidad superficial, es aquella medida cuando el agua justo tapa la hélice totalmente (no tiene que quedar ninguna parte de la hélice fuera del agua).
$V_{0,2}$ = Velocidad medida ubicando el centro de la hélice al 20 % de la profundidad. Siempre midiendo desde la superficie del agua hacia el fondo.
$V_{0,6}$ = Velocidad medida al 60 % de la profundidad.
$V_{0,8}$ = Velocidad medida al 80 % de la profundidad.
V_{fondo} = Velocidad de fondo, medida lo más cerca posible del fondo, sin que la hélice choque con el piso.



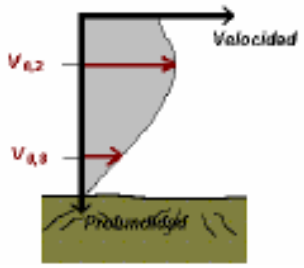
El método de los 3 puntos se aplica también en ríos, así como también en canales y acequias. Se utiliza mucho en canales de riego cuando se quiere tener mucha precisión. Su fórmula es una simplificación de la anterior:

$$V_{media\ vertical} = (V_{0,2} + V_{0,6} + V_{0,8}) / 3$$



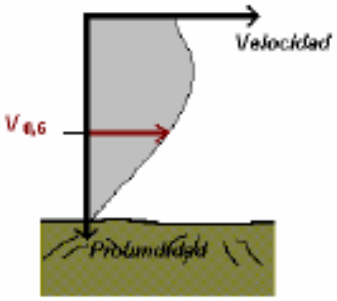
El método de los 2 puntos consiste en asumir que la media vertical es el promedio entre las mediciones hechas al 20 % y al 80 %:

$$V_{media\ vertical} = (V_{0,2} + V_{0,8}) / 2$$



El método de 1 punto supone que la velocidad media de la vertical está a 0,6 de la profundidad:

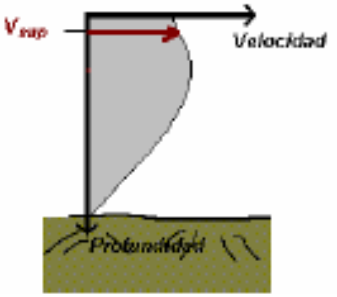
$$V_{media\ vertical} = V_{0,6}$$



Anda muy bien para aforos en canales o acequias uniformes de poca profundidad, sobre todo si son revestidos.

El método de la velocidad superficial consiste en asumir que la velocidad media en la vertical se la calcula con la velocidad superficial afectada por un coeficiente:

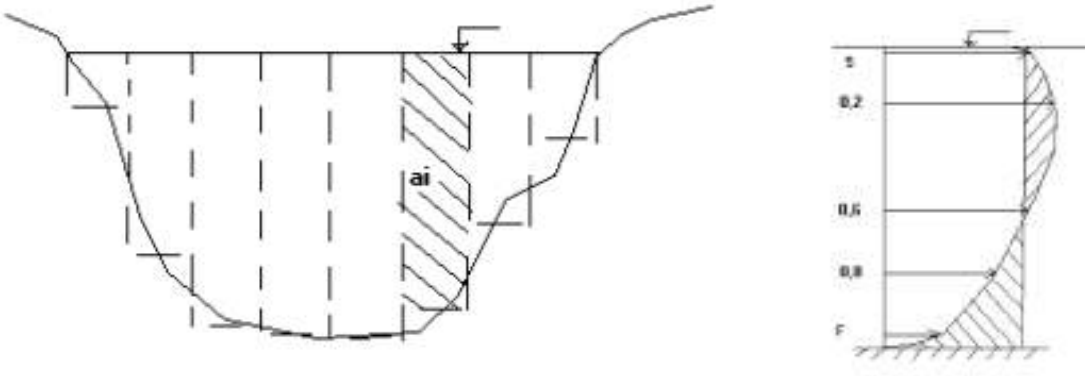
$$V_{media\ vertical} = V_{superficial} * \mathbf{coeficiente}$$



Es el método menos preciso (no es recomendable), no sólo porque requiere un coeficiente para transformar la velocidad superficial en media vertical, sino porque ese coeficiente no es muy estable (varía). Por lo general el coeficiente es 0,85.

Si se unen todos los puntos de igual velocidad se obtienen las curvas isotaqueas:

Para realizar el aforo debe tenerse una estación de aforos, que contiene una sección de medición donde se materializa el aforo, una escala hidrométrica para relacionar las alturas de agua en el momento del aforo, y un control de que esa estación de aforo sea una sección donde se asegure que la relación altura – caudal sea directa, y no que para una misma altura se manifiesten dos caudales, posibilitando la relación H – Q en todas las alturas de agua del río.



El cálculo de caudal se llega midiendo la sección haciendo una batimetría, y subdividiendo la sección en áreas parciales donde se mide la profundidad en tramos separados un 10 % del ancho total.

Para cada profundidad se asigna la superficie de escurrimiento equidistante con las demás profundidades, y la suma de todas da el área transversal total de escurrimiento.

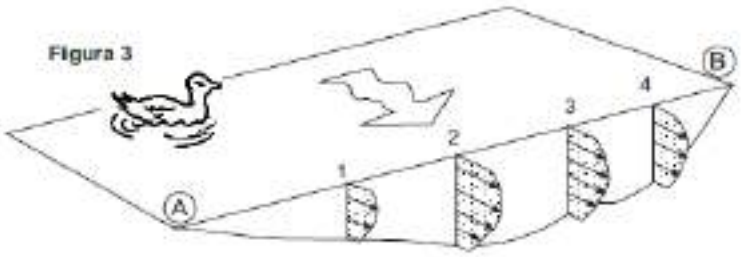
En los mismos sitios de medición de profundidades a través de un molinete, se mide la velocidad de escurrimiento del agua con el molinete paralelo al escurrimiento y perpendicular a la sección de paso, a distintas profundidades que en su modo mas completo implica medir en superficie, a 0,2 h, 0,6 h, 0,8 h y en el fondo, siendo h la profundidad de la vertical.

El gráfico de la profundidad con las velocidades citadas se llama curva de velocidades de la vertical. Luego se calcula la velocidad promedio de cada vertical y los caudales parciales multiplicando la velocidad media de cada vertical por el área parcial, y sumando todas, da el caudal total de escurrimiento por la sección donde se realiza el aforo.

El molinete está compuesto por un cuerpo principal que en su parte delantera tiene a la hélice, elemento que gira con la oposición que le genera la velocidad del agua y debe ser contada la cantidad de vueltas que registra en un plazo determinado de tiempo, con un contador digital. Previamente el fabricante ha entregado las ecuaciones que calculan la velocidad en base al número de revoluciones de la hélice.
El aforo por molinete requiere del siguiente instrumental de campaña: Molinete, cuyo elemento medidor de la velocidad es una hélice o una cazoleta, puede estar suspendido en el agua por cable accionado por un torno, o si la profundidad es menor por una barra fija apoyada en el fondo de la sección. En el primer caso es un aforo por pasarela y el segundo por vadeo.
Según sea el caso y la sección de aforo se requiere una alcantarilla o un puente, vagonetas colgadas de un cable entre torres a ambas márgenes del río, o una embarcación.
En el caso de altas velocidades de escurrimiento y profundidades importantes, el molinete es arrastrado por la corriente, y como la medición de la velocidad debe realizarse sobre una profundidad perfectamente vertical, se requiere el auxilio de contrapesos o escandallos de distintos pesos, variables entre 5 y 50 kilos.
Cuando aún así la velocidad del agua arrastra el molinete se debe hacer una corrección de la medición de la profundidad teniendo en cuenta el ángulo de arrastre.

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.

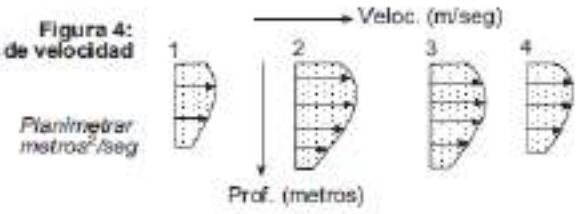
Figura 3



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

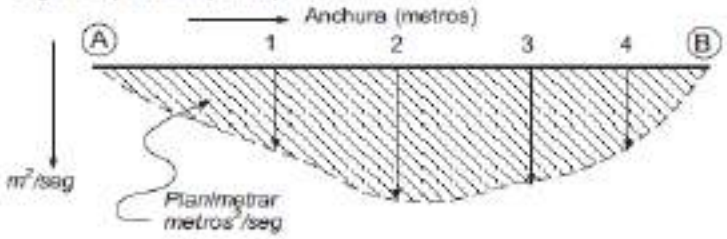
1ª) Se dibujan a escala los perfiles de corriente correspondientes a cada vertical donde se midió con el molinete (Figura 4). Se planimetra cada uno de los perfiles. Como en horizontal están las velocidades en m/seg y en vertical la profundidad en metros, la superficie planimetrada en cada perfil estará en m²/seg.

Figura 4:
Perfiles de velocidad



2ª) Se dibuja una vista en planta del cauce, en abcisas la anchura del mismo, señalando los puntos exactos donde se midió, y en ordenadas los vectores en m²/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 m²/seg: el producto en m³/seg).

Figura 5 (Vista en planta)



Aforo con molinete

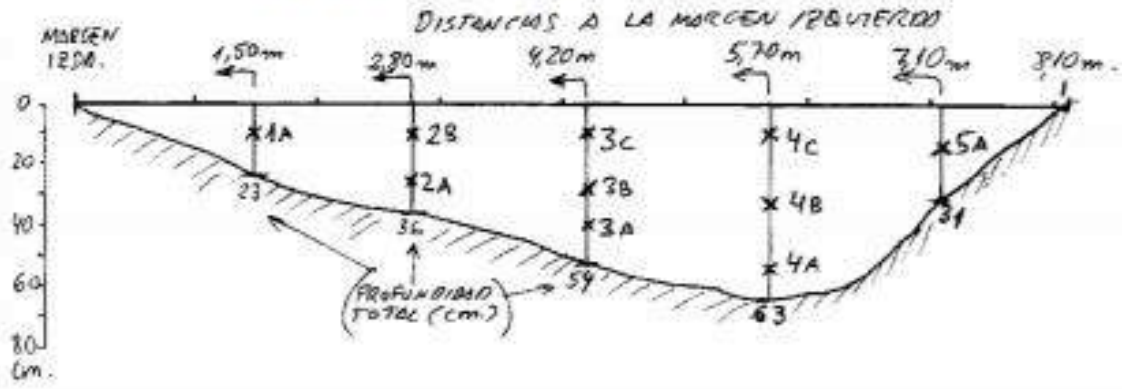
En el Tema T050 se indica el procedimiento para calcular el caudal de un cauce a partir de los datos tomados con un molinete. Vamos a ver aquí un ejemplo resuelto paso a paso.

Datos de campo:

En el cuadro aparecen las medidas realizadas en el campo:

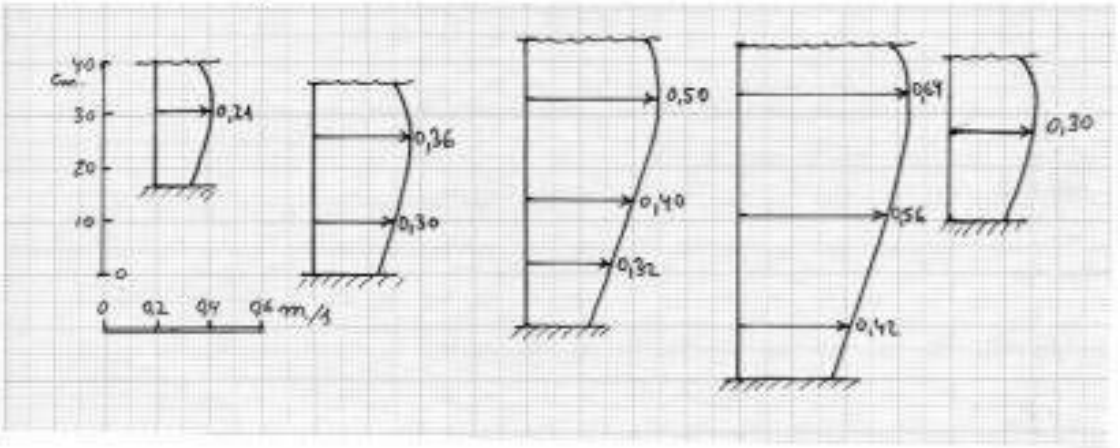
Vertical	Distancia a la margen izda (m)	Profundidad total (cm)	Medida	Distancia desde el fondo (cm)	Velocidad (m/s)
1	1,50	23	1A	14	0,21
2	2,80	36	2A	10	0,30
"	"	"	2B	26	0,36
3	4,20	54	3A	12	0,32
"	"	"	3B	24	0,40
"	"	"	3C	43	0,50
4	5,70	63	4A	10	0,42
"	"	"	4B	31	0,56
"	"	"	4C	54	0,64
5	7,10	31	5A	17	0,30
margen derecha	8,10	0			

Este sería un esquema de la disposición de la medidas realizadas:



Perfiles de flujo:

Con los datos anteriores dibujamos los perfiles de flujo sobre papel milimetrado: profundidad en vertical y velocidad de la corriente en horizontal.



Los perfiles de flujo se trazan a estima, siguiendo los extremos de los vectores velocidad, pero la forma curvada del perfil en gran parte hay que intuirla, especialmente en las verticales en que hemos realizado una sola medida.

Planimetramos los cinco perfiles y obtenemos las superficies que aparecen en la segunda columna de la tabla:

Perfil nº	Superficie (cm^2)	Equivale a (m^2/s)
1	2,16	0,0432
2	5,84	0,1168
3	11,01	0,2202
4	16,84	0,3368
5	4,49	0,0898

Por la escala elegida para dibujar los perfiles, cada cm^2 de papel equivale a 0,2 m/s en horizontal por 0,1 m de profundidad en vertical, es decir:

$$1\ cm^2 = 0{,}2\ m/s \cdot 0{,}1\ m = 0{,}02\ m^2/s$$

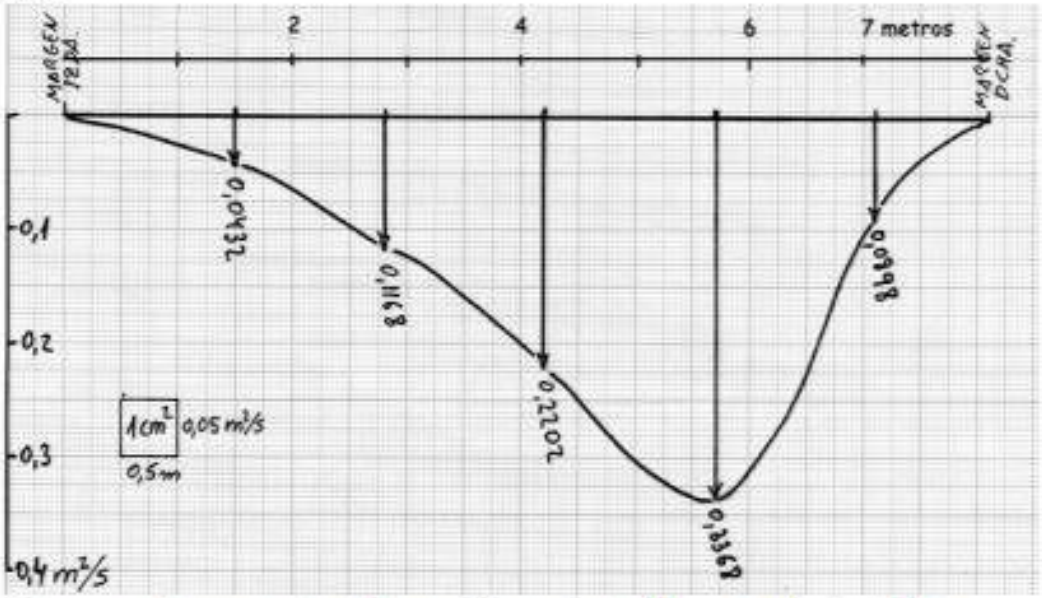
Multiplicando por este factor (0,02) obtenemos la tercera columna

(Obviamente, en cada caso utilizar las escalas más convenientes, pero al final, realizar un cálculo similar a éste)

Hay molinetes digitales que se mueven de arriba a abajo y nos dan directamente la velocidad media de esa vertical. En ese caso, bastaría multiplicar esa velocidad media por la profundidad para obtener m^2/s

Cálculo del caudal

Con los valores (m^2/s) hallados en el apartado anterior, representamos el gráfico siguiente:



Podemos considerar que se trata de una visiòn en planta del cauce, en horizontal figura la anchura del mismo y la situación exacta de cada perfil. En vertical figura la magnitud obtenida de cada perfil de flujo. Unimos los extremos de los vectores con una envolvente de formas suaves. Planimetrando este gráfico y multiplicandolo por la escala elegida, tendremos el caudal:

Superficie en el papel: 46,58 cm^2

Valor de cada cm2 =0,5 m · 0,05 m^2/s =0,025 m^3/s

Caudal = 46,58 · 0,025 = **1,16 m^3/s**

MEDICIÓN DE CAUDALES CON EQUIPAMIENTO DOPPLER

Fundamentalmente, los equipos Doppler para aforar en canales miden la velocidad del agua en un cierto volumen. En este caso, se pueden usar para determinar el gasto con base a dos métodos:

- *Método "área - velocidad"*: el gasto (Q) se calcula como la suma de todos los gastos elementales (Q_i) que cubren el área de una sección del canal; cada gasto elemental es el producto de la componente longitudinal de velocidad (V_i) multiplicado por el área asociado a este velocidad (A_i).

  ➔ Los equipos de tipo VD y PD estiman el gasto con base a este método. En este caso, no basta medir la velocidad del agua en distintas partes del canal; también debe medirse el tirante y la geometría de la sección. Como se verá a continuación, los equipos PD cuentan a menudo con sensores adicionales para poder hacerlo (Ilustración 2.7).

- *Método de la "velocidad índice"*: el gasto (Q) se calcula como el producto del área hidráulica (A) por la velocidad media en el canal (V). Asumiendo que la sección del canal no cambia con el tiempo (es decir, no hay problemas de azolve, inestabilidades de los taludes, o crecimiento de malezas acuáticas), se determina el área hidráulica conociendo la geometría de la sección y midiendo el tirante (y). La velocidad media se determina a partir de una ecuación empírica (que se determina con una *calibración* en sitio) que usa la velocidad medida (o "velocidad índice") por el equipo Doppler en una cierta porción del canal (V_m) y eventualmente el tirante medido en el canal (y).

  ➔ Por lo general, se utiliza este método cuando se trabaja con un AD. En este caso, no basta medir la velocidad en una cierta porción del canal; también debe estimarse el área hidráulica. Para poder hacerlo, los equipos tipo AD cuentan con un sensor de nivel (Ilustraciones 2.7c-d).

Los equipos Doppler para aforar en canales son equipos sofisticados, que cuentan con múltiples sensores y circuitos electrónicos que procesan la señal recibida por estos sensores (Ilustración 2.7). Sin embargo, no son tan difíciles de usar, porque vienen con programas de cómputo bastante amigables para poder manejarlos.

Nota: cuando se utiliza un programa de cómputo para calcular el gasto a partir de los datos proporcionados por un equipo Doppler, debe reportarse el nombre del *software* y su versión.

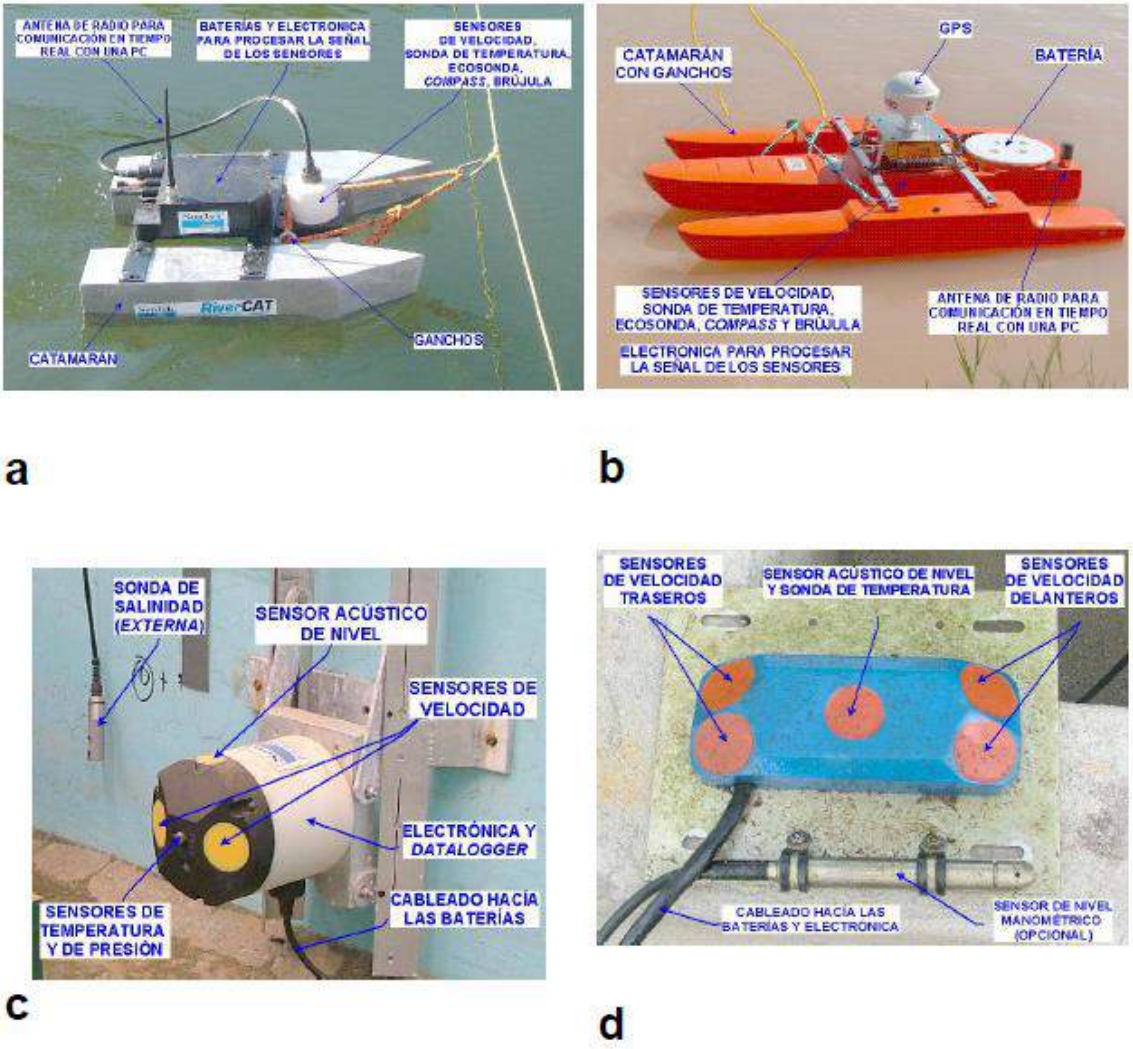


Ilustración 2.7. Los equipos Doppler para aforar en canales son equipos sofisticados, que cuentan con múltiples sensores.

(a-b) Ejemplos de equipos de tipo PD.

(c-d) Ejemplos de equipos de tipo AD.

3. Tecnología "VD" (Velocímetro Doppler)

3.1. Descripción de los equipos

Un VD está constituido por dos o tres sensores que envían ultrasonidos en el agua, un cable eléctrico y un circuito electrónico para poder programar el equipo y adquirir datos. El equipo mide la velocidad a unos 10 cm de distancia de sus sensores y en un volumen del orden de algunos cm^3.

Actualmente, existen dos modelos de VD en el mercado: "FlowTracker" (marca Sontek) y "ADC" (marca OTT). Para aforar con un VD, se requiere de una varilla para poder sujetar el equipo y orientarlo (Ilustración 3.1).

"FlowTracker" [2D] (marca Sontek)

"ADC" (marca OTT)

Vadeo con VD

Mediciones de velocidad con VD

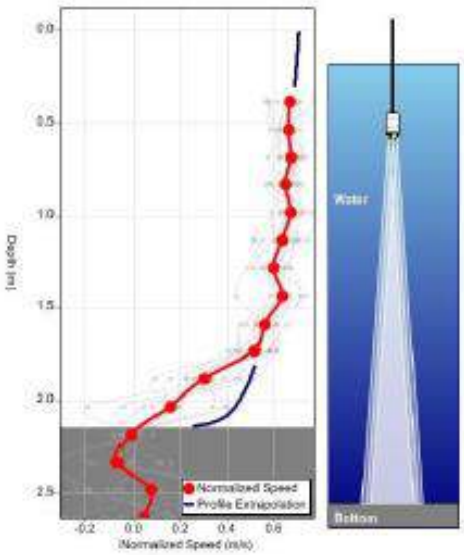
Ilustración 3.1. Distintos equipos de tipo VD y forma de sujetarlos.

4. Tecnología "PD" (Perfilador Doppler)

4.1. Descripción de los equipos

Un PD está constituido por tres o cuatro sensores orientados hacia abajo. Dichos sensores envían ultrasonidos en el agua y luego analizan el eco emitido por partículas en suspensión que se encuentran a diferentes profundidades; de esta manera, se logra determinar perfiles verticales de velocidad del agua. Para poder desplazarlo sobre la superficie del agua, un PD esta normalmente montado sobre un bote pequeño (tipo catamaran) que puede ser arrastrado por medio de un cable.

La configuración y recuperación de datos con un PD se hace por medio de una computadora portátil y de una comunicación inalámbrica (tipo radio-modem o *bluetooth*). Los proveedores de PD suministran programas de cómputo específicos para poder configurar sus equipos y recuperar sus datos en tiempo real, y así calcular el gasto (Ilustración 4.1).



Perfil de velocidad medido con un PD

Laptop, radio-modem, batería e inversor para poder recibir los datos de un PD

Ilustración 4.1. Perfil vertical de velocidad generado por un PD y forma de recuperar los datos en tiempo real.

Actualmente, existen cinco modelos de ADCP en el mercado: "Río Grande" (marca RDI), "RiverCat" (marca Sontek), "StreamPro" (marca RDI), "QLiner" (marca OTT) y "FlowQuest" (marca LinkQuest).

"Rio Grande" (marca RDI)

"StreamPro" (marca RDI)

"RiverCat" (marca Sontek)

"QLiner" (marca OTT)

"FlowQuest" (marca LinkQuest)

Uno de los primeros prototipos de PD (USGS, 1998)

Ilustración 4.2. Distintos modelos de equipos tipo PD.

AFOROS QUÍMICOS

Su fundamento es el siguiente: Arrojamos 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:

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:

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

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

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:

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

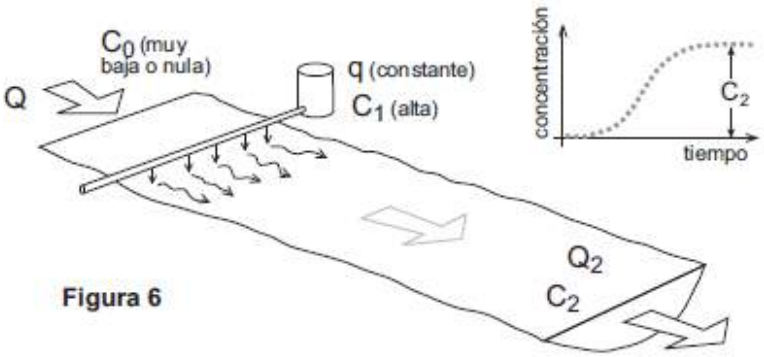


Figura 6

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]:

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

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

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

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):

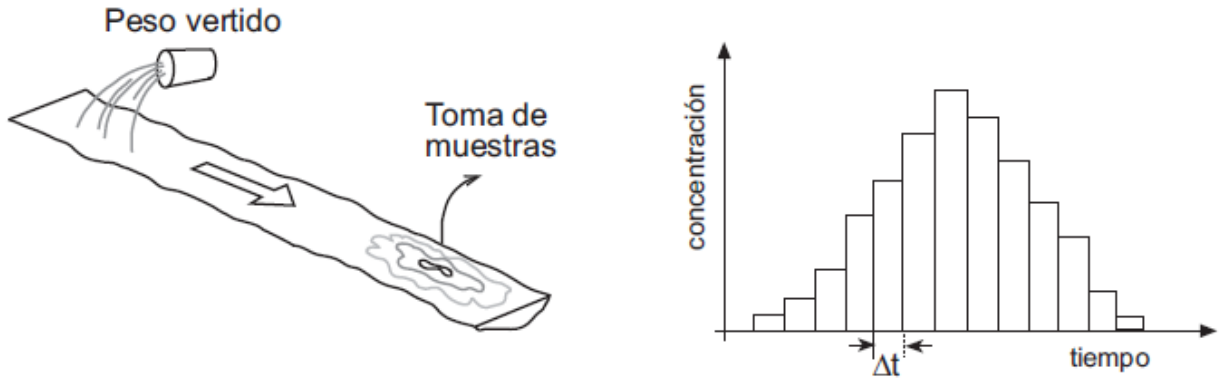
$$Q = 0{,}4 \frac{30000}{3{,}1 - 0{,}5} = 4615 \ litros/seg = 4{,}6 \ m^3/seg$$

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:

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

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 **Δt**, 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 , ... C_n . El cálculo sería así:

Peso vertido= Peso que pasa en el 1er Δt + Peso en el 2º Δt + ...+Peso en el último Δt =

= C_1 · Vol que pasa en el 1er Δt + C_2 · Vol en el 2º Δt + ...+ C_n · Vol en el último Δt =

= C_1. Q . Δt + C_2 . Q . Δt + ... + C_n . Q . Δt =

=Q . Δt . ($C_1 + C_2 + ... + C_n$)

Despejando *Q*, resulta:

$$Q = \frac{\text{Peso vertido}}{\Delta t\,.(C_1 + C_2 + ... + Cn)} \qquad [6]$$

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:

$$Q = \frac{\text{Peso vertido}}{\Delta t\,.\left[(C_1 - C_0) + (C_2 - C_0) + ... + (C_n - C_0)\right]} \qquad [7]$$

AFOROS INDIRECTOS

En Hidromensura, se acostumbra en llamarlos así a aquellos que se realizan por métodos de correlación, sin la medición detallada de velocidades.

MEDIANTE 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.

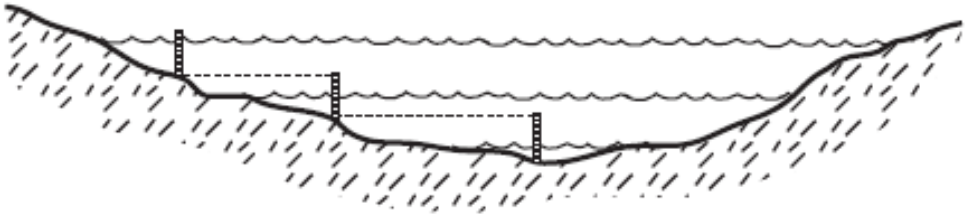
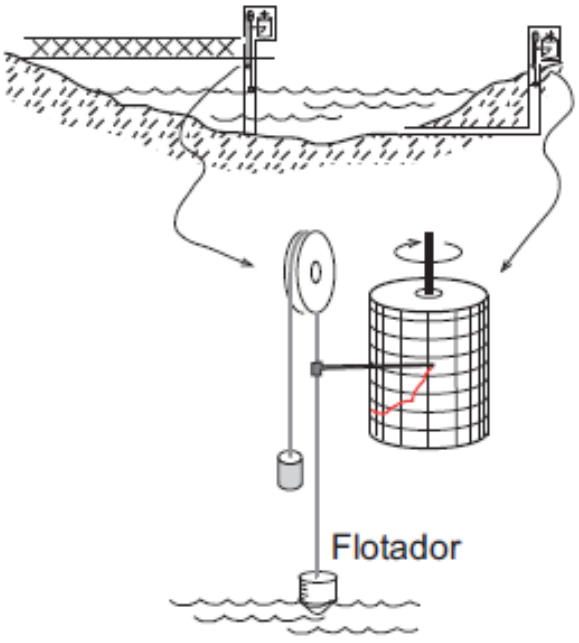


Fig. 8.- Escalas limnimétricas escalonadas

MEDIANTE LIMNÍGRAFOS

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 ALTURA - CAUDAL

En cualquiera de los casos, el limnígrafo o la escala limnimétrica solamente miden el nivel del agua, necesitamos una ecuación que convierta el nivel en caudal. Para obtener esta curva para un punto concreto de un cauce, será necesario realizar numerosos aforos directos para establecer la relación entre niveles y caudales, que nos permitirá obtener el caudal a partir de la altura. 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.

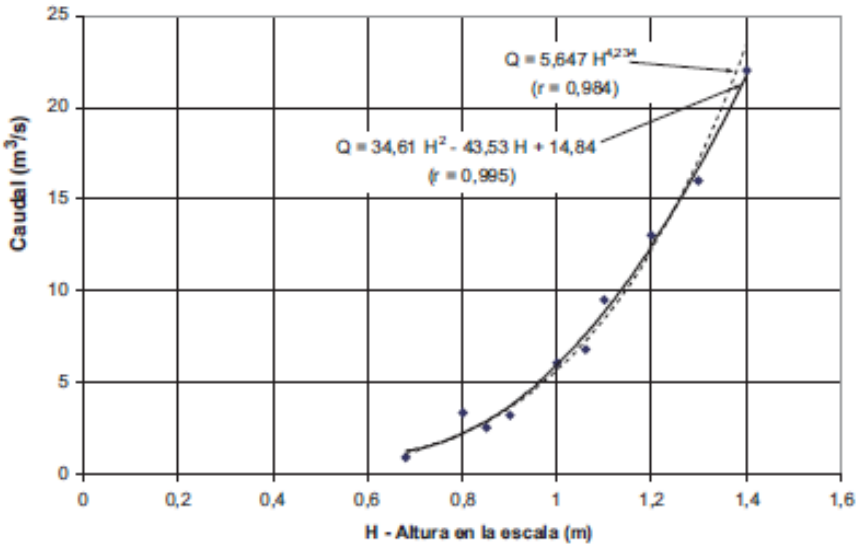


Fig. 10.- Curva de gastos (relación altura-caudal)

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

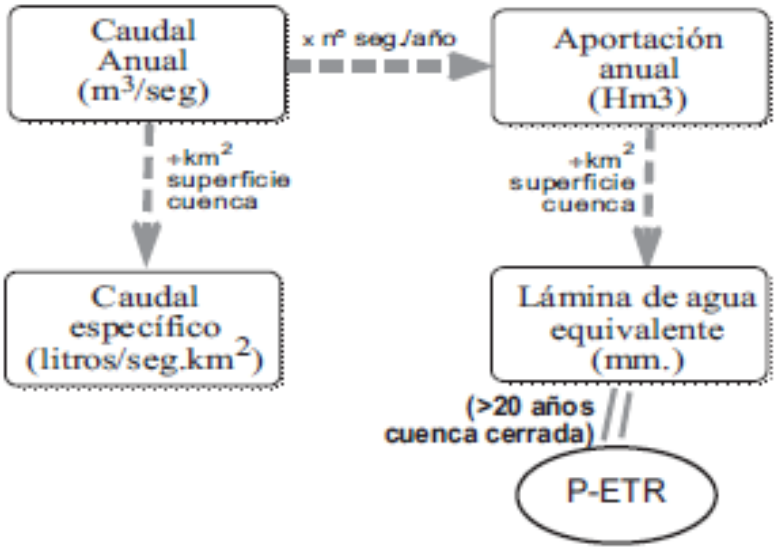
No en todos los puntos de un cauce el caudal es función solamente de la altura. Puede ser función de la altura y de la pendiente del agua. A veces es necesario instalar una presa o barrera para conseguir que sea sólo función de la altura.

PRESENTACIÓN DE LOS DATOS DE AFOROS LÍQUIDOS

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

- 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.** 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, Noviembres, 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 (*Hm³*). 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 km² de cuenca. Se calcula dividiendo el caudal (normalmente el caudal medio anual, en m³/seg.) por la superficie de la cuenca considerada (*Litros/seg/km²*). 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
- **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: *mm.*). Se obtiene dividiendo al 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).

ESTACIÓN DE AFOROS (PUESTO FLUVIOMETRICO)

1. En el establecimiento de puestos fluviométricos, deberán ser consideradas las facilidades de acceso, también en las estaciones lluviosas las condiciones topográficas y de flujo convenientes para la precisión de las lecturas y la determinación de la curva masa.

2. El servicio de observación diaria de las escalas (dos veces a las 7 y a las 17 horas) deberá ser confiado a una persona idónea y que resida cerca de la escala. Los observadores deberán quedar perfectamente instruidos en relación con la observación diaria de las escalas y en cuanto a la remisión puntual en los días 1 y 16 de cada mes, de las tarjetas quincenales a la sede del distrito; deberán quedar seguros de que el servicio que se les confía exige una absoluta honestidad y de que, si las observaciones no son hechas con buen criterio, el tiempo y dinero invertidos en la ida de los técnicos al lugar para proceder a mediciones de gastos quedarán perdidos.

3. Las escalas deberán ser instaladas en lugares de aguas tranquilas, protegidas contra la acción de maderas llevadas por las crecientes y a una distancia de la margen que permita buena visibilidad. Si es posible, se excavará una reentrante en la margen para colocar en ella la regla, libre de la corriente.

Las escalas a criterio de los técnicos, podrán ser colocadas en estacas soportes de madera buena, sólidamente enterradas al puente o a otras obras fijas.

Las cotas de las extremidades superior e inferior de las escalas, deberán tener en cuenta las informaciones tomadas en el sitio, sobre las crecientes excepcionales y sobre los estíos extremados, para evitar que las reglas queden sumergidas o en seco.

4. Para completa seguridad de la nivelación de los diversos percances de escala, deberán ser establecidos por lo menos dos BN (bancos de nivel). Uno de estas BN podrá ser una estaca de madera buena y con un mínimo de 8 cm de largo completamente enterrada en el suelo, será preferible además un marco de concreto. Un segundo BN deberá ser de preferencia construido en un punto fijo de una construcción sólida.

5. Siempre que sea posible, deberá ser determinada por nivelación geométrica la altitud del cero de la escala con referencia a un BN de precisión próxima.

6. Las secciones de medición de descarga deberán ser localizadas lo más próximo posible a las escalas y definidas por dos estacas en cada margen, debiendo estar en una de ellas el punto de inicio del contaje de las abscisas; deberán ser siempre normales a la corriente, en tramos rectilíneos a los ríos, sin turbulencias, donde sea mínima la zona de remanso, sean los filetes líquidos tan paralelos cuanto sea posible y donde las velocidades no sean demasiado bajas.

7. Al establecer un puesto fluviométrico deberá levantarse la sección de medición en la parte mojada por sondaje y en la parte en seco por nivelación geométrica, taquimétrica o a regla.

8. De la primera medición de gastos deberán constar informaciones sobre el material de que son constituidos el fondo y las márgenes del río, especialmente sobre su fijación o movilidad.

9. Deberán ser tomadas informaciones seguras sobre las cotas alcanzadas por crecientes y estíos notables y será de mayor interés la obtención de fotografías que permitan determinar, por nivelación, las cotas de los niveles extremos conocidos.

10. El técnico encargado de establecer un puesto fluviométrico deberá localizarlo en las mejores cartas existentes en cuanto a las ciudades o poblados vecinos y la cercanía de los tributarios más próximos.

11. El técnico encargado de establecer un puesto fluviométrico enviará lo más pronto posible a la oficina central, la respectiva ficha descriptiva acompañada de croquis acotados, que muestren en planta y perfil la situación de las escalas de los BN, de la sección de medición, de casas y caminos próximos, medios de acceso, locales de hospedaje, etc.

CONSERVACIÓN E INSPECCIÓN DE PUESTOS FLUVIOMETRICOS

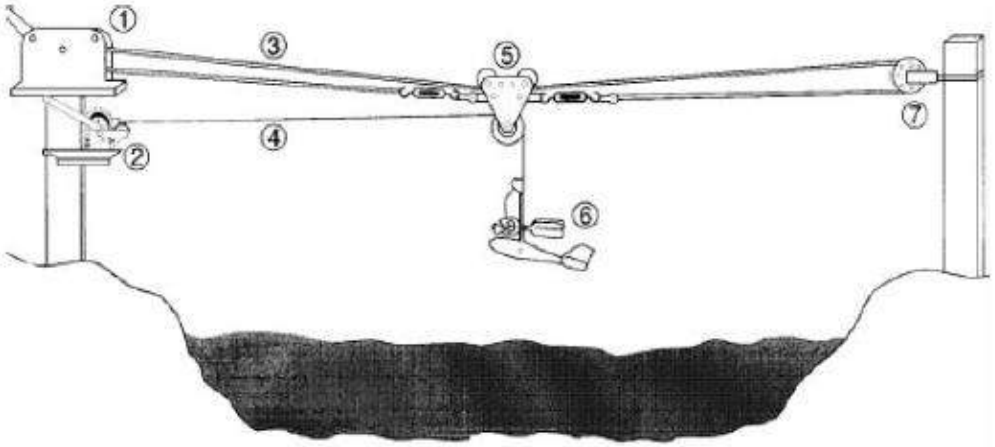
1. Las escalas, en el caso de no ser de placas de fierro esmaltado, deberán ser pintadas de blanco por lo menos una vez al año.

2. Cuando las escalas son colocadas en estacas, deberán hacerse por lo menos dos veces al año verificaciones de la nivelación de los diversos sucesos con referencia a los BN existentes. Los tornillos de fijación serán revisados frecuentemente.

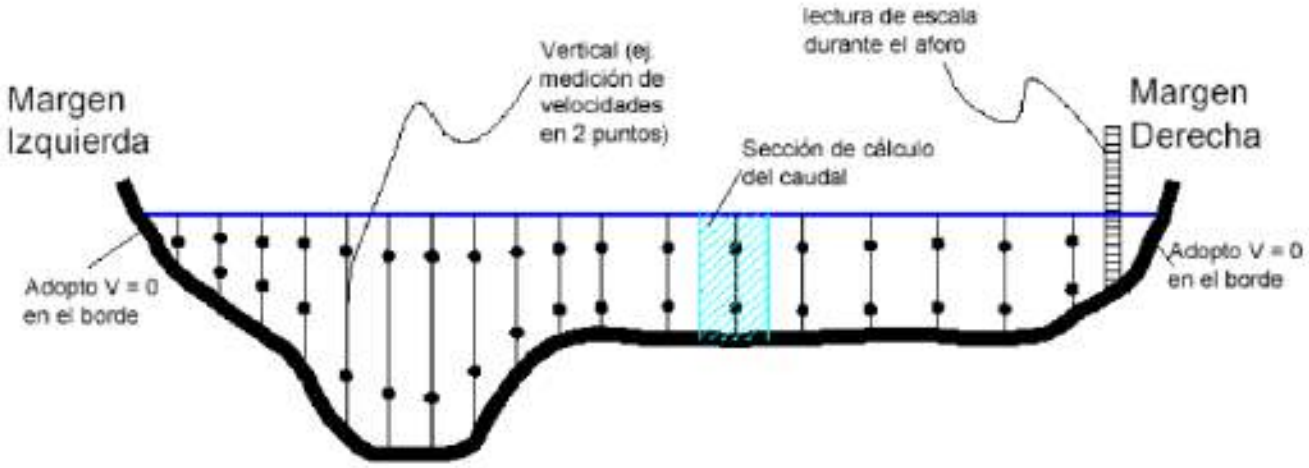
3. Las secciones de medición serán mantenidas libres de vegetación junto a las márgenes y debe hacerse periódicamente el servicio de limpieza.

4. Los observadores tendrán bajo su responsabilidad las escalas, los BN, las estacas existentes en la sección de medición, la embarcación que es dejada en el lugar y el equipo necesario para el servicio.

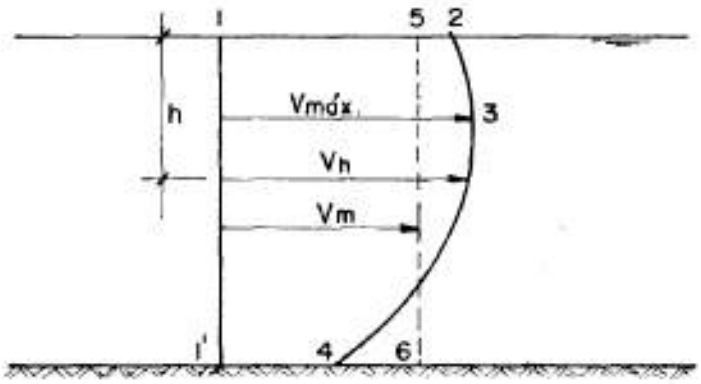
5. Todo grupo que visite un puesto fluviométrico que proceda o no a la medición de descarga, enviará a la oficina central, lo más pronto posible, informaciones sobre el estado del puesto.


①
②
③
④
⑤
⑥
⑦

Dividir el ancho del rio en, al menos, 20 secciones. En las zonas de velocidades altas la separación entre verticales debe ser menor.
En cada seccion el gasto sera como maximo del 10 % del Qtotal.



Luego de medir la profundidad en la vertical, entonces se decide sobre los puntos a medir la velocidad. En aguas poco profundas (h < 0,50 m) medir V a 0,6h.

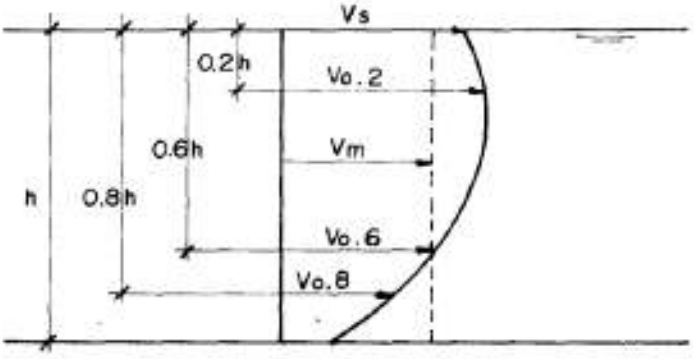


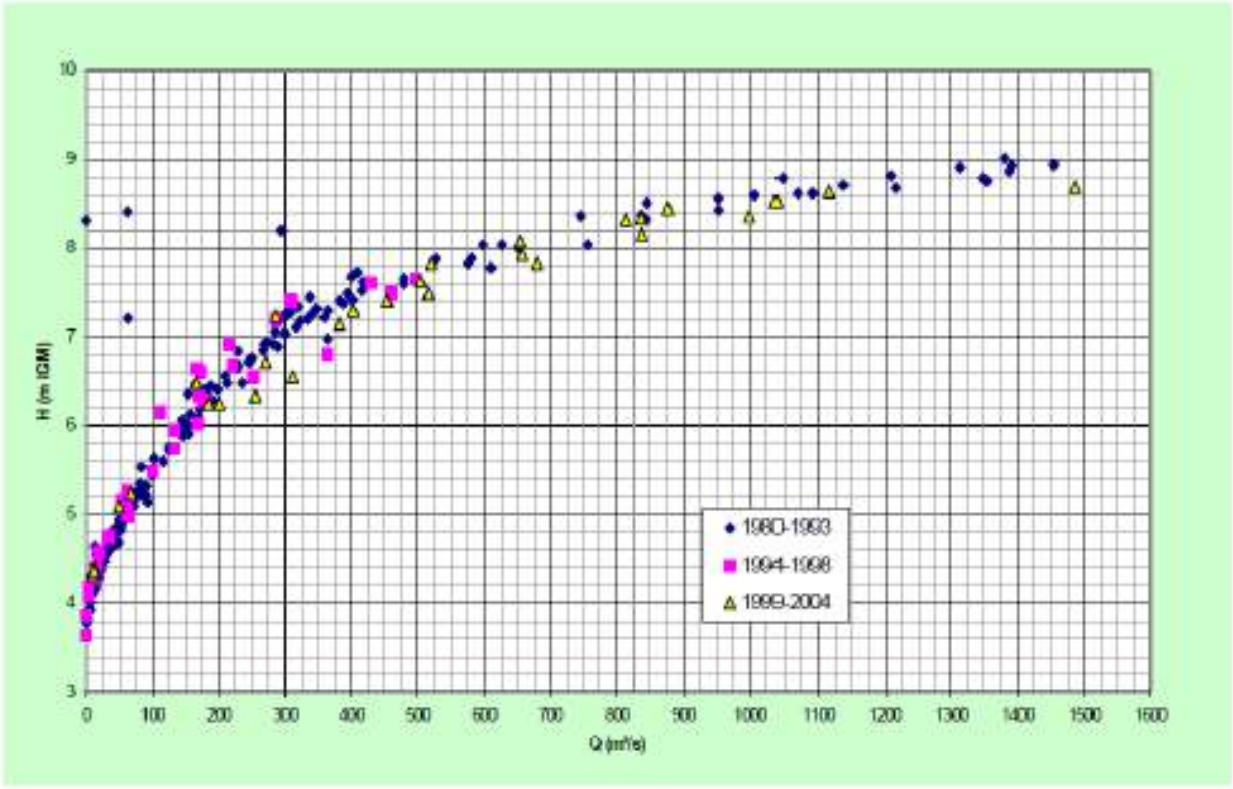
$$v_m = 0.85\ v_s$$

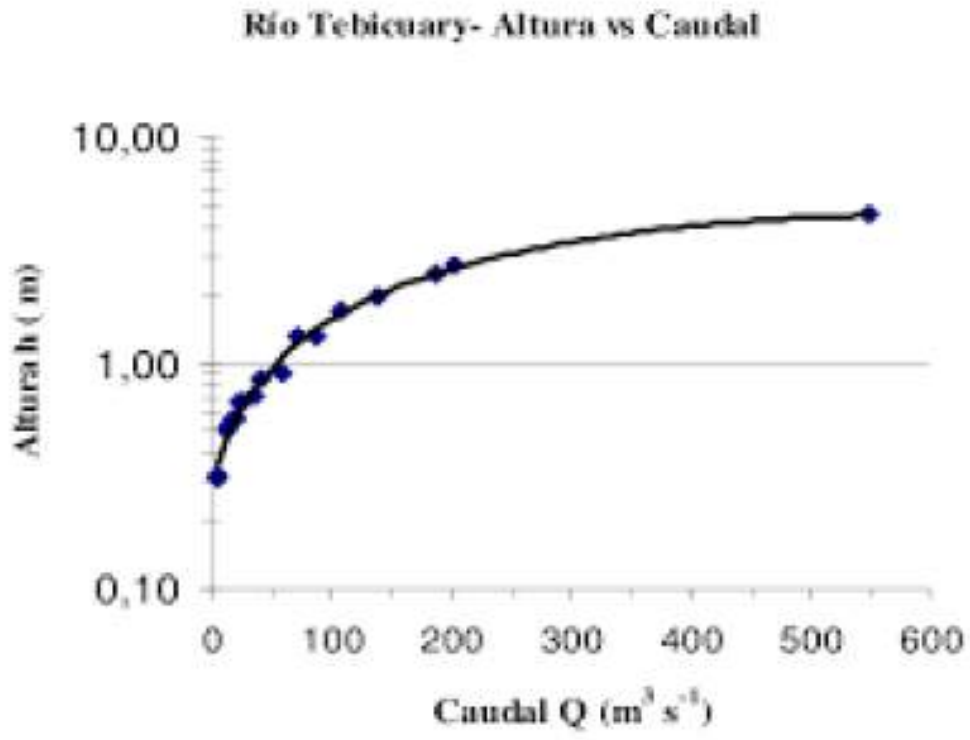
$$v_m = v_{0.6}$$

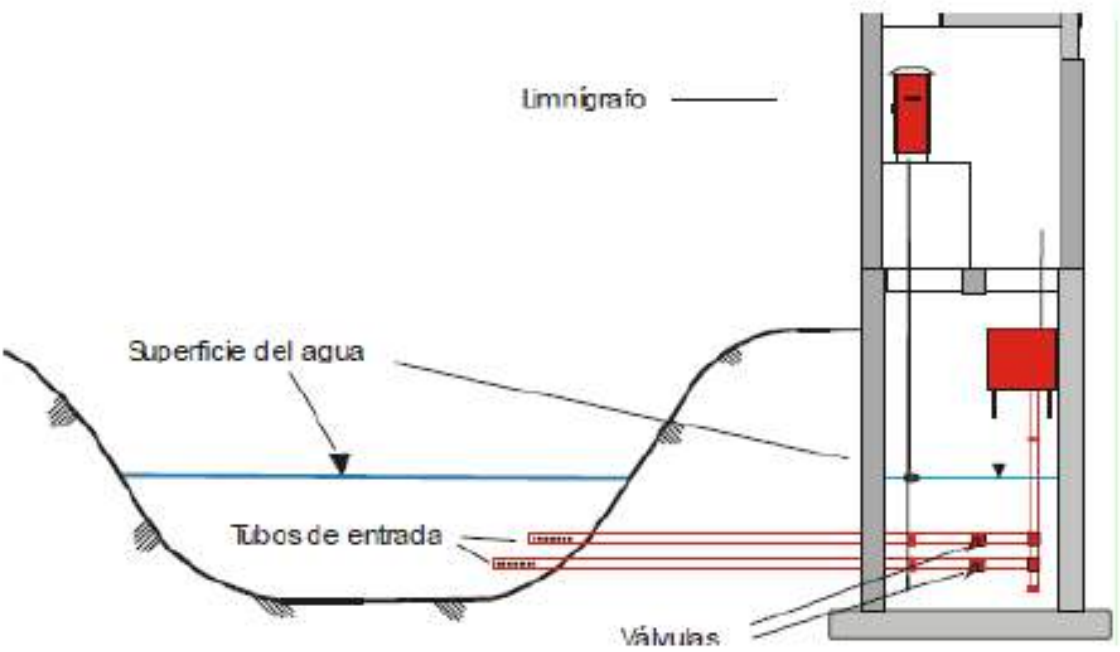
$$v_m = \frac{v_{0.2} + v_{0.8}}{2}$$

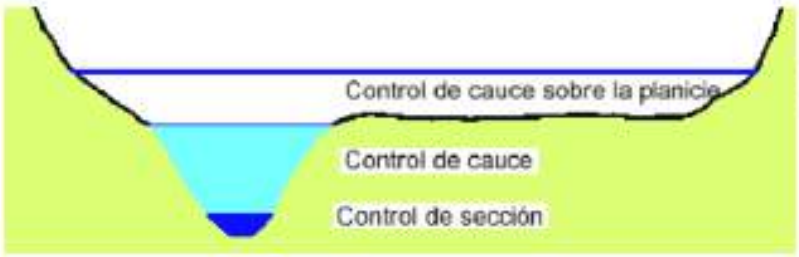
$$v_m = \frac{\Sigma\ v_i}{N}$$

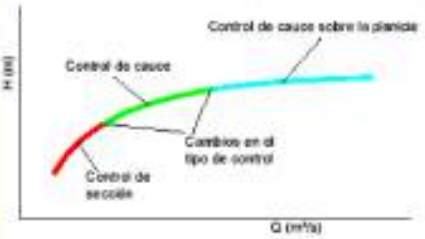



H (m IGM)
Q (m³/s)
1980-1993
1994-1998
1999-2004


Río Tebicuary- Altura vs Caudal
Altura h (m)
10,00
1,00
0,10
0
100
200
300
400
500
600
Caudal Q (m³ s⁻¹)







AFOROS POR DILUCIÓN

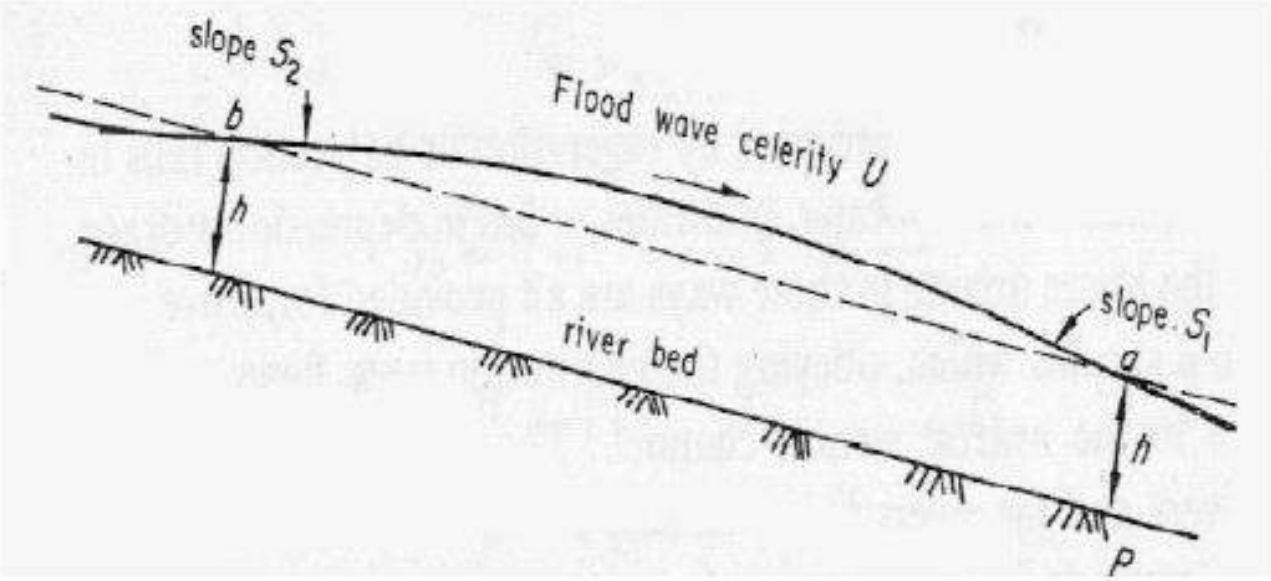
$$QxD+qxd=(Q+q)xD1$$

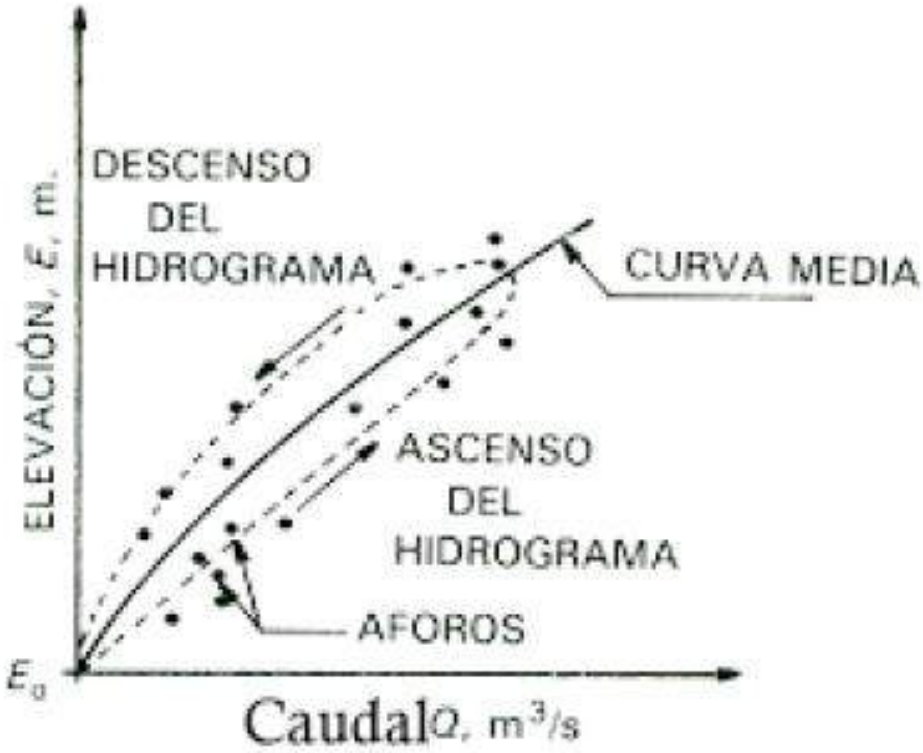
$$QxD+qxd=QxD1+qxD1$$

$$QxD1-QxD=qxd-qxD1$$

$$Q = qx(d - D1)/(D1 - D)$$

(ó, si D = 0) $Q = qx(d - D1)/D1$





http://bdhi.hidricosargentina.gob.ar/

RÍO: PARANÁ

SISTEMA: Río Paraná — LATITUD: 27 27 00 — LONGITUD: 55 48 00
LOCALIDAD: POSADAS (STA CRÚZ) (Cód.3402) — ALTITUD (msnm): 92
PROVINCIA: Misiones — AREA (km2): 973375
CUENCA: Río Paraná hasta Confluencia

ESCUR. C A U D A L E S (m3/s)

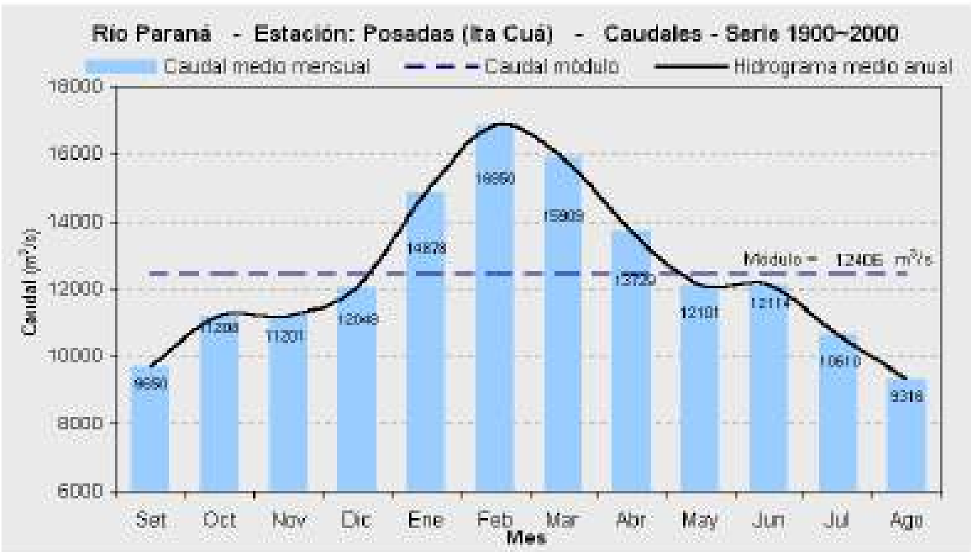
AÑO	C A U D A L E S M E D I O S M E N S U A L E S (m3/s) ANUAL	ESPEC.	LA	DERRAME CAUDAL MAXIMO	MINIMO	MEDIO	(hm3)	(l/s/km2)	(mm)	CUENCA DIARIO	MEDIO DIARIO	MEDIO ANUAL
	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
20-01						22232	25063	21833	20991	16178	11778	9771	14888					
01-02	8816	7855	6449	12422	18053	14883	20217	18724	14211	15770	10294	7466	387337	12.59	397.1	24038	5847	12293
02-03	8833	10402	13035	17789	13203	16197	16803	10338	9074	8185	9713	9314	370213	12.04	379.6	25761	4817	11739
03-04	8213	9823	9103	9307	17004	16795	11702	9882	7839	7642	10716	7972	321408	10.42	329.5	21474	5709	10164
04-05	9400	12481	14285	17317	20482	25118	20908	19965	21899	27410	17004	14380	610082	19.83	625.5	53127	9058	18348
05-06	12048	10302	9782	12666	20162	24234	24824	23448	15501	13128	9687	7810	470428	15.29	482.3	29133	8984	14917
06-07	7289	7838	7488	8380	17088	17587	21928	12065	10196	11803	12838	9828	374758	12.19	384.2	24720	6809	11884
07-08	13828	17300	17047	16173	19731	23019	19884	11424	10183	10101	9902	8482	487987	14.90	469.5	39428	9164	14482
08-09	8228	13101	13872	15318	13162	13171	13980	10981	9182	8513	7477	8727	347755	11.31	356.5	19868	5361	11027
09-10	8483	7308	9012	8385	10420	15401	14804	11627	8913	8813	8525	7907	309897	10.07	317.7	19027	5191	9826
10-11	7151	9408	7179	6224	7457	9991	9713	10981	9808	8390	8584	9489	271917	8.84	278.8	16138	4909	8622
11-12	12384	19197	14876	22863	21775	23040	24836	16780	12670	11239	9686	8581	518013	16.79	531.1	30208	7242	16381
12-13	8833	10162	13583	11958	17037	14830	13442	11487	8980	8400	7178	6812	343747	11.18	352.4	21193	6017	10900
13-14	8739	8997	8647	8824	9566	13010	12836	9124	6883	8458	12394	9268	287497	9.70	294.8	18023	4742	8482
14-15	8239	9765	12828	12309	10355	9209	7468	9173	10305	12118	7989	6982	302356	9.83	310.0	20491	5397	9588
15-16	8823	14078	10019	9488	10613	13307	11509	11524	8479	9081	9184	8235	333027	10.68	331.4	21931	5414	10231
16-17	8235	9878	8438	7842	11873	14546	15131	12257	9038	7265	6913	8488	295307	9.60	302.8	20173	4799	9366
17-18	9766	9381	6885	6447	9720	15442	12489	9856	8148	11408	9701	7758	295835	9.29	295.0	21931	4872	9064
18-19	7178	10078	10893	11956	12158	19663	14874	13909	13393	14197	10373	7379	381197	12.39	390.9	33960	5875	12088
19-20	7857	10388	17404	16817	18068	17974	17719	12881	9880	9341	10874	6349	413313	13.40	423.7	39825	6870	13070
20-21	8701	9223	11287	13652	19834	24273	18974	13242	9456	8250	9283	7804	389365	12.66	399.1	29897	6487	12344
21-22	12877	12685	7076	8154	11022	17940	21486	19099	19985	16178	14194	10144	448038	14.47	456.3	36839	8546	14513
22-23	9691	10324	9042	8410	12982	18334	16819	16787	13809	20433	12097	8130	408013	13.17	416.2	37712	7341	12843
23-24	11172	13511	14897	11019	13014	16774	17547	12892	10967	11909	9689	6366	390555	12.76	403.8	29027	5684	12448
24-25	5962	8173	8748	7222	12888	9182	9253	9504	9391	7464	6872	5330	239433	7.78	245.5	16481	4424	7590
25-26	4983	7181	10798	13328	18589	23839	17330	22115	15989	13168	12108	9434	448947	14.59	460.2	39948	4394	14233
26-27	7284	7091	8328	10826	16503	18784	14909	12643	8980	8830	7482	6100	338642	10.92	344.5	31847	5988	10686
27-28	12842	9100	12401	8963	8858	11343	13546	14020	13132	17698	11374	11380	373420	12.11	382.9	28781	5933	11809
28-29	10678	17858	9934	11437	22168	29877	29184	19386	11987	12889	9034	7940	488518	16.11	506.0	36012	7090	15713
29-30	13818	18884	13472	12029	14224	21103	15408	11232	10306	9349	8902	7104	398829	12.90	404.8	24452	5903	12383
30-31	7297	12471	12015	13880	19892	19828	25884	19818	20397	17980	12805	8497	500855	16.27	513.2	32658	8673	15973
31-32	10383	10004	8505	12203	15307	19802	17920	19592	14314	14884	11562	8919	439524	13.93	440.4	28576	7148	13583
32-33	8728	13378	9309	13625	17918	16432	13741	10535	9143	7203	6692	5490	351308	11.42	360.1	24310	5440	11139
33-34	5819	7013	6900	8127	12218	11878	10976	9553	8429	8245	8391	4795	288195	9.30	291.6	14308	4838	8092
34-35	5147	8274	4815	8772	14084	15305	17092	13306	10231	10617	9131	11917	332433	10.81	340.8	20060	4315	10541
35-36	12377	24156	14814	11854	14453	9162	13216	10819	10332	14833	9597	9302	414995	13.45	425.5	39753	7407	13533
36-37	8903	9279	7399	8536	19469	14727	14238	12857	10804	9385	8998	6206	339897	11.04	348.2	25491	5484	10768
37-38	6360	9154	10396	13513	15335	17093	11898	11293	10641	13980	15842	8377	394802	12.84	404.9	27402	5600	12519
38-39	8896	8574	9018	8345	14313	18778	12284	10240	11383	9624	9864	6828	313708	10.20	321.7	17980	5600	8949

39-40	7035	8753	12599	19781	17350	17537	18158	14739	12494	9897	7758	4940	397135	12.99	407.2	39429	5600	12589
40-41	5555	5327	8426	9796	13664	15752	10857	13764	9760	8565	8820	11730	321198	10.44	339.3	34807	4933	10188
41-42	9980	10536	11484	17915	14239	16336	18597	19768	15299	13992	11239	9990	439173	14.29	450.3	32709	7242	13926
42-43	9015	8397	7412	9243	15907	16989	17714	12232	9601	11075	7974	6959	348599	11.33	357.4	31739	5960	11054
43-44	6093	6978	10969	9650	10230	10129	14718	9994	7362	5961	5098	4407	272955	8.85	279.8	17349	4095	8629
44-45	4314	6052	6666	7361	7072	14694	15035	14369	9054	7327	6952	5911	277137	9.01	284.1	17803	3909	8788
45-46	5097	5744	7143	11850	20397	24109	25596	16993	13232	12723	16554	9293	441249	14.35	452.4	30772	4865	13990
46-47	7186	10450	9731	11430	14565	17995	22423	19994	13410	11792	9359	9081	409710	13.32	420.1	28761	4817	12990
47-48	13024	12499	9103	10158	14065	14332	16158	13299	9907	9101	8367	9097	354793	11.50	363.7	19957	5792	11219
48-49	5965	7397	10363	9169	10399	15313	14895	10369	9054	8539	6199	5107	295051	9.59	302.5	17237	4637	9356
49-50	4941	5040	8313	7332	10793	19000	16227	13997	10454	8410	7976	5544	302925	9.85	310.6	22104	4513	9606
50-51	4917	9106	8840	12294	14052	21993	24031	15621	9074	7858	7116	5411	366867	11.92	375.9	27402	4603	11624
51-52	4977	6729	8739	9810	7536	12807	16169	13433	7709	8842	7436	5458	293232	9.51	300.6	21420	4580	9273
52-53	6501	11381	12041	7882	9716	9338	8350	10778	7994	7935	5959	4852	262710	8.54	269.3	14459	4490	8330
53-54	7316	11322	13993	10329	11298	11790	11762	9073	16524	14590	11979	7279	367575	11.95	376.9	25066	4895	11654
54-55	7396	10549	7882	7359	8903	8993	9065	8931	9229	15220	13904	7981	301856	9.81	309.5	22837	3709	9572
55-56	8703	5475	7564	7574	12098	9412	10250	16075	14945	17652	12260	14759	351349	11.39	360.3	22774	4993	11111
56-57	8835	7961	7189	7160	12822	17608	15872	15061	10959	8181	14742	19196	369856	12.58	396.8	28034	5600	12267
57-58	21740	13869	11822	12375	10102	16482	14067	12725	9744	10865	9218	8347	390912	12.77	402.9	27838	6219	12459
58-59	11017	9730	10975	11862	14263	16147	14040	14339	9965	8969	7079	7104	361355	11.74	370.6	24926	6017	11458
59-60	6504	8863	7000	8347	10808	16424	14907	12095	9352	8529	7974	8426	310814	10.07	318.5	17903	5466	9823
60-61	8140	8353	12493	10883	17599	16790	24897	19943	14996	11131	8415	6493	419495	13.64	430.1	28802	6161	13302
61-62	8082	9165	11543	8977	11743	16335	16457	12478	9128	8444	6514	5795	324141	10.56	342.6	22293	5600	10596
62-63	7444	12157	9448	10638	16968	17140	13385	11035	9212	7297	5946	5279	330174	10.80	340.5	20543	5091	10533
63-64	5066	7903	10890	9853	7734	12005	12269	10812	9125	7343	7369	8173	301186	9.76	309.9	22449	4559	9524
64-65	7985	7765	9179	9675	13813	19642	24832	16409	19679	13768	14689	10905	438137	14.24	449.2	27040	6309	13893
65-66	9487	14510	13701	20922	22865	24921	21905	15069	10965	12159	9603	7423	479344	15.59	491.4	37995	6732	15200
66-67	9304	10493	13098	11010	17090	19955	20081	12858	9922	9141	8071	7909	382896	12.44	392.3	22319	6659	12135
67-68	7826	6988	7731	11079	13713	12953	12147	9772	9035	6428	6073	5759	282773	9.17	289.9	18967	5309	8942
68-69	5461	7023	9200	8396	12302	9990	8927	10287	9264	12794	9739	5918	279680	9.06	285.7	24039	5207	8936
69-70	5171	11540	12089	10152	11365	12925	15279	9989	9261	9806	10775	5942	320497	10.42	328.5	17013	4909	10163
70-71	7434	11063	7384	8322	18128	9109	10222	9329	11703	13406	12074	9090	338480	11.00	347.0	24518	5483	10733
71-72	7347	9054	7035	9803	11268	14895	16394	12563	9220	10119	10379	11741	344207	11.18	352.9	24039	6074	10985
72-73	18111	22781	16963	17265	16081	19930	15059	13970	11940	13299	13349	11159	494095	16.05	506.6	26396	9078	15669
73-74	13863	14695	13099	11810	19633	15669	14684	19818	13087	13021	13160	9495	440143	14.31	451.3	24815	7407	13887
74-75	12170	9030	10914	10784	15397	13156	12228	11934	9352	8854	8668	9191	337249	10.96	345.8	19096	7080	10694
75-76	9786	15301	12039	15816	13017	16471	14659	12091	9346	13969	10277	12469	421043	13.65	431.7	23770	7146	13318
76-77	12387	12539	16476	17522	23077	25911	11179	14069	10236	10100	9015	8411	448195	14.47	458.4	30091	7609	14117
77-78	8470	9158	9894	14449	18791	12238	12182	9998	7739	9864	10225	10318	336351	10.94	344.9	19999	7148	10666
78-79	10535	8342	9640	9530	12825	14978	13326	10136	15351	9635	9104	10621	351330	11.42	360.1	27040	7575	11137
79-80	13551	13500	15898	14742	15508	22683	20361	12975	12930	10666	10901	10382	454046	14.72	465.5	29725	9199	14359
80-81	12989	12990	11989	13260	19076	16486	10500	9630	10645	9249	9354	9119	375093	12.19	384.6	22774	6952	11894
81-82	7894	9525	10524	20056	10930	19268	16709	19353	11039	14699	22321	13009	479939	15.57	491.0	31471	7407	15167
82-83	10573	9145	19989	28958	26253	32735	34986	25302	32765	39029	37737	20095	836515	27.20	857.6	50982	5709	26526
83-84	23203	26392	22972	20067	22197	17095	11549	11942	11449	13773	11104	13655	532995	17.29	546.3	32735	9799	16852
84-85	12256	12990	14779	15064	13072	19610	17492	16578	15779	12684	11755	12302	458796	14.95	469.3	23449	10399	14484
85-86	11957	9850	10623	9997	9499	11935	12404	12095	14044	12648	11976	11848	365877	11.89	374.6	21847	7242	11592
86-87	12365	12652	10634	11731	10035	14876	12395	13451	21303	18054	14730	11149	429140	13.92	439.0	29753	9058	13876
87-88	13319	11749	16197	12754	13535	13495	15974	12972	16405	16665	11750	10754	428895	13.91	438.6	24815	9706	13448
88-89	12131	9044	11006	8569	16969	22152	16350	13095	13475	12009	11838	10126	419009	13.62	429.9	26254	6701	13296
89-90	21165	14300	13299	12402	29120	17121	11157	12901	14246	15397	15492	16895	516504	16.79	529.7	42799	10111	16381
90-91	21070	18108	16015	13253	10749	17900	12650	19998	14421	13063	12456	10734	474919	15.44	486.9	29209	9510	15060
91-92	9630	12271	11070	14029	13176	17904	14733	17503	26159	26599	15990	14610	509919	16.53	522.9	48790	8970	16138
92-93	14836	16081	14927	17995	15081	17962	16359	14148	14716	15049	13209	11704	487975	15.86	500.2	26395	10070	15470
93-94	12401	21358	13731	13637	14182	19110	14305	13055	13071	17763	17038	15899	487440	15.85	499.9	24929	10441	15457
94-95	10997	13099	14401	11707	19933	16892	14595	15154	13311	13629	13244	13309	449442	14.59	459.9	29477	10071	14231
95-96	12947	15483	13969	12999	14467	15729	16006	14691	11062	11193	11659	14049	431796	14.00	442.7	19610	10306	13666
96-97	13506	17469	16659	16194	19207	27443	16244	13402	13659	17633	16817	16303	533737	17.32	546.2	33216	11959	16893
97-98	14837	20546	22366	22133	16560	16512	22966	27350	21941	14799	13765	19495	605239	19.66	620.5	31933	12096	19190
98-99	19992	24133	13690	11543	15969	17029	15416	13957	12745	14109	10172	11489	486339	15.81	498.5	28999	10275	15419
99-00	11440	11049	10967	11899	11237	11399	11719	11984	11775	11799	12278	11299	365634	11.93	374.9	14532	9787	11540
PROM	9650	11208	11201	12048	14878	16850	15909	13729	12101	12114	10610	9318	391487	12.72	401.4	25657	6580	12406
MAX	21740	26392	22972	28958	29120	32735	34986	27350	32765	39029	37737	20095	836515	27.20	857.6	53237	12096	26526
MIN	4314	4052	4913	5824	6559	9209	7465	9073	6653	5961	5098	4407	239433	7.78	245.5	14308	3909	7590

DURACIÓN DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES - PERÍODO 1900-01/1999-00 ** 100 AÑOS **

	Máximo	5	10	20	25	30	40	50	60	70	75	80	90	95	Mínimo
CAUDALES (m3/s):	39029	21316	18914	16142	15069	14238	12737	11775	10501	9347	8923	8411	7180	6243	4052
% DEL MÓDULO:	314.4	171.9	151.7	130.1	121.5	114.9	102.7	94.92	84.65	75.34	71.92	67.80	57.88	50.32	32.75

-Alturas del hidrómetro de la Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables (Actualmente: Dirección Nacional de Vías Navegables)
-Los aforos se realizaron en la sección Ita Cuá y son referidos al hidrómetro del Puerto Posadas.



Fuente: *Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación*

COMPILADO DE:

- “Clases de Hidráulica Aplicada” - FI - UNaM
- “Manual de Hidráulica” - J.M. de Azevedo, G. Acosta A.
- “Aforadores de Corrientes de Agua” - Mario Basán Nickisch - INTA-EEA Sgo. del Estero
- “Hidrología” - R. Springall - UNAM (Universidad Autónoma México)