9 Nº 620 e/ 44 y 45 Dpto 5º "B"

Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de La Plata

Hidrología

(Área Civil)

Notas de clase
Curvas H-Q
Particulares

Autor: Ing. Aníbal Barbero

2005

Centro de Estudiantes de Ingeniería La Plata
47 Nº 279 (1900) La Plata. Tel: (0221) 4838499
e-mail: ceilp@gioia.ing.unlp.edu.ar
www.ceilp.com.ar

12
Hoj

HIDROLOGÍA

CURVAS CARACTERISTICAS

En una forma muy simple se puede relacionar el gasto "Q" y la altura "h" por medio de una función de potencia de la forma:

$$Q = p \cdot h^s \;;$$

en la que "p" y "s" son constantes a determinar.

La linealización de esta expresión ayuda notablemente en la extrapolación y en la interpolación. Tomando:

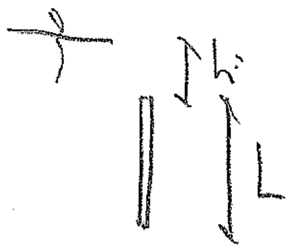
$$\boxed{\log Q = \log p + s \log h \;;}$$

se está en el caso:

$$Y = A + B \cdot X$$

Las constantes "A" y "B" se determinan a partir de los aforos realizados. Saber interpretar el valor de la constante al origen y de la pendiente, asociándolos de manera adecuada con el rol que juegan los fenómenos físicos propios del escurrimiento en cursosnaturales, es una de las tareas básicas del ingeniero. Pongamos por caso algunos ejemplos. La ecuación del gasto de un vertedero rectangular (prescindiendo de la velocidad de llegada), es:

$$Q = C \cdot L \cdot h^{3/2} \;;$$



en la que :

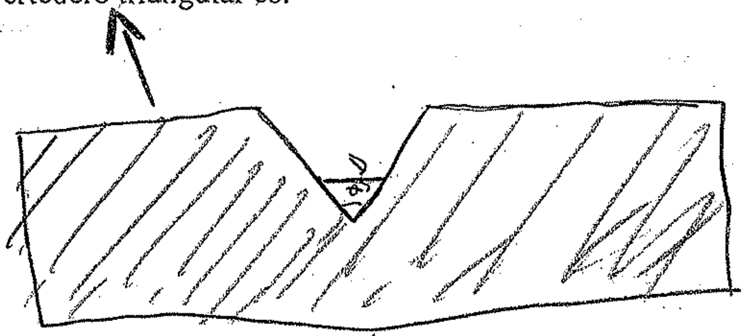
C = coeficiente;
L = longitud efectiva del vertedero;
h = carga sobre la cresta del vertedero.

Como se ve, es una función de potencia que se puede linealizar:

$$\log Q = \log (C \cdot L) + 3/2 \log h$$

En un papel doble logaritmo, log (C . L) es la ordenada al origen y la pendiente de la recta es 3/2.

La ecuación del gasto para un vertedero triangular es:



$$Q = ½ . C . L . h^{3/2} \;;$$

siendo;

$$L = 2 . h . tg (\theta/2) \;;$$

con:

θ = ángulo al centro del triángulo.

$$Q = \frac{\cancel{1}}{\cancel{2}}\, C\, h^{3/2}\, \cancel{2} . h \; tg\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

$$Q = C \; tg(\theta/2) . h^{5/2}$$

Sustituyendo y luego de linealizar queda:

$$\log Q = \log [C . tg (\theta/2)] + 5/2 . \log h \;;$$

la cual indica una pendiente 5/2, en lugar de 3/2 como la del vertedero rectangular.

Así que cuando cambia la forma del vertedero, cambia la pendiente de la línea. En el caso analizado se ve que en el cambio de forma quedaron asociadas "L" con "h". En realidad, esto es lo que sucede normalmente; de modo que si una parte de "C" ó de "L" se relaciona con "h", cambia la pendiente de la línea h-Q.

Consideremos ahora el caso de un curso natural con márgenes invariables y tomemos la ecuación de Manning:

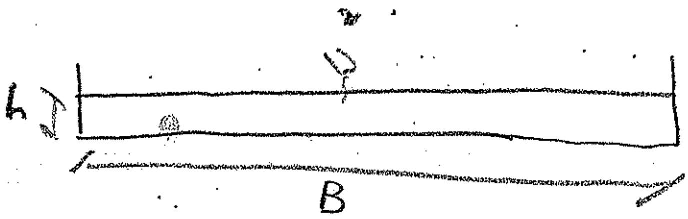
$$Q = (1/n) . A . R_H^{2/3} . \sqrt{i} \;;$$

en la que:

n = coeficiente de Manning;
A = área de la sección transversal;
R_H = radio hidráulico;
i = pendiente de la línea de energía.

Si la sección transversal es rectangular y muy ancha, la ecuación anterior se transforma en:

$$Q = (1/n) . B . \sqrt{i} . h^{5/3} \;;$$



en la que:

$$Q = \frac{1}{m}\sqrt{i} \cdot B . h . h^{2/3}$$

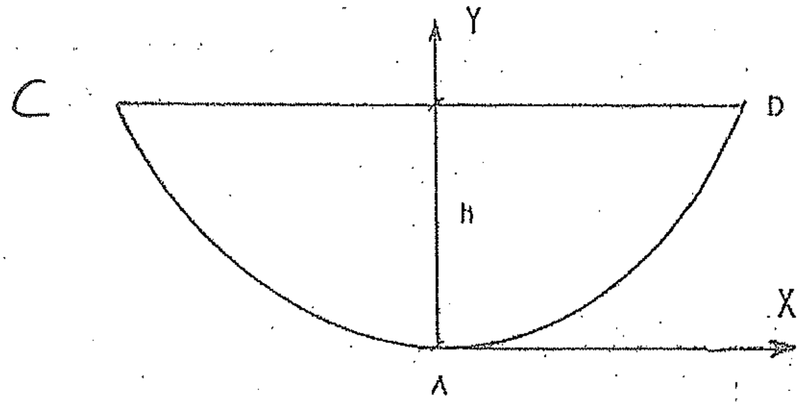
$$A = Bh \qquad R_H = \frac{A}{X} = \frac{B.h}{B}$$ (despreciando h frente B).

B = ancho del cauce.

Si se tratara de un cauce de sección triangular muy ancha, haciendo los reemplazos adecuados y linealizando queda:

$$\log Q = \log \left[(1/n) \cdot \sqrt{i} \cdot \operatorname{tg}(\theta/2) \cdot (1/2)^{2/3}\right] + 8/3 \cdot \log h$$

Y si se tratara de una sección parabólica muy ancha:



con :

$\overline{CD} = B = f(h)$.

Si se refiere la parábola al vértice A, se tiene: $y = 2 \cdot p \cdot x^2$;

área C A D = $2 \cdot 2/3 \cdot x \cdot y$;

entonces:

$h = k1 \cdot B^2$;

área mojada = $k2 \cdot B \cdot h = k3 \cdot h^{3/2}$;

si la sección es suficientemente ancha, el perímetro mojado $P \approx B$;

con lo que :

$$P \approx k4 \, . \, \sqrt{h} \; ;$$

Por lo tanto:

$$R = \frac{k3 \, . \, h^{3/2}}{k4 \, . \, \sqrt{h}} = k5 \, . \, h \; ;$$

$$R^{2/3} = k6 \, . \, h^{2/3} \; ;$$

con lo que:

$$Q = (1/n) \, . \, k3 \, . \, h^{3/2} \, . \, k6 \, . \, h^{2/3} \, . \, \sqrt{i} =$$

$$= (1/n) \, . \, k7 \, . \, \sqrt{i} \, . \, h^{13/6} \; ;$$

que muestra que la pendiente de la línea (resultado de linealizar) es 13/6. Se comprueba que la gran mayoría de los cauces naturales tienen pendientes de las líneas Q-h que quedan comprendidas entre las que se analizaron. Por tanto:

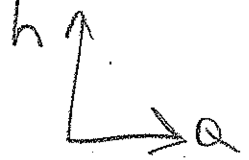
$$3/2 \leq s \leq 8/3$$

Si estudiando un caso particular, "s" cae fuera de estos extremos será motivo de sospecha y se ha de investigar para asegurar que los aforos pertenecen a una misma condición de control, como se analiza seguidamente.

Los controles han sido definidos y analizados en Hidráulica; retomaremos aquí lo que es de interés para este tema. Los controles se pueden clasificar en tres tipos:

1 - **Control de sección** (puede ser natural o artificial)
2 - **Control de cauce**
3 - **Control mezclado**

Por lo general, un mismo control no es efectivo en todo el rango de niveles que toma la superficie libre del agua en un cauce natural. En algunas estaciones hidrométricas, funciona un control de sección durante los gastos menores, el cual queda anulado por un control de cauce en los gastos superiores. En tanto un mismo control domine, la curva h-Q se muestra como una línea recta en los papeles logarítmicos. Cuando cambia el control, también cambia la recta y, por ende, sus constantes. Como una consecuencia las curvas h-Q se



estudian por partes; en donde cada parte queda establecida por su propio control.

El análisis realizado se ha hecho sobre la base de casos simples. En la práctica las cosas pueden ser más complejas, se hace sentir la influencia de otras variables; pero el razonamiento básico no cambia.

Para efectuar un análisis más "realista" de la situación, lo primero que hay que tratar es que la curva h-Q de una estación hidrométrica, durante una particular condición de control, no sea de la forma inicialmente vista, sino más bien del tipo:

$$Q = p \cdot [h - e]^s \ ;$$

en la cual aparece una nueva constante: "e".

Cada una de las tres constantes tiene su propio significado y un efecto particular sobre la curva h-Q. Nuevamente aquí, tratándose de una función de potencia, "s" es la pendiente de la recta que se obtiene en los papeles logarítmicos. CONSTANTE U ASOCIADA AL ORIGEN

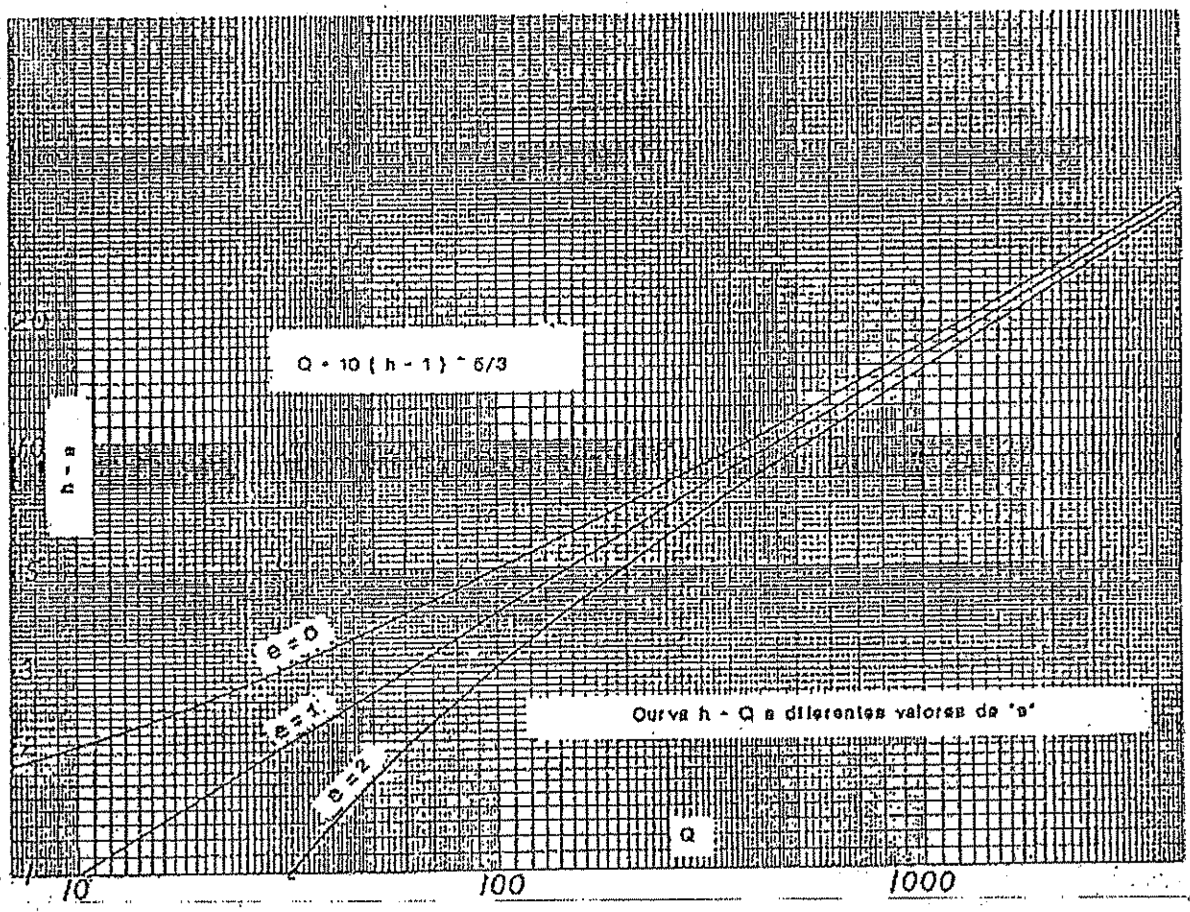
La constante "p" es el valor de la función en el origen y la constante "e" es una cantidad que se le debe agregar o sustraer a la lectura "h" para que la curva se linealice en los papeles logarítmicos; siendo que es la "lectura efectiva de h para gasto nulo".

Como se ha visto, al cambiar "s" cambia la pendiente de la curva h-Q cuando está trazada en papeles logarítmicos. Esta constante depende principalmente de la forma del cauce, es decir, de su sección transversal. Si la sección es estable y simple, no cambia. Si la sección es estable pero compuesta, varía por tramos y, por supuesto, tendrá valores diferentes en diferentes estaciones de aforos.

Doble logarítmico

Cuando cambia la constante "p" la curva h-Q se desplaza en forma paralela en los diagramas logarítmicos, en cambio en diagramas cartesianos las curvas divergen en el sentido del gasto. Esto se debe a que difieren en un factor (constante) del gasto y por tanto, a mayor gasto habrá mayor diferencia entre las curvas. Referido a una misma estación hidrométrica los cambios de "p" pueden ser causados por cambios en la rugosidad del cauce, en la pendiente de la superficie libre o en el ancho del cauce, que es lo más frecuente. En un sitio de márgenes fijas, la pendiente de la superficie libre y la rugosidad del cauce, es muy difícil que cambien. Cuando se producen cambios en estos factores el resultado es un cambio vertical en las curvas que es "paramétrico" o multiplicativo; un cambio vertical absoluto. Si los cambios verticales fuesen relativos (los cambios verticales varían según "h"), serían "acusados" por cambios en la pendiente de la línea, "s".

La constante "e", puede cambiar. Al cambiar resulta, en los diagramas logarítmicos, un cambio de la curvatura en la curva h-Q. Para una curva dada es constante; pero puede variar de una curva a otra, debido a la erosión o al embanque del fondo del cauce. En coordenadas cartesianas, un cambio en el valor de "e" se traduce en desplazamientos paralelos de las curvas h-Q. El valor de "e" debe hallarse previamente a los de "p" y "s". Para hacerlo pueden utilizarse métodos gráficos o métodos analíticos. Para hacerlo gráficamente se trabaja en un diagrama doble logarítmico. Se fija un valor de "e" arbitrario y se representan los pares de valores obtenidos a partir de aforos: (h-e ; Q). Se traza una línea entre los puntos representados. Si se obtiene una recta, el valor de "e" propuesto es el correcto, sino se tantea con otro valor hasta que los puntos se alinien.



En el método analítico, se supone que el tramo de curva estudiado es gobernado por un sólo control y los puntos, en el tramo que se investiga, se disponen siguiendo una parábola. Entonces:

$$Q = p \cdot (h - e)^{s} \quad ;$$

ó:

$$h - e = [Q / p]^{-s} \quad ;$$

para los puntos observados, Q1 y Q2, será:

$$h1 - e = [Q1 / p]^{-s} \quad ;$$

$$h2 - e = [Q2 / p]^{-s} \quad ;$$

se elige un tercer Q3 de modo que sea :

$$Q3 = [Q1 \,.\, Q2]^{1/2} \quad ;$$

entonces:

$$h3 - e = [Q3 / p]^{-s} \quad =$$

$$= \quad [Q1 \,.\, Q2 / p^2]^{-s.1/2} \quad =$$

$$= [\,(h1 - e) \,.\, (h2 - e)\,]^{1/2} \quad ;$$

para despejar "e" :

$$(h3 - e)^2 = (h1 - e) \,.\, (h2 - e) \quad ;$$

operando y simplificando:

$$e = \frac{(h3)^2 - h1 \,.\, h2}{2 \,.\, h3 - h1 - h2} \quad ;$$

Este es el valor que se debe sumar o restar a la lectura "h" realizada en el limnímetro (escala). El signo obtenido para "e", con la ecuación, indica el proceso a seguir. Sin embargo, conviene tener presente que si la curva es cóncava, el valor de "e" se debe restar y si es convexa, sumar.

Otro aspecto a analizar en los diagramas logarítmicos es el caso en que la curvas h-Q que en ellos se alinean tienden a converger en una sola línea para los gastos mayoresaunque presenten líneas aproximadamente paralelas o en abanico para los gastos menores. Algunos ejemplos mostrarán el punto.

- Primero: un control de sección puede consistir en un afloramiento de roca cubierto por una capa delgada de grava durante los gastos menores. Si varía el espesor de la capa de grava, varía el remanso durante los estiajes. Al aumentar los gastos, en las crecidas, se láva la grava y aflora la roca que es el control para los gastos mayores. En este caso la curva h-Q básica es la que pertenece al control de roca sin capas de grava y queda representada por la línea que se puede trazar más hacia la derecha del diagrama. Las otras líneas que se pueden trazar para los gastos menores, se ubican a la izquierda de esta curva básica.

- **Segundo:** un río o arroyo puede tener un cauce pequeño para los gastos chicos y otro mucho más grande, por donde circulan los gastos mayores. Si ocurren cambios en el control de sección del cauce pequeño no tendrán gran efecto (o ninguno) en la curva h-Q del cauce principal; la cual puede variar, pero la variación será debida a cambios en el cauce principal, no a cambios producidos en el cauce menor.

- **Tercero:** hay veces que se producen cambios paralelos de las curvas h-Q en los gastos chicos, los cuales tienen efecto sobre los gastos superiores, aunque dicho efecto es tan pequeño que puede ser ignorado o quedar enmascarado dentro de los errores de aforo. En este caso las líneas no se pueden definir (o no vale la pena definirlas) y la relación h-Q converge en una curva media para los gastos superiores.

Como se ve, el trazado de una curva característica h-Q, aún en el caso de suponer movimiento uniforme por simplicidad, es siempre un procedimiento de cuidado. Una tarea que requiere un profundo y exhaustivo análisis de las características geomorfológicas de la sección de estudio, así como de cada uno de los aforos realizados. La o las curvas finalmente adoptadas deberán representar lo más fielmente posible las reales condiciones del escurrimiento. No hacerlo así implica errar en las evaluaciones que posteriormente se harán con los datos obtenidos de ellas: tamaños de embalses y vertederos, cantidad de energía aprovechable (y su costo asociado), cantidad de agua derivable para abastecimiento humano y para riego, etc.

HIDROLOGÍA 1

Curvas características en movimiento no-uniforme

En la gran mayoría de los cursos naturales, existe una relación simple entre la altura "h" de la superficie libre del agua y el gasto "Q". Sin embargo hay casos en los cuales los aforos se esparcen de tal modo que no se puede adoptar una relación de h-Q simple. Las principales razones por las que se pueden esparcir los aforos son:

1- ~~Las condiciones en que se han hecho los aforos.~~
2- El lecho del curso no es estable.
3- Se produce almacenamiento entre el lugar donde se afora y el lugar donde se mide la altura del agua.
4- Se producen remansos variables.
5- Se producen cambios en la superficie del agua causados por cambios en el gasto (crecidas).

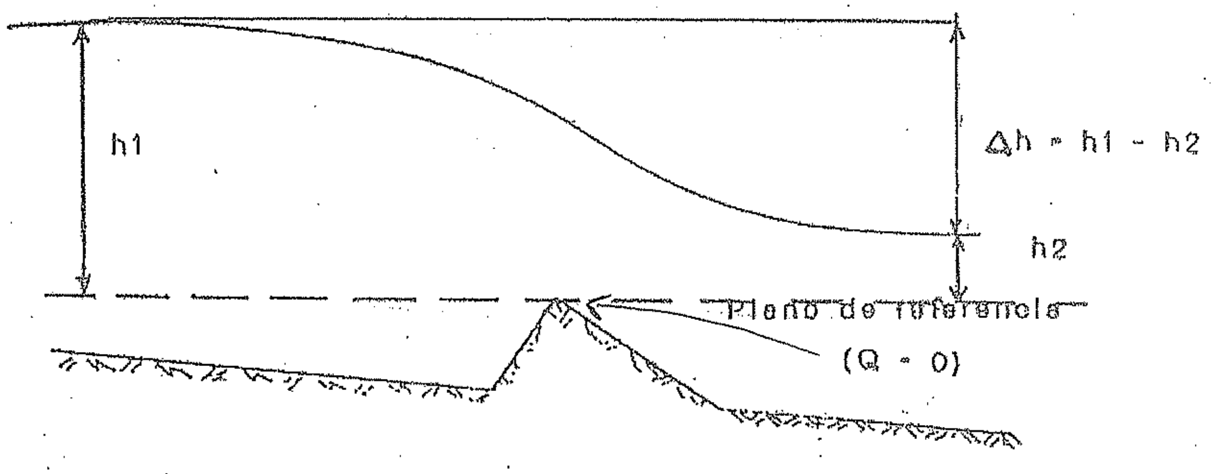
Cada una de estas razones es un problema de características especiales. Cada vez que se trata un caso con aforos esparcidos, lo primero es determinar cuales son las causas que producen el esparcimiento, para subsanarlas. Por ejemplo: si es la número 1. se debe buscar un mejor lugar para aforar o se debe acondicionar el sitio para que las influencias perniciosas desaparezcan; si es la 2, se deben realizar los aforos con mayor frecuencia, y tanto mayor, de manera que se puedan trazar curvas h-Q utilizables en períodos variables pero específicos para cada caso, dentro de los cuales se pueda aceptar como válida la última curva h-Q obtenida; si es la 3, habrá que ajustar el gasto aforado en función del volumen de agua almacenada.

HIDROLOGIA I

Por las implicancias que tiene, analizaremos en detalle la 4ta razón. El remanso es una condición en la cual se necesita una mayor altura de agua, para mantener un determinado gasto, que la necesaria si no hubiera existido el remanso. El remanso está presente siempre en los cursos naturales, puesto que en tanto exista un control de sección como un control de cauce, el remanso se produce. Sin embargo estas formas de remanso son constantes para cada altura de la superficie del agua y no preocupan. Preocupa el remanso cuando es variable, preocupa cuando se instalan diferentes gastos para cada altura, por causa de algún otro factor. Una causa común de remanso es un afluente que ingresa al río a corta distancia aguas abajo de la estación hidrométrica. También puede ser causado por la propia corriente al ser afluente de otro curso más importante o de un lago cerca de la estación. En todos los casos, el remanso varía con algún otro factor además de la altura que se ha medido en la estación hidrométrica.

Se verá primeramente el caso de **control de sección.** Un control de sección lo efectúa un vertedero natural o artificial, también un estrechamiento en la sección transversal del cauce; la cuestión es que en él, el perfil longitudinal de la superficie del agua cambia repentinamente. Si el control de sección es completamente efectivo, el escurrimiento pasa por su velocidad crítica o por su tirante crítico. Esta velocidad crítica es semejante a la velocidad de una ola sobre agua inmóvil con esa profundidad. Así es que una onda de remanso que viaje con esa velocidad hacia aguas arriba, no podrá sobrepasar el punto en el que la velocidad de la corriente, hacia aguas abajo, es igual o mayor que la velocidad de la onda de remanso.

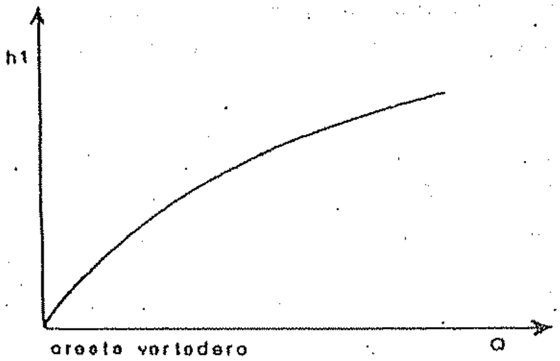
Cuando existe un control de sección, la variable que mejor mide el gasto es la carga "h1". Todas las fórmulas para evaluar el gasto por un vertedero, usan a la carga como variable independiente. La velocidad de llegada, por ejemplo, varía con la carga. Si aguas abajo de un vertedero el agua está a una altura superior a la de la cresta del mismo, se dice que el vertedero está parcialmente sumergido.



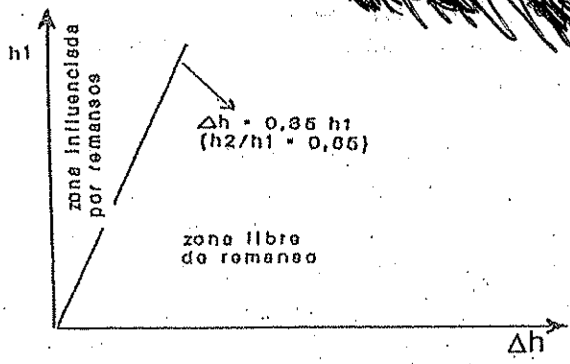
Si la sumergencia es suficiente como para afectar elgasto, éste se hace función de h. Para evaluar el h del tramo donde se encuentra el control de sección se ubican dos hidrómetros (o limnígrafos), uno aguas arriba y otro aguas abajo del vertedero, de modo de disponer de "h1" y "h2". Aunque no se puedadistin- guir fácilmente la sección transversal en la que se materializa el control, el h es una medida de la cantidad de sumergencia del mismo.

HiD

El grado de sumergencia se expresa generalmente por la relación h2 / h1 (en porcentaje). El remanso sobre un vertedero rectangular comienza cuando h2 / h1 ≈ 0,65. Dado que el remanso comienza a un determinado % de la carga sobre el vertedero, es posible trazar una línea recta que separe los h libres de remanso de los influenciados por el mismo. Generalmente se ubica el origen de medición de los "h" con el valor que corresponde para gasto nulo. Por ejemplo, para un vertedero rectangular el origen es la cresta. Cuando el h correspondiente a un dado "h1",es tal que excede al h libre se sabe con certeza que no existe remanso y que el gasto varía únicamente con la altura de la superficie libre.



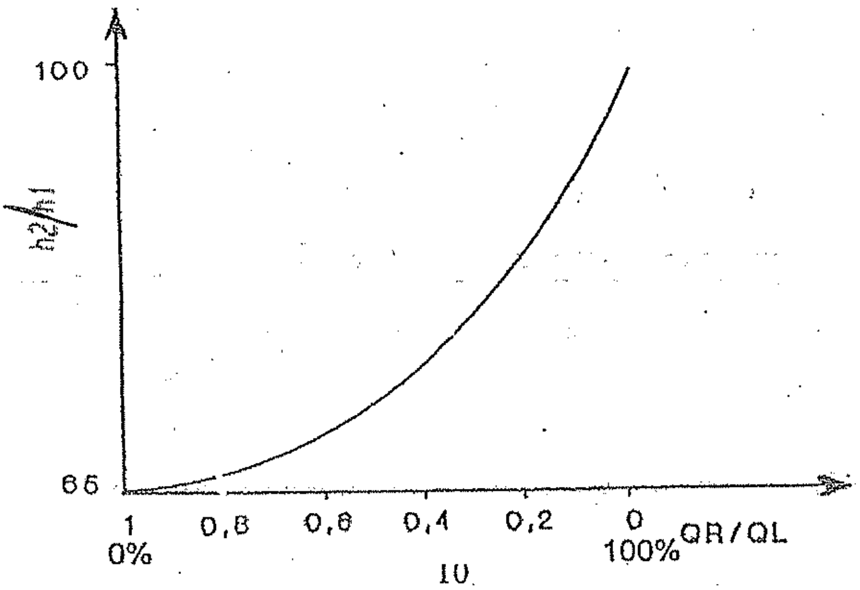
Curva h-Q para vertedero rectangular (libre)



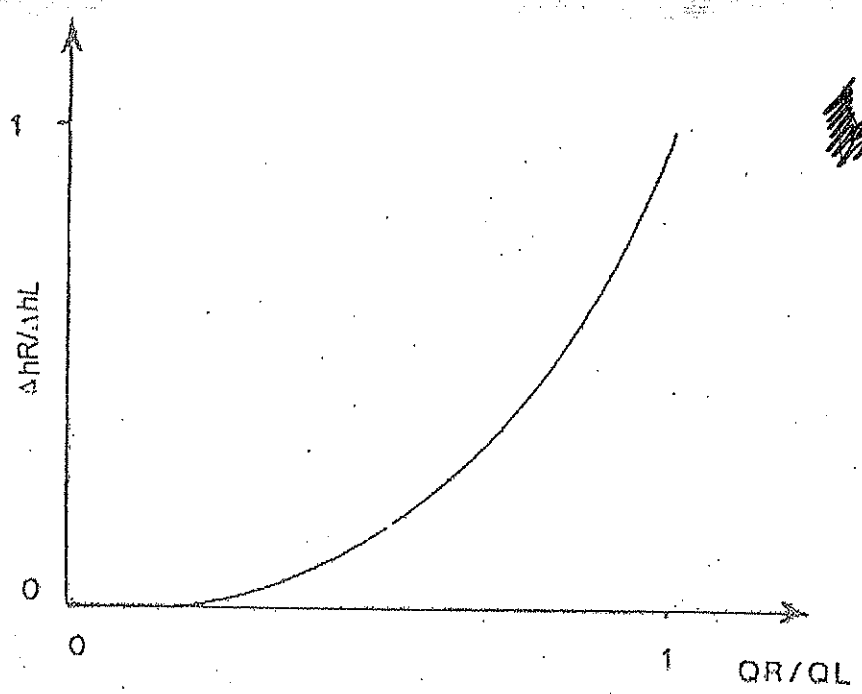
Influencia del remanso en un vertedero rectangular

Variación del gasto con el remanso.

Para una carga dada, el gasto varía con el remanso. El remanso se puede caracterizar como porcentaje de la sumergencia h2 / h1. De modo que el % de remanso se puede expresar en función de la relación del gasto en condiciones de remanso (QR) al gasto libre de remanso (QL), es decir: QR / QL . Al aumentar el % de sumergencia también aumenta el porcentaje de remanso, lentamente al principio y después más rápidamente, hasta que al 100% de sumergencia (cuando el h es nulo), el gasto también es nulo. En la figura se muestra esto.



La escala de las ordenadas de la figura se puede cambiar por la relación hR / hL (de los desniveles), es decir, haciendo intervenir también las lecturas de aguas abajo. En el punto en que cesa el remanso hR / hL debe ser 1,0. En la práctica se acostumbra usar estas relaciones y también cambiar los orígenes. Dado que por definición la curva debe pasar por los puntos (0 ; 0) ; (1,0 ; 1,0) , se tiene: .



La solución al problema de remanso variable sería sencilla si los controles fueran vertederos rectangulares, como los vistos. Sin embargo, en la práctica los controles son complejos y no se sabe cuál es la lectura de escala para gasto nulo ni el porcentaje de sumergencia, como lo ha sido en el caso del ejemplo. Pero, de todas maneras, cuando en la práctica se trata de desarrollar curvas de gastos afectados por remansos en base a los aforos realizados, se puede usar la forma básica de la curva del vertedero rectangular.

Supóngase que se trata de una estación de aforos que está afectada por remansos. Esta ha sido instrumentada con escalas (o limnígrafos) separadas por una distancia de un kilómetro aproximadamente, para medir las alturas de la superficie del agua. Las lecturas de la escala de aguas arriba (h1) se adopta como escala base, la de aguas abajo (h2) como escala auxiliar. Las escalas (limnígrafos) han sido colocadas con su cero aproximadamente en el mismo plano de referencia. Durante la realización de cada uno de los aforos se han leído ambas escalas. Se presume que existe un control de sección pero no se sabe la lectura de escala para gasto nulo ni la posición de la curva para h libre. Se podrán presentar dos casos. Uno, en el que todos los aforos están influenciados por el remanso; otro, en el que algunos lo están y otros, no. Se tiene:

a) Caso en que <u>no todos</u> los aforos están afectados por remanso.

1- Se grafican todos los aforos realizados (Qm) en función de las lecturas de escala aguas arriba (h1). Cada aforo se individualiza con su $\Delta hm = h1 - h2$.

2- Se grafican las diferencias de lecturas de las dos escalas $\Delta hm = h1 - h2$, también en función de la escala base (h1).

3- En el gráfico h1-Qm, los puntos ubicados más hacia la derecha son los que presumiblemente están libres de remanso.

A través de ellos se traza una curva que pase por el valor de h1 que, se estima, tiene gasto nulo.

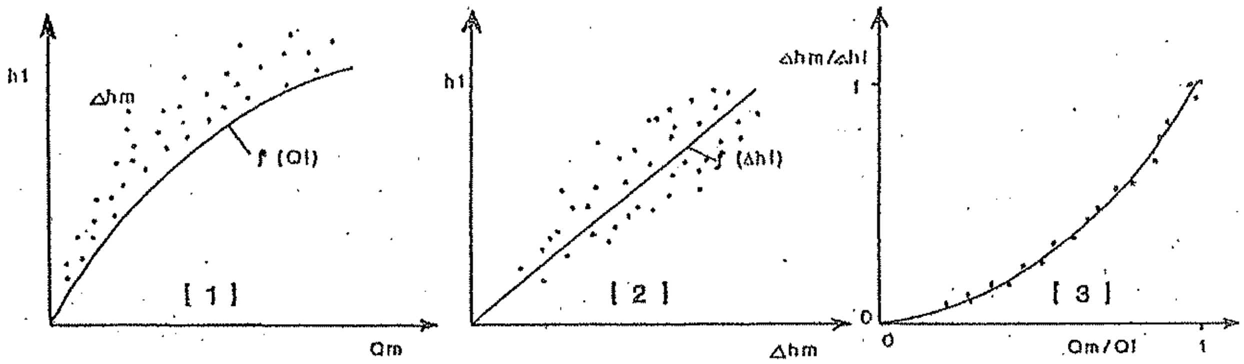
4- En el gráfico h1 - Δhm, se identifican los puntos que se presume están libres de remanso.

5- Se traza una línea que separe los puntos afectados por remanso, de los que no lo están y que además pase por la lectura de escala para gasto nulo.

6- Se calcula para cada aforo afectado por remanso la relación Δhm / Δhl ($\Delta hm = h_{medido}$; $\Delta hl = \Delta h$ libre) y la relación Qm / Ql (Qm = gasto medido; Ql = gasto según la curva h1-Qm, trazada según el punto 3-).

7- En un gráfico Δhm / Δhl en función de Qm / Ql, se ubican los puntos obtenidos según 6- y se traza una curva por esos puntos, con la condición que pase por los puntos (0 ; 0) ; (1,0 ; 1,0). En efecto, al menos teóricamente,cuando $\Delta hm = 0$ entonces: $Qm = 0$; por lo tanto, cuando $\Delta hm / \Delta hl = 0$, entonces: $Qm / Ql = 0$; y cuando $\Delta hm / \Delta h1 = 1$, entonces: $Qm / QR = 1$.

En la figura siguiente se observan los gráficos.



Debe tenerse presente que las curvas trazadas h1-Qm (gráfico [1]) y h1- hm (gráfico [2]) son curvas tentativas. Si los puntos ubicados en el gráfico [3] se esparcen demasiado, se deben repetir los pasos indicados para las curvas de los gráficos [1] y [2] de manera tal que la dispersión de los puntos en el gráfico [3] desaparezca. En general, con una o dos repeticiones se logran resultados adecuados.

b) Caso en que **todos** los aforos están afectados por remanso.

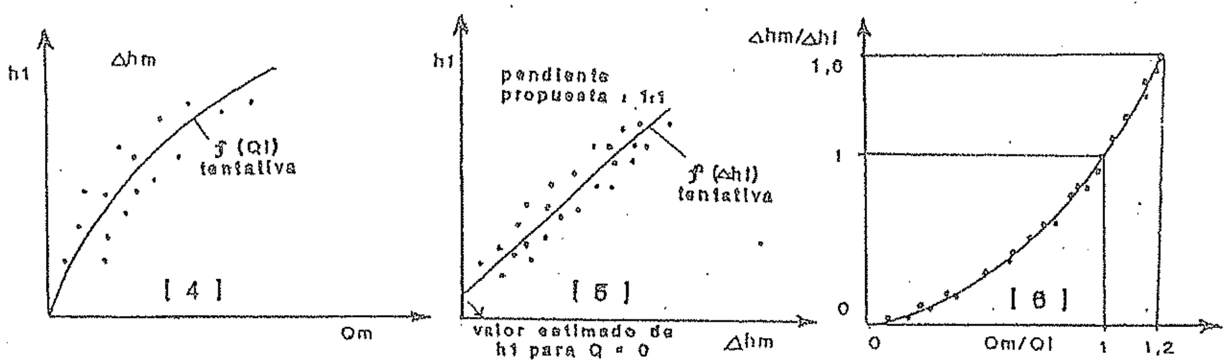
1- Se vuelcan en un gráfico [4] h1-Qm todos los aforos efectuados. Cada aforo con su Δhm.

2- En otro gráfico [5], se ubican los pares h1-Δhm, correspondientes a los mismos aforos. Se estima un valor de h1 para Qm = 0 y se traza una recta que pase por este punto y tenga una pendiente simple; por ejemplo: 1:1 ; 1:2 ; etc.

3- En el gráfico [4], h1-Qm, se traza una curva que pase por los mismos aforos que fueron involucrados por la recta trazada en el gráfico [5], según el paso anterior.

4- Se calcula Δhm / Δhl[99] y Qm / Ql[99], de modo análogo al caso a). Algunos valores superarán la unidad. Los pares obtenidos se vuelcan en el gráfico [6].

5- En el gráfico [6] se traza una curva que pase por los puntos (0 ; 0) y (1 ; 1).



6- Si en el gráfico [6] los puntos no se esparcen demasiado, se adopta la curva trazada. Si ésto no ocurre, hay que hacer correcciones. Dado que si los puntos cerca de la lectura para gasto nulo se esparcen mucho puede significar que la h1 estimada para Q = 0 es muy alta o muy baja o que las escalas de "h1" y "h2" no fueron colocadas en el mismo plano de referencia, se debe hacer:

a) Estimar otra lectura de escala para gasto nulo y repetir el proceso. Si con ello no se corrige la dispersión de los puntos en la parte inferior de la curva, entonces,

b) Se propone una cierta diferencia en los ceros de las escalas respecto del plano de referencia; es decir se atribuye un valor constante para corregir el hecho que las escalas no están en el mismo plano de referencia, y se repite todo el proceso.

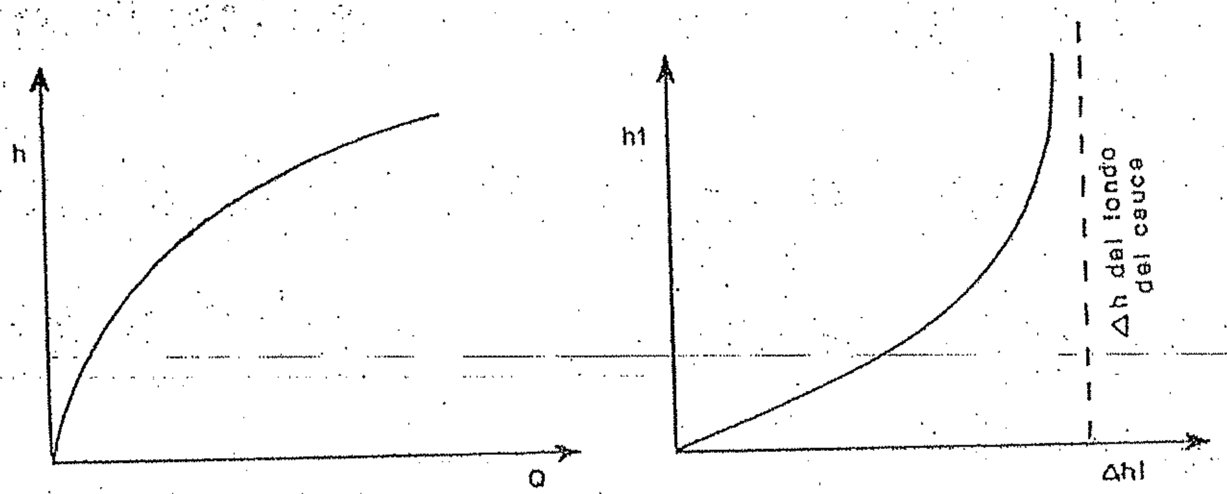
Si la suposición es correcta y realmente existe un sólo control de sección, uno de los dos procedimientos descriptos en a) ó b) corregirá la dispersión de los puntos.

[99] Obsérvese que aquí el subíndice l no significa libre sino Curva de Q tentativa y recta de Δh tentativa. Por eso se obtienen valores superiores a 1. (Ver que algunos Q_m superan la curva tentativa Ql).

A continuación se analizará el caso de **"control de cauce"** . Cuando existe un control de cauce, la rugosidad del cauce es determinante en la relación h-Q del curso de agua. En este tipo de control el remanso se caracteriza principalmente por el abatimiento de la pendiente de la superficie libre. Siendo que la pendiente de la superficie libre es el factor que mejor mide el gasto, para aforar en condiciones de remanso variable se deben obtener datos sobre la variación de dicha pendiente. Si se colocan dos hidrómetros, la diferencia de sus lecturas, o el desnivel (h) del tramo, no da la pendiente de la superficie libre porque el perfil longitudinal no es una recta sino una curva. A pesar de ello se utiliza el h, como una aproximación, para indicar la pendiente.

Considérese la curva h= f (Δhl) (Δhl de la superficie sin remanso, libre).

Si la pendiente es nula, también será nulo el gasto de modo que la curva f(Δhl) debe pasar por el punto de Δhl = 0. Para gastos muy chicos, el Δhl tendrá también valores chicos. En los tramos inferiores de la curva, el Δhl aumenta de una manera moderada al aumentar el gasto. Pero, al contrario del caso de control de sección la curva Δhl, no continúa su aumento según lo hace "h" . En las alturas superiores el Δhl se aproxima, pero no excede, al Δh del fondo en el tramo. Por lo tanto, para los gastos menores la curva h_l-Δhl es semejante a la recta de un control de sección, pero para los gastos superiores no varía mucho con la altura de la superficie, como lo indican las figuras siguientes.



Cuando existe un "control de cauce", no se sabe la posición de la curva h_l=f(Δhl). Sin embargo, como se viera en el caso de "control de sección", el saber por lo menos su forma ayuda en el análisis. Cualquier curva que se asemeje a la curva Δhl, tendrá un % constante respecto de la curva f(Δhl). Por esta razón se handesarrollado métodos simplificados para casos particulares que admiten simplificaciones. Así, se puede encontrar en la bibliografía : el método de Δh constante; el método de Δh unidad; el método de Δh normal y otros. Aquí sólo se analiza el método general.

En este método, para corregir los aforos afectados por remanso se procede en forma parecida a los casos de control de sección. Como en aquellos, pueden o no haber aforos libres de remanso.

caso a) **No todos** los aforos están afectados por remanso.

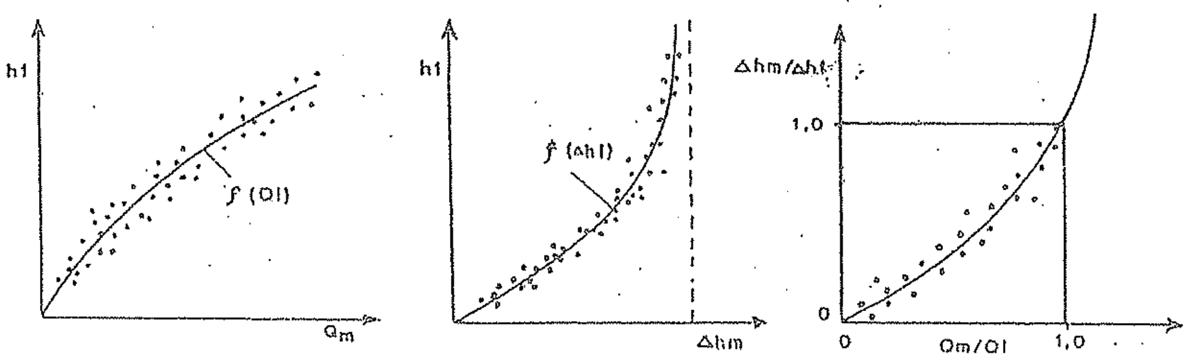
Se procede en forma similar al trazado de los gráficos para control de sección y teniendo presente que en el gráfico Qm / Ql - Δhm / Δhl , la curva debe pasar por los puntos (0 ; 0) ; (1,0 ; 1,0) por definición y que, además, debe ser tangente a una paralela al eje Δhm / Δhl.

caso b) **Todos** los aforos están afectados por remanso.

Si todos los aforos están afectados por remanso, lo primero que se debe hacer es trazar la curva h1= f(Δhl), recordando su forma teórica, y luego, en base a ella una curva h1= f (Ql).El proceso es el siguiente:

1) Se grafican h1- Δhm. Se traza una curva entre los puntos (primero recta y luego una curva asintótica), que establece los valores Δhl.

2) Se grafican los puntos h1-Qm y se traza entre ellos una curva tentativa en correspondencia con los mismos aforos que fueron interesados por la curva del punto anterior, obteniéndose *f* (Ql).



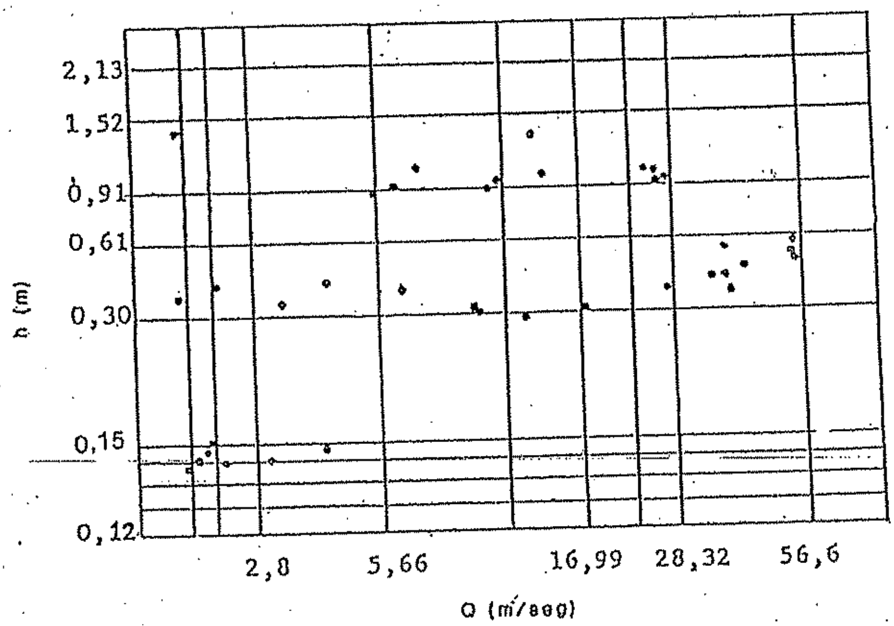
3) Se calculan las relaciones Δhm / Δhl y Qm / Ql y se grafican. Se traza una curva entre los mismos que pase por (0 ; 0) y por (1,0 ; 1,0). Dado que esta curva no está relacionada a condiciones de Δh libre, en su tramo superior no tiene porqué terminar en (1,0 ; 1,0). Por eso se prolonga la curva según lo indican los aforos. Si los apartamientos de los puntos respecto de la curva son pequeños, la corrección por remanso está lograda. De lo contrario habrá que realizar otras correcciones.

4) Si los puntos graficados se esparcen progresivamente más hacia la parte inferior de la curva, puede ser debido a un error en la lectura de escala para gasto nulo o que los dos hidrómetros no están en el mismo plano de referencia. También es posible que la curvatura dada a la curva h1= f(Δhl) del paso 1) no sea la correcta. Por ello se deberán repetir los intentos tantas veces como sea necesario hasta que los puntos estén con los apartamientos mínimos, aceptables, respecto de las curvas.

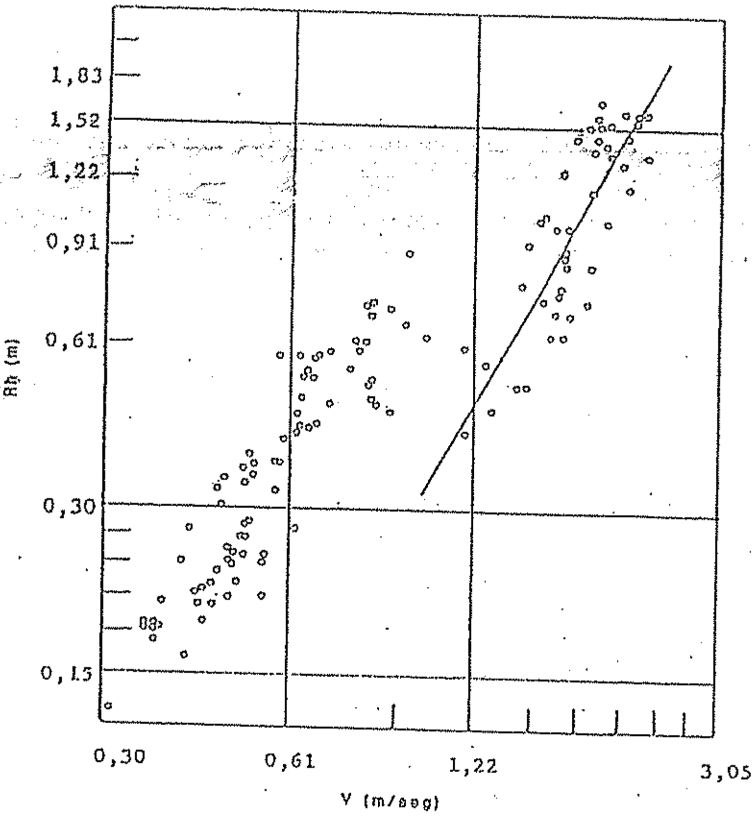
Es evidente que, como en todo método de prueba y error, antes de aplicar las correcciones se debe estar seguro que los aforos están libres de errores de medición.

Curvas Características en cauces aluviales

El desarrollo de métodos para determinar el gasto en cauces aluviales ha sido un problema desde que se establecieron estaciones de aforos para medir en forma sistemática. Como en todas las estaciones de aforos, se ha intentado relacionar el tirante de la corriente con el gasto. Sin embargo, en la mayoría de los cauces aluviales, se obtienen relaciones h-Q con discontinuidades, por lo que las curvas que se logran tienen poco mérito. Las relaciones h-Q que se obtienen enmascaran otras relaciones subyacentes. Esto se debe a que en cauces naturales aluviales, ni el fondo ni las márgenes son fijos. En la figura se muestra un ejemplo típico de la relación h-Q en un río que tiene cauce de arena.



La relación subyacente se puede revelar cambiando las variables. El efecto de la variación en la cota de fondo, se elimina si se sustituye "h" por el radio medio hidráulico. Por otro lado, el efecto de la variación del ancho del cauce se elimina si se usa la velocidad media del aforo en lugar del gasto. La figura ilustra al respecto.



Se puede observar que los valores menores de los aforos forman un conjunto y los mayores forman otro; mientras que varios caen en un espacio amorfo de discontinuidad.

Tratar este tema en detalle requiere conocimientos que se tratan en Hidráulica Fluvial. Aquí se concluye señalando que para resolver los problemas que presentan los cauces aluviales para evaluar correctamente sus aportes, lo más indicado es realizar aforos en forma más continuada que en un curso de lecho estable.Y tanto más, cuanto más erosión o sedimentación acuse la sección del cauce.

Sensibilidad de un control

Mientras más Δh acusa una estación de aforos para una misma variación del gasto ΔQ, permite dar más confianza en la valoración de los gastos, por dos razones principales: primero, porque permite disminuir los errores relativos de las lecturas de escala y segundo porque pequeñas variaciones del gasto pueden ser apreciadas a través de un Δh suficientemente grande. Por esta razón se caracteriza una estación de aforos con la relación:

$$dh / dQ \; ;$$

conocida como **sensibilidad de la estación**. Ejemplo:

Según Manning, el gasto se puede calcular por:

$$Q = (A/n) . \sqrt{i} . R^{2/3} \;;$$

entonces se tiene:

a) para secciones rectangulares muy anchas:

$$A = B . h$$

$$p \approx B$$

$$h \approx R$$

por tanto:

$$QR = (B/n) . \sqrt{i} . h^{5/3} \;;$$

y la sensibilidad:

$$dh/dQR = \frac{d}{dQR} \left[(n . QR)/(B . \sqrt{i}) \right]^{3/5} \;;$$

$$= 3/5 . \left[\frac{n . QR}{B . \sqrt{i}} \right]^{-2/5} n/(B . \sqrt{i}) =$$

$$\frac{dh}{dQR} = 3/5 . \frac{n}{B . h^{2/3} . \sqrt{i}}$$

b) para secciones triangulares muy anchas:

$$A = B . h/2$$

$$p \approx B$$

$$h/2 \approx R$$

por lo tanto

$$QT = 0{,}315 \,.\, B/n \,.\, \sqrt{i} \,.\, h^{5/3} \;;$$

con:

$$(1/2)^{5/3} \approx 0{,}315$$

y la sensibilidad:

$$dh / dQT = \frac{d}{dQT}\left[\frac{n \,.\, QT}{0{,}315 \,.\, B \,.\, \sqrt{i}}\right]^{3/5} \;;$$

$$= 3/5 .\left[\frac{n \,.\, QT}{0.315 \quad B \,.\, \sqrt{i}}\right]^{-2/5} \frac{n}{0.315 \quad B \,.\, \sqrt{i}} \;;$$

$$\frac{dh}{dQT} = 3/5 \,.\, \frac{1}{0.315} \,.\, \frac{n}{B \sqrt{i} \,.\, h^{2/3}}$$

Esto muestra que la sensibilidad de una estación de aforos crece con el aumento de la rugosidad y decrece con el aumento del ancho, la disminución de la pendiente y el aumento del tirante del curso en el tramo; mientras que la sección triangular es más sensible que una rectangular.

Teniendo en cuenta que una lectura de escala se realiza con una aproximación $\pm \Delta h$, resulta que el error relativo correspondiente a un gasto evaluado con valores de "h" será tanto más chico cuanto mayor sea la sensibilidad, especialmente con los gastos más chicos.

Relacionado con ésto aparece el error relativo dQ / Q del gasto Q que corresponde a una lectura de escala h (que se ha leído con un error absoluto "dh" , propio del tipo de hidrómetro y de la "ecuación" de lectura). Para el caso de canal rectangular muy ancho es:

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{5}{3} \,.\, \frac{n \,.\, B \,.\, h^{2/3} \,.\, \sqrt{i}}{\sqrt{i} \,.\, B \,.\, h^{5/3} \,.\, n} \,.\, dh = 5/3 \;\frac{dh}{h}$$

con lo que:

$$dh / h = 3/5 \, . \, dQ / Q \;;$$

por ejemplo para un error relativo en el gasto del 5 % , será:

$$dh / h = (3/5) \, . \, (5 / 100) = 3 / 100 \approx 1 / 33 \;;$$

Osea: para una lectura de escala de 33 cm, la apreciación de la lectura deberá ser ± 1 cm como máximo para mantener el error relativo de los gastos en el 5 % . Este ejemplo muestra lo difícil que es medir bien los gastos de estiaje usando las escalas normales con divisiones al centímetro.

Elección de un tramo de aforos

Ejemplo:

BAJA 5mm CADA 10 000m

Si se tiene un tramo de un río cuya pendiente media es i0 = 0,0005 (río típico de llanura, como por caso lo es el río Matanza en Ezeiza), en el que se han de colocar dos escalas ~~con~~ EN las cuales el error de lectura es de 0,5 cm; si el error máximo admisible en la determinación de Δh es de 5 % : con qué separación mínima deberán ubicarse las escalas ? . Se sabe:

100 cm – 1m

0,5 cm – X = 0,005 m

$$\frac{2 \, . \, \varepsilon}{\Delta h} = er \;;$$

ε EN m

5 %

entonces:

$$(2 \, . \, 0{,}005) / 0{,}05 = 0.20 \text{ m} = \Delta h \;;$$

y:

$$L = \Delta h / i0 = 0{,}20 / 0{,}0005 = 400 \text{ m}$$

Si el error admitido hubiera sido del 10 % , la separación se reduciría a 200 m. Por otro lado, si el río hubiera tenido una pendiente i0 = 0.00002 (caso del río Paraná, por ejemplo), y si el error admitido fuera del 5 % , la separación de las escalas debe ser 10.000 metros. Lo que muestra lo delicado del problema, dado que, más allá de lo dificultoso que resulta leer dos escalas distanciadas 10 Km en forma simultánea, es sumamente difícil disponer de un tramo de semejante longitud en el cual se pueda despreciar, o medir con suficiente exactitud, los gastos no concentrados afluentes al mismo y admitir que en ese tramo el movimiento es estacionario, no hay influencia de remanso y, por tanto, que el perfil superficial es lineal entre ambas estaciones de h.