



Centro Interamericano de
Documentación e
Información Agrícola
13 JUL 1994
IICA - CIBIA

CONVENIO IICA-SENARA II ETAPA DEL PROYECTO DE RIEGO ARENAL-TEMPISQUE

**INTRODUCCION AL DISEÑO HIDRAULICO
DE CANALES Y A LA MEDICION DE CAUDALES**

Por

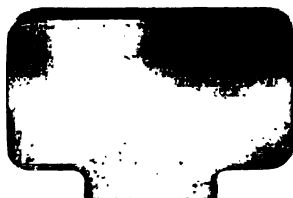
H. Pizarro

**BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO
FONDO DE INVERSION DE VENEZUELA**

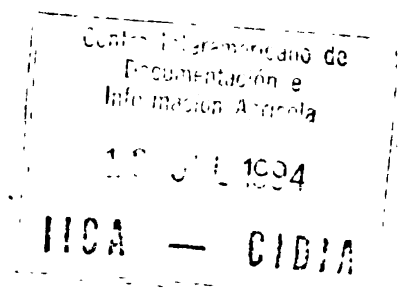
SERVICIO NACIONAL DE AGUAS SUBTERRANEAS, RIEGO Y AVENAMIENTO

OFICINA DEL IICA EN COSTA RICA

IICA
F08
1591



CONVENIO IICA-SENARA



II ETAPA DEL PROYECTO DE RIEGO ARENAL TEMPISQUE

**INTRODUCCION AL DISEÑO HIDRAULICO
DE CANALES Y A LA MEDICION DE CAUDALES**

Por

H. Pizarro

Ley de Préstamo 208-IC-CR

**BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO
FONDO DE INVERSION DE VENEZUELA**

11CA
F08 I 59 i

00006745

INTRODUCCION AL DISEÑO HIDRAULICO DE CANALES

TABLA DE CONTENIDO

	Página
Diseño hidraulico de Canales.....	1
Clasificación de Flujo.....	1
Análisis de los Componentes.....	3
Diseño hidraulico de canales en flujo normal.....	5
Diseño de un canal a máxima eficiencia hidraulica.....	9
El flujo critico.....	10
Curva de energia especifica.....	11
Aplicación a un canal rectangular.....	13
Caso del canal triangular.....	13
Medición de caudales.....	14
Volumétrico.....	14
Gravimétrico.....	14
Uso del molinete.....	15
Uso del flotador.....	16
Aforadores basados en la producción del flujo critico.....	16
El aforador Parshall.....	17
Instalación de un aforador Parshall.....	18
El aforador sin cuello.....	24
Principio de la medición del caudal.....	25
Ecuaciones de diseño del aforador sin cuello.....	26
Instalación de un aforador sin cuello.....	28
Medición del caudal por medios quimicos.....	31
Bibliografía.....	32

Diseño Hidráulico de Canales

H. Pizarro C*

Se entiende por Diseño Hidráulico de Canales el empleo de los principios hidráulicos para determinar la coherencia entre los elementos del flujo y la geometría del conducto. En el flujo del agua en canales la superficie libre del agua está expuesta a la presión atmosférica.

Para el estudio del flujo del agua en canales, es muy general el uso de la fórmula de Manning-Strickler la cual se presenta de la siguiente forma:

$$Q = \frac{A R^{2/3} I^{1/2}}{n} \quad (1)$$

Donde:

Q = caudal en [l³/t] puede ser l/s, m³/s, etc
 A = área mojada del flujo [l²] dm², m², etc
 n = coeficiente de rugosidad [l^{-1/3} t]
 R = radio hidráulico [l] dm, m, etc
 I = pendiente.

La expresión (1) puede agruparse así:

$$\frac{Q n}{I^{1/2}} = A R^{2/3}$$

El grupo de elementos de la izquierda del signo igual constituye el factor del flujo y el grupo de la derecha es el factor de forma.

Clasificación del flujo

a- Flujo uniforme: si a lo largo del canal no hay variación de los elementos. Ejemplo el flujo en un canal artificial, de sección constante y revestido.

b- Flujo no uniforme o espacialmente variado si a lo largo del canal hay variación de los elementos del flujo. Ejemplo un canal natural que presenta contracciones y ensanchamientos.

* consultor en riego y drenaje convenio IICA-SENARA

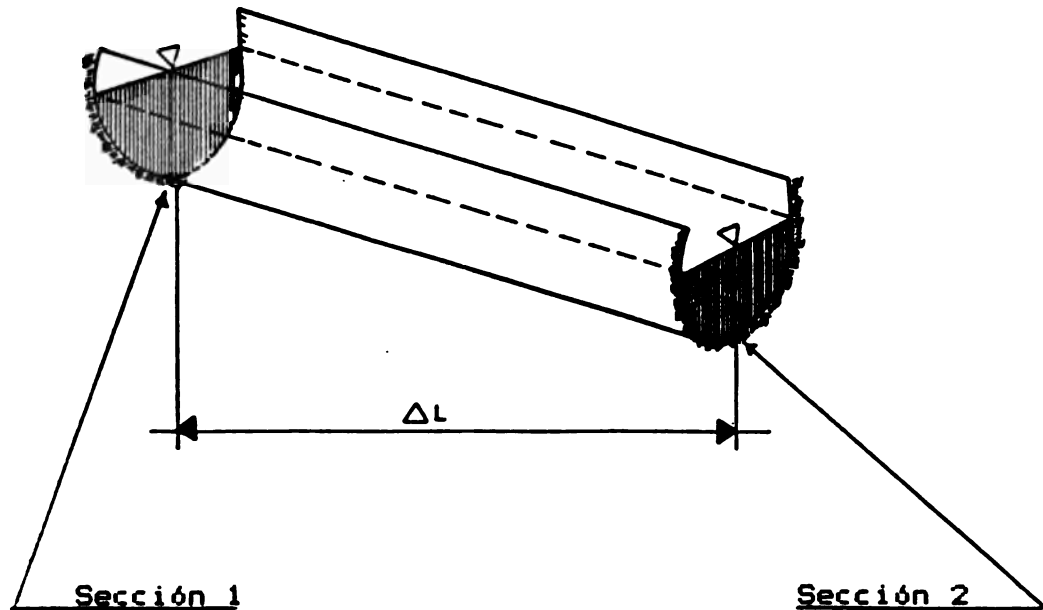


Fig 1 Tramo de un flujo en canales

	Sección 1	Sección 2
Caudal	Q_1	Q_2
Area mojada	A_1	A_2
Velocidad	V_1	V_2
Radio hidráulico	R_1	R_2

flujo uniforme $Q_1=Q_2; A_1=A_2; V_1=V_2; R_1=R_2$

flujo no uniforme $Q_1 \neq Q_2; A_1 \neq A_2; V_1 \neq V_2; R_1 \neq R_2$

c- Flujo permanente: Si en una sección del canal los elementos tanto del flujo como geométricos no cambian según el tiempo se tiene un flujo permanente.

d- Flujo no permanente: cuando los elementos hidráulicos del flujo como los geométricos son diferentes en tiempos diferentes el flujo es no permanente.

El flujo será permanente si:

		tiempo		
	Q	t_1	t_2	$t_1 \neq t_2$
Caudal	Q	Q_1	Q_2	$Q_1=Q_2$
Area mojada	A	A_1	A_2	$A_1=A_2$
Velocidad	V	V_1	V_2	$V_1=V_2$
Radio hidráulico	R	R_1	R_2	$R_1=R_2$

Se tiene flujo no permanente o temporalmente variado si se dan las situaciones siguientes:

		tiempo		
		t1	t2	T1+t2
Caudal	Q	Q1	Q2	Q1+Q2
Area mojada	A	A1	A2	A1+A2
Velocidad	V	V1	V2	V1+V2
Radio hidráulico	R	R1	R2	R1+R2

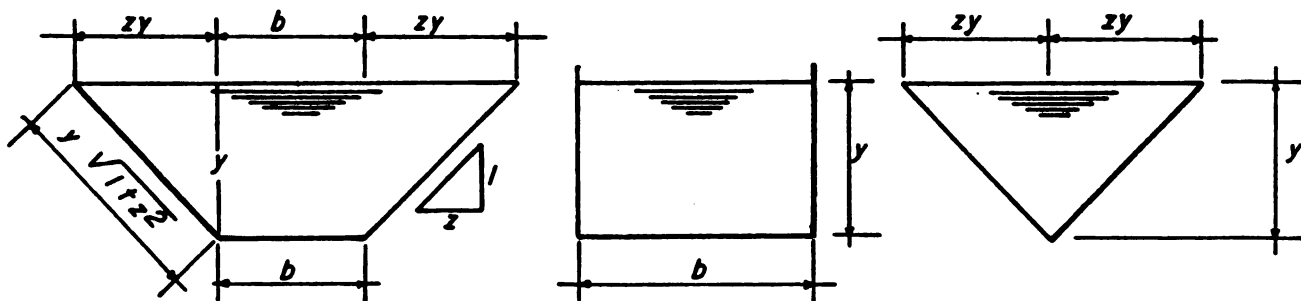
Cuando un flujo en un canal es uniforme y permanente se dice que el flujo es normal. Cuando se realiza el diseño hidráulico de canales se admite como válida la hipótesis de que el movimiento del agua es uniforme y permanente. Esta condición se presenta en canales artificiales de sección constante impermeables y alimentados por un caudal de entrada constante.

Análisis de los componentes de la expresión (1)

El radio hidráulico (R) se concibe como la contribución de la geometría del canal al movimiento del fluido. Se expresa como la relación entre el área mojada dividida por el perímetro mojado.

$$R = A/P$$

El área mojada (A) es el área de la sección transversal del flujo en canales. Depende de la sección geométrica del canal:



$$A = by + zy^2$$

$$P = b + 2y\sqrt{1 + z^2}$$

$$A = by$$

$$P = b + 2y$$

$$A = zy^2$$

$$P = 2y\sqrt{1 + z^2}$$

El perímetro mojado es la línea del canal en contacto con el fluido [1]

La pendiente expresada como el desnivel existente entre dos puntos, dividido por la distancia que los separa.

$$I = \delta H / \delta L$$

Donde:

I = pendiente
 δH = diferencia de nivel entre dos puntos
 δL = longitud que separa los dos puntos

En el flujo del agua en canales se consideran tres tipos de pendiente:

1- Pendiente de fondo del canal [I]: Es la diferencia de altura entre dos puntos del fondo del canal dividida por la distancia que los separa.

2- Pendiente de la superficie libre del agua [i]: es la diferencia entre dos puntos de la superficie libre del agua dividida por la distancia que los separa.

3- Pendiente de la línea de energía [J] : es la diferencia de energía entre dos puntos de la línea de energía dividida por la distancia que los separa.

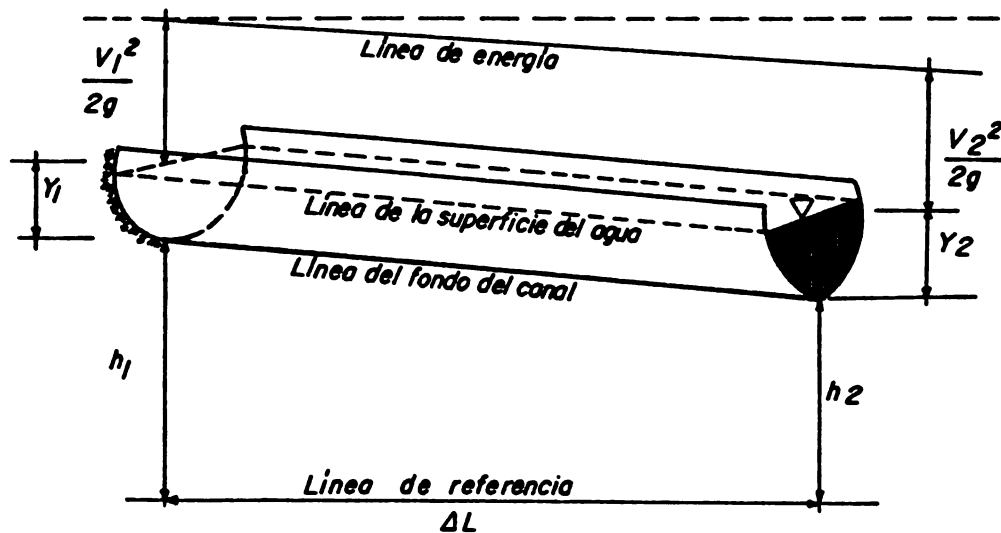


Fig.2 Componentes de energía

$$I = \frac{h_1 - h_2}{\delta l} = \frac{\delta h}{\delta l}$$

$$i = h_1 + y_1 - [h_2 + y_2] \quad ; \quad Z_1 = h_1 + Y_1 \quad ; \quad Z_2 = h_2 + y_2$$

$$i = \frac{Z_1 - Z_2}{\delta L} = \frac{\delta Z}{\delta L}$$

$$H_1 = h_1 + y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \quad \quad \quad H_2 = h_2 + y_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

$$J = \frac{H_1 - H_2}{\delta L} = \frac{\delta H}{\delta L}$$

Para el diseño hidráulico de canales debe emplearse la pendiente de la línea de energía, sin embargo, en el flujo normal, las tres líneas indicadas en la fig 2 son paralelas y se tiene que:

$$I = i = J$$

lo que admite el empleo de la pendiente de fondo del canal [1].

Diseño hidráulico de canales en flujo normal

En general, de los elementos de la expresión [1] se conoce:

1- El caudal Q por conducir, se obtiene a partir de las necesidades brutas de los cultivos para el mes de máxima demanda.

2- La pendiente del fondo del canal que puede fijarse según la topografía del terreno o se escoge de acuerdo a la experiencia para tener un flujo suave o subcrítico que facilite el manejo del caudal a fin de lograr su buena distribución. Debe ser igual o menor a 0.001

3- El coeficiente de rugosidad $[n]$ que depende del acabado de la superficie del canal. Si la superficie es muy lisa como en el caso de los tubos PVC $n=0.010$, si el canal será revestido de concreto bien pulido $n=0.014$, si el acabado no es bueno $n=0.015$ o $n=0.016$, si el canal es en arcilla con superficie bruta $n=0.022$, si el canal es en tierra franca $n=0.030$. Para los canales secundarios y terciarios al interior de la finca donde crecen malas hierbas puede usarse $n=0.030$.

4- Con esta información se conoce el factor de flujo:

$$\frac{Q n}{\sqrt{I}}$$

5- En el caso del factor geométrico o de forma, es preciso escoger la forma del canal, que es función de la naturaleza del material donde se construirá el canal y también si éste será en corte o en relleno. Cuando el canal se construye en relleno debe de ser de forma triangular o trapezoidal y debe de revestirse para protegerlo y darle estabilidad. Si el material es roca, la sección puede ser rectangular. En el caso de tierra el canal debe tener un talud [z] cuyo valor se escogerá según la indicación siguiente:

<u>Material</u>	<u>Z</u>
arcilla	0.5
franca	1.0
arena	1.5

6- Seleccionada la geometría es necesario determinar b e y que permitirán encontrar el área y el perímetro mojados con los que se obtiene el radio hidráulico.

7- Hay dos incógnitas b e y y una sola ecuación no lineal, lo que conlleva a múltiples soluciones.

8- El valor de la base [b] puede escogerse según el implemento que se emplee para la construcción; así si es con una pala manual [b] será un múltiplo del ancho de la herramienta 0.20, 0.40, 0.60, 0.80 etc. Si es una pala mecánica igualmente [b] podrá ser múltiplo de 0.40 m (0.40, 0.80 etc).

9- Para cada valor de [b] se obtiene el correspondiente valor de [y]. Después de varios tanteos se escoge aquellos que satisfagan nuestras necesidades, en general, que se logre un canal funcional, económico y durable.

Ejemplo:

Diseñar un canal para conducir 0.300 m³/s, con una pendiente de 0.001, un coeficiente de rugosidad n=0.025. La sección transversal será trapezoidal con Z=1. La estructura será construida con una pala manual.

Solución:

De la expresión (1)

$$\frac{Q n}{\sqrt{I}} = \frac{[by + zy^2]^{5/3}}{[b + 2y\sqrt{1 + z^2}]^{2/3}}$$

$$\frac{0.3 * 0.025}{\sqrt{0.001}} = \frac{0.3 * 0.025}{0.0316} = 0.237342$$

El factor de forma:

$$\frac{[by + y^2]^{5/3}}{[b + 2.8284y]^{2/3}}$$

Para $b=0.40$ m, hallemos el valor de y que satisface las condiciones impuestas para el diseño. Esto se logra por tanteos para lo cual escribiremos:

$$F(y^*) = 0.237342$$

$$F(y) = \frac{[0.4 + y^2]^{5/3}}{[0.4 + 2.8284y]^{2/3}}$$

$$y = 1; F(y) = 0.8021$$

$$F(1) > F(y^*)$$

luego y debe ser menor que 1

$$y = 0.5; F(0.5) = 0.1776$$

$$F(y) < F(y^*)$$

luego $0.5 < y < 1.0$

$$y = 0.6; F(0.6) = 0.2605$$

$$F(0.6) > F(y^*)$$

$$0.5 < y < 0.6 ; y=0.55 ; F(0.55) = 0.2167$$

$$0.55 < y < 0.6 ; y = 0.57 ; F(0.57) = 0.2337$$

podemos admitir que:

$$F(0.57) = F(y^*)$$

$$y^* = 0.57$$

Para esta solución tendremos:

Q (m ³ /s)	A (m ²)	P (m)	R (m)	V (m/s)	b (m)	y (m)	I	n
0.3	0.5529	2.0122	0.2748	0.5426	0.4	0.57	0.001	0.025

Para otro valor de b se encontrará otro conjunto de valores, excepto para Q, n, I que permanecen constantes. Cualquier cambio en alguno de los componentes del factor del flujo dará lugar a otro conjunto de valores que constituyen también una solución aceptable; pero se escogerá aquella que siendo funcional tenga el mínimo costo.

Admitamos que los valores encontrados nos dan la mejor solución, luego debemos proceder al diseño constructivo para lo cual hay que calcular el borde libre es decir hay que agregar al tirante la altura de agua de la lluvia de máxima intensidad en 24 horas para un período de retorno de 10 años y también el efecto del oleaje causado por el viento. Si no existe las observaciones indicadas, se tendrá una estimación con las expresiones siguientes:

$$bl = [\zeta y]^{0.5}$$

Donde:

bl = borde libre

y = tirante

ζ = coeficiente, depende de la influencia de los factores climáticos. Para zonas semitropicales $\zeta = (0.2 - 0.5)$

Si el canal será revestido hay que calcular el volumen de excavación y el volumen de revestimiento. Para el mantenimiento se considerará un camino carrosable.

Otros criterios en el diseño hidráulico de canales

- a- de la velocidad máxima permisible
- b- de mínima infiltración
- c- de máxima eficiencia hidráulica

a- La velocidad máxima permisible: es aquella que no produce erosión de la sección del canal no revestido. Se estima en función de la experiencia del diseñador y depende del tipo de material que forma el canal.

Ejemplo : Para un canal construido sobre arena fina para transportar agua que contiene sólidos en suspensión
 $V_{mp} = 0.75$ m/s.

Si el material del canal es arcilla muy cohesiva
 $V_{mp} = 1.5$ m/s.

Si se adopta el valor máximo permisible de la velocidad en la ecuación (1)

$$V_n = V_{mp} = \frac{1}{n} R_h^{2/3} \quad (2)$$

Se calcula R_h y según la forma del canal se determinan los elementos geométricos que sean coherentes con el factor de flujo.

b- El método de la infiltración mínima admite como hipótesis que la velocidad de infiltración es función del tirante y que el perímetro del canal debe ser tal que con el tirante que se tenga, la infiltración sea mínima.

c- Diseño de un canal de máxima eficiencia hidráulica.

De la expresión (1) se deduce que la capacidad de conducción del canal aumenta cuando aumenta el radio hidráulico o lo que es lo mismo cuando el perímetro mojado es mínimo dado un valor de área mojada. La sección transversal de un canal que para un área dada presenta el mínimo perímetro es el semicírculo, sin embargo tiene limitaciones constructivas y en su lugar se escoge la sección trapecial.

Relaciones de los elementos geométricos: [base del canal y tirante] para un canal de sección trapecial de máxima eficiencia hidráulica.

Para un canal de sección trapecial se tiene:

$$A = by + zy^2 \quad b = Ay^{-1} - zy$$

$$P = b + 2y\sqrt{1 + z^2} = Ay^{-1} - zy + 2y\sqrt{1 + z^2}$$

$$P = Ay^{-1} + y [2\sqrt{1 + z^2} - z]$$

$$\frac{\delta P}{\delta y} = -Ay^{-2} + 2\sqrt{1 + z^2} - z$$

Para que P sea mínimo $\delta P / \delta y = 0$; luego

$$Ay^{-2} = 2\sqrt{1 + z^2} - z$$

$$A = y^2 [2\sqrt{1 + z^2} - z] = by + zy^2$$

$$b = 2y [\sqrt{1 + z^2} - z]$$

Para el valor de z escogido según la naturaleza del terreno se encuentra la relación que debe existir entre b e y así si

$$z = 1 \quad b = 0.8284y$$

$$z = 1.5 \quad b = 1.6y$$

El flujo crítico: Desde el punto de vista hidráulico el flujo es crítico cuando el número de Froude es igual a 1

$$F = \frac{V}{\sqrt{gD}} = 1 \quad V = \sqrt{gD} \quad (3)$$

Donde:

F = número de Froude, adimensional
 V = velocidad media del flujo
 g = aceleración de la gravedad = 9.81 m/s²
 D = una dimensión representativa del flujo

(ejemplo el tirante)

En una sección de un canal la energía con respecto a un plano de referencia se expresa así:

$$H = V_1^2/2g + y + h$$

cuando el plano de referencia pasa por el fondo del canal

$$h = 0 \quad \text{luego}$$

$$E = V^2/2g + y$$

Donde:

E = energía específica (kg-m)/kg

V = velocidad media del flujo

y = tirante del flujo en la sección dada

Para un valor dado de Q se tiene:

$$E = \frac{Q^2}{2A^2g} + Y = \frac{Q^2}{2g} A^{-2} + y \quad (\alpha)$$

si:

$$A = F(y)$$

$$E = F(y)$$

En la expresión [α]; cuando y crece, A crece y el término

$$\frac{Q^2}{2A^2g} \quad \text{decrece}$$

Luego, para un valor de E hay dos posibilidades:

$$a - y \text{ grande; } \frac{Q^2}{2A^2g} \text{ pequeño (flujo subcrítico)}$$

$$b - y \text{ pequeño; } \frac{Q^2}{2 A^2 g} \text{ grande (flujo supercrítico)}$$

Cuando E es mínimo; hay un sólo valor de y que satisface la ecuación de energía, a ese valor se le denomina tirante crítico. Cuando el flujo es crítico se establece una relación unívoca entre el caudal y el tirante y todos los elementos serán críticos; lo que se representa así:

Q_c = caudal crítico
 A_c = área crítica
 P_c = perímetro mojado crítico
 R_{hc} = radio hidráulico crítico
 Y_c = tirante crítico
 I_c = pendiente crítica
 V_c = velocidad crítica

Por oposición los elementos del flujo normal se representan en la siguiente forma:

Q_n = caudal normal
 A_n = área mojada normal
 P_n = perímetro mojado normal
 R_{hn} = radio hidráulico normal
 Y_n = tirante normal
 I_n = pendiente normal

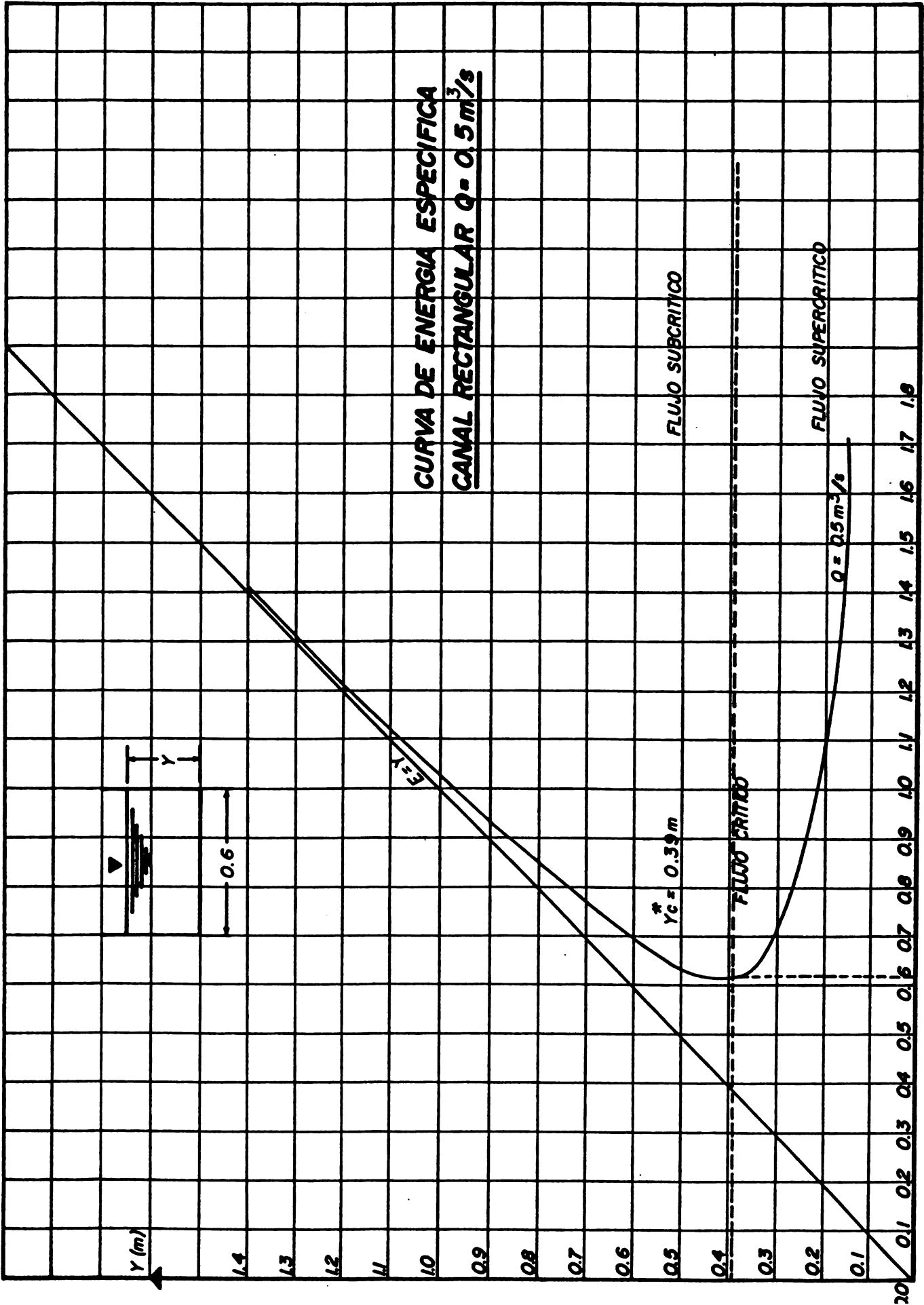
Curva de energía específica: Modificando la pendiente de la línea de energía, si el caudal permanece constante, cuando la velocidad aumenta, el tirante disminuye.

Ejemplo: Calcular y graficar la curva de energía específica para un canal rectangular de 0.60 m de base que conduce 0.5 m³/s.

$$E = \frac{[0.5]^2}{[19.62][0.6y]^2} + y = \frac{0.25}{[19.62][0.36]y^2} + y = \frac{0.035}{y^2} + y$$

Y	1.4	1.35	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7
E	1.42	1.37	1.32	1.22	1.13	1.035	0.94	0.85	0.77

Y	0.6	0.5	0.4	0.38	0.37	0.35	0.3	0.2	0.15
E	0.70	0.64	0.62	0.62	0.63	0.64	0.73	1.08	1.71



$E = (Kg \cdot m) / Kg$

Desarrollo de la expresión del flujo crítico.

$$E = \frac{Q^2}{2g} A^{-2} + y$$

Para hallar un mínimo $\delta E / \delta y = 0$

$$\frac{\delta E}{\delta y} = \frac{Q^2}{2g} [-2 A^{-3} \frac{\delta A}{\delta y}] + 1 = 0$$

$$\frac{Q^2}{gA^3} \frac{\delta A}{\delta y} = 1 \quad (\beta)$$

Aplicación de la expresión (β) a un canal rectangular

$$A = by \quad \delta A / \delta y = b$$

$$\frac{Q^2 b}{g[b^3 y^3]} = 1 \quad \frac{Q^2}{gb^2} = y^3$$

$\frac{Q}{b} = q =$ descarga específica por unidad de ancho del canal

$$q^2 / g = y^3$$

siendo y crítico se escribe

$$q^2 = g y_c^3 \quad ; \quad q = \sqrt{g y_c^3}$$

Luego en un canal rectangular conociendo el tirante crítico puede obtenerse el valor de q y luego hallar $Q = qb$.

Esta ventaja que ofrece el flujo crítico se emplea para el establecimiento de secciones de medición de caudales y para el diseño de instrumentos de medición tales como el aforador Parshall, el aforador sin cuello y el WSC.

Caso del canal triangular

$$A = zy^2$$

$\delta A / \delta y = 2zy = b$; ancho de la superficie del agua en el canal

$$\frac{Q^2 2zy}{2gz^3 y^6} = 1$$

$$\frac{Q^2}{gz^2} = yc^5$$

Conociendo el talud o el ángulo en el centro del canal de sección triangular puede calcularse el caudal.

Ejemplo: Si $z=1$; ángulo en el centro = 90°

$$Q = g^{1/2} yc^{5/2}$$

si $z = 0.577$, ángulo en el centro = 60°

$$Q = 1.8 g^{1/2} yc^{5/2}$$

Los canales de sección triangular son el origen del empleo de los vertedores triangulares.

Medición de caudales:

Los caudales pueden medirse

- a- For medios directos
 - a.1 volumétricos
 - a.2 gravimétricos
 - a.3 velocidad-área
 - a.3.1 molinete o correntómetro
 - a.3.2 flotador
 - a.4 instrumentos de medición basados en flujo crítico
 - a.4.1 aforador sin cuello
 - a.4.2 aforador Parshall

b- Medios indirectos

- b.1 químico

a.1 Medición del caudal por medios volumétricos

Se emplea un recipiente de volumen conocido (Vol), se mide el tiempo T que tarda en llenarse el recipiente, el caudal se determina por la relación

$$Q = \frac{Vol}{T}$$

a.2 Gravimétricos

Se halla el peso P_0 del recipiente vacío, se recibe el volumen de agua durante el tiempo (T) que luego se pesa hallándose el peso P_1 , basado en la hipótesis que 1 litro de agua pesa 1 kg se determina el caudal, luego:

$$\frac{[P_1 - P_0]}{T} \text{ / (kg/litro)} = \frac{\text{litros}}{T} = \text{caudal}$$

a.3.1 Uso del molinete o correntómetro para la medición del caudal.

Para medir la velocidad de la corriente líquida se emplea la relación empírica:

$$V = an + b$$

donde:

- V = velocidad de la corriente
- n = número de revoluciones por segundo del molinete
- a, b = son dos constantes de relación. Se obtienen a partir de las observaciones.

Procedimiento:

- a- Determinar la longitud de la superficie libre del agua
- b- dividir la sección en 10 tramos de igual longitud
- c- medir las profundidades del agua en cada extremidad de los tramos de la sección
- d- seleccionar los puntos de medición de la velocidad según la velocidad del agua.
Si $y < 0.60$ m se supone que la velocidad media, en esa vertical, se encuentra a 0.60 del tirante, medida a partir del fondo del canal.
Si $y \geq 0.60$ se supone que la velocidad media, en esa vertical, es equivalente a la media aritmética de las velocidades medias a 0.80 y a 0.20 de la altura de agua de la vertical.
- e- para cada sección se determina la velocidad media la que multiplicada por el área nos da el caudal parcial.

$$q_i = a_i V_i$$

donde:

- q_i = caudal parcial en la sección i
- a_i = área de la sección i
- V_i = velocidad media, en la sección i

La velocidad media en la vertical será:

$$V_{mj} = V \cdot 0.60$$

$$V_{mj} = \frac{V \cdot 0.2 + V \cdot 0.8}{2}$$

donde:

V_{mj} = velocidad media en la vertical j

la velocidad media en la sección i será:

$$V_i = \frac{V_{mj} + V_{mj+1}}{2}$$

El caudal total que pasa por la sección del canal será:

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i = \sum_{i=1}^n a_i V_i$$

a.3.2 Uso del flotador

Todo cuerpo de masa despreciable puede utilizarse para medir la velocidad de una corriente líquida.

Procedimiento:

Se selecciona un tramo de longitud l del canal

Se mide el tiempo (T_i) que un móvil (flotador) tarda en recorrer el espacio (l).

La velocidad puntual superficial será:

$$V_{si} = \frac{l}{T_i}$$

donde:

V_{si} = velocidad superficial en el punto i
 T_i = tiempo que tarda el flotador para recorrer la longitud l .

Si la superficie libre del agua es bastante ancha se pueden escoger tres puntos para hallar V_{si} y T_i .

En tal situación:

$$V_s = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 V_{si} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{l}{T_i}$$

La velocidad media del flujo en el canal es menor que la velocidad media de la superficie y su relación se expresa por:

$$V_m = k V_s$$

donde:

k = depende de la forma y la rugosidad del canal
 k varía entre 0.7 a 0.9

a.4 Aforadores basados en la producción del flujo crítico

Las ventajas del flujo crítico de ser independiente de la rugosidad del canal y de presentar una relación unívoca entre el tirante y el caudal, especialmente la sección rectangular, se han utilizado para diseñar medidores de caudal. Para el flujo en canales pequeños y para la medición del agua de riego se emplean los aforadores:

Parshall
 Sin cuello
 WSC (Washington State College)

Para obtener resultados dignos de confianza con el empleo de estos aparatos es necesario calibrarlos; es decir encontrar los valores de los parámetros de ajuste de la relación entre el caudal real y el tirante.

El procedimiento consiste en medir con precisión los caudales y los tirantes (un mínimo de cuatro pares de valores con los cuales se determina la mejor relación entre las variables. La experiencia ha mostrado que para este tipo de medidores, la relación se expresa por:

$$Q = A l^x h^y \quad (\sigma)$$

donde:

Q = caudal

l = longitud de la base del canal donde se produce el flujo crítico.

h = tirante crítico

A, x e y = son parámetros de relación, los cuales se determinan al introducir en la relación (σ) los valores de Q, L y h. La calibración es un trabajo experimental. Los valores de los parámetros varían según las condiciones de funcionamiento de los aparatos por lo que la operación se repetirá cada cierto tiempo.

El aforador Parshall:

Es el más antiguo de este tipo de aparatos. Para producir el flujo crítico se emplean dos modificaciones.

- 1- la disminución del ancho de la sección del canal y
- 2- un cambio de la pendiente del fondo del canal.

Se dispone dos piezómetros para medir los tirantes uno aguas arriba del cambio de pendiente y el otro aguas abajo en la garganta. El primero se calcula a 2/3 de la longitud de la convergencia a partir del cambio de pendiente y el segundo en el extremo de la garganta. Las alturas de agua se denominan h_a y h_b , respectivamente, si $h_a > h_b$ el flujo se denomina libre y si $h_a < h_b$ el flujo se denomina sumergido. Las fórmulas desarrolladas se aplican al flujo libre.

El piso de la sección convergente es horizontal, la garganta tiene una pendiente directa, es decir que el nivel del fondo disminuye. La sección divergente tiene una pendiente adversa o sea que el nivel del piso aumenta. Estas variaciones permiten la producción del flujo crítico. Los piezómetros para la medición de los tirantes de agua h_a y h_b deben instalarse de modo que el cero de la escala corresponda con el nivel de la cresta del medidor.

Cuando el flujo es libre ($h_a > h_b$) la experiencia indica que el caudal es función del valor de h_a y del ancho de la cresta, como se ha indicado anteriormente.

$$Q = A h_a^x L^y \quad (\delta)$$

Para calibrar un aforador Parshall es necesario medir simultáneamente Q , h_a , L en varias situaciones (mínimo 3), con los cuales se determinan los valores de A , x e y .

La expresión (σ), puede linealizarse utilizando la transformación logarítmica.

$$\text{Log } Q = \text{Log } A + x\text{Log } h_a + y\text{Log } L \quad (\mu)$$

Conociendo los valores de los parámetros A , x , Y , para un aforador Parshall de ancho de garganta conocido se establece una relación unívoca entre h y Q . Cabe señalar que la relación es el resultado de observaciones por lo que debe admitirse una cierta tolerancia y también una actualización frecuente de los valores de los parámetros.

Instalación de un aforador Parshall

Para utilizar un aforador Parshall en flujo libre para la medición del caudal es conveniente colocar la elevación de la cresta con respecto al fondo del lecho del canal. Si la pendiente es fuerte y la caída es grande no hay dificultad de instalación, pero hay limitaciones cuando la pendiente es suave. Lo que hay que buscar es que el grado de sumergencia no impida que el flujo sea libre.

Para que el aforador Parshall no perturbe el flujo normal (uniforme y permanente), debe instalarse en un tramo recto.

Los datos básicos para la instalación de un aforador Parshall son:

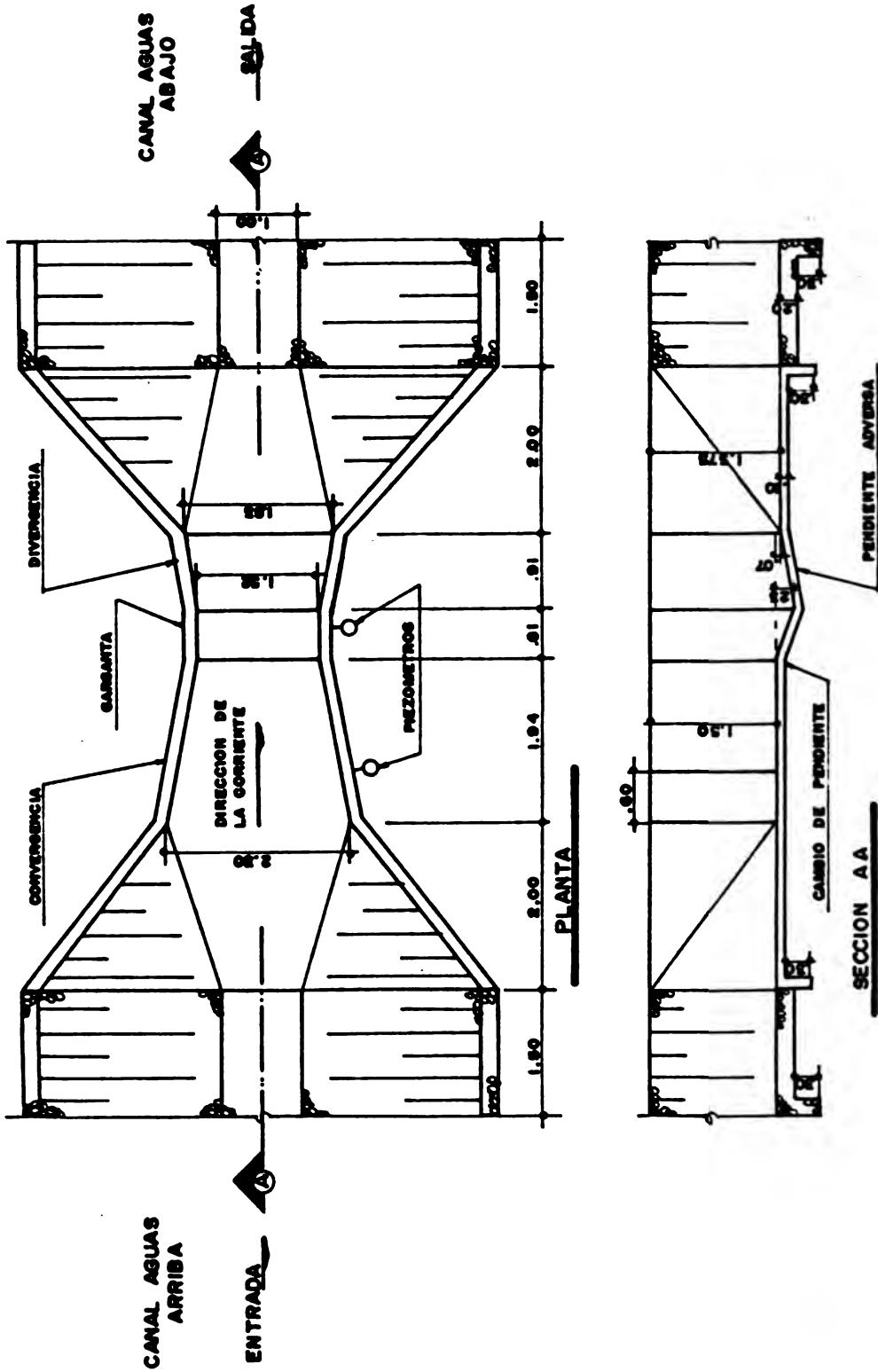
- La descarga máxima a medir (Q)
- Las características geométricas y el flujo normal del canal (b , I_n , n , z)
- El tirante normal (y_n)
- El grado de sumergencia (s) de acuerdo con el ancho de la garganta para tener el flujo libre.

Ancho de la garganta (m)	S
0.025 - 0.075	0.5
0.150 - 0.225	0.6
0.300 - 2.400	0.7
3.00 - 15.000	0.8

Determinar las condiciones de diseño para instalar un aforador Parshall.

El caudal máximo es de $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$. El canal es de sección rectangular de $b = 2 \text{ m}$, tiene una pendiente de 0.0005 y el coeficiente de rugosidad se estima en $n = 0.025$





ESQUEMA DEL
AFORADOR PARSHAL
CONSTRUIDO EN EL CANAL BAGATZI

Caudales, en flujo libre para el aforador Parshall,
según la carga y el ancho de la garganta

Carga H. (pies)	Descarga, Q, para anchuras de garganta, W, de-											
	5 pulg.	6 pulg.	9 pulg.	1 pie	1 1/2 pies	2 pies	3 pies	4 pies	5 pies	6 pies	7 pies	8 pies
	seg.-pie	seg.-pie	seg.-pie	seg.-pie	seg.-pie	seg.-pie	seg.-pie	seg.-pie	seg.-pie	seg.-pie	seg.-pie	seg.-pie
0.10	0.026	0.06	0.09	0.11	0.15	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
0.11	0.031	0.07	0.10	0.13	0.18	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
0.12	0.037	0.08	0.12	0.15	0.21	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
0.13	0.043	0.09	0.14	0.18	0.24	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
0.14	0.047	0.09	0.15	0.19	0.27	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
0.15	0.053	0.10	0.17	0.20	0.30	0.42	0.61	.....	.....	.....	.....	.....
0.16	0.058	0.11	0.19	0.23	0.34	0.47	0.68	.....	.....	.....	.....	.....
0.17	0.064	0.12	0.20	0.25	0.38	0.51	0.75	.....	.....	.....	.....	.....
0.18	0.070	0.14	0.22	0.28	0.42	0.56	0.82	.....	.....	.....	.....	.....
0.19	0.076	0.15	0.24	0.30	0.46	0.61	0.90	.....	.....	.....	.....	.....
0.20	0.082	0.16	0.26	0.32	0.51	0.66	0.97	1.38	1.55	.....	.....	.....
0.21	0.088	0.18	0.28	0.37	0.55	0.71	1.04	1.38	1.68	.....	.....	.....
0.22	0.094	0.19	0.30	0.40	0.59	0.77	1.13	1.47	1.81	.....	.....	.....
0.23	0.100	0.20	0.32	0.43	0.63	0.82	1.20	1.58	1.94	.....	.....	.....
0.24	0.106	0.22	0.35	0.46	0.67	0.86	1.28	1.69	2.08	.....	.....	.....
0.25	0.117	0.23	0.37	0.49	0.71	0.93	1.37	1.80	2.22	2.63	2.82	2.46
0.26	0.124	0.25	0.39	0.51	0.76	0.99	1.46	1.91	2.36	2.88	3.25	2.98
0.27	0.131	0.26	0.41	0.54	0.80	1.06	1.55	2.03	2.50	2.97	3.44	3.00
0.28	0.138	0.28	0.44	0.58	0.85	1.11	1.64	2.15	2.65	3.15	3.65	4.13
0.29	0.146	0.29	0.46	0.61	0.90	1.18	1.73	2.27	2.80	3.25	3.85	4.37
0.30	0.154	0.31	0.49	0.64	0.94	1.24	1.82	2.39	2.94	3.35	4.05	4.63
0.31	0.162	0.32	0.51	0.68	0.99	1.30	1.92	2.52	3.12	3.71	4.25	4.88
0.32	0.170	0.34	0.54	0.71	1.04	1.37	2.02	2.65	3.28	3.89	4.45	5.13
0.33	0.178	0.35	0.55	0.74	1.09	1.44	2.12	2.78	3.44	4.29	4.75	5.38
0.34	0.187	0.36	0.58	0.77	1.14	1.50	2.22	2.92	3.61	4.58	4.96	5.63
0.35	0.195	0.38	0.62	0.80	1.19	1.57	2.32	3.05	3.78	4.88	5.22	5.88
0.36	0.203	0.41	0.64	0.84	1.25	1.64	2.42	3.20	3.95	4.71	5.46	6.13
0.37	0.212	0.43	0.67	0.88	1.30	1.72	2.53	3.34	4.13	4.95	5.70	6.48
0.38	0.222	0.45	0.70	0.92	1.36	1.79	2.64	3.48	4.31	5.15	5.95	6.79
0.39	0.231	0.47	0.73	0.96	1.41	1.86	2.75	3.62	4.49	5.35	6.20	7.08
0.40	0.241	0.48	0.76	0.99	1.47	1.93	2.86	3.77	4.68	5.57	6.46	7.34
0.41	0.250	0.50	0.78	1.03	1.53	2.01	2.97	3.92	4.86	5.80	6.72	7.64
0.42	0.258	0.52	0.81	1.07	1.58	2.09	3.08	4.07	5.05	6.02	6.98	7.94
0.43	0.268	0.54	0.84	1.11	1.64	2.16	3.20	4.22	5.24	6.25	7.25	8.24
0.44	0.278	0.55	0.87	1.15	1.70	2.24	3.32	4.38	5.43	6.48	7.52	8.55
0.45	0.288	0.56	0.90	1.19	1.76	2.32	3.44	4.54	5.63	6.72	7.80	8.87
0.46	0.299	0.61	0.94	1.23	1.83	2.40	3.56	4.70	5.83	6.95	8.08	9.19
0.47	0.309	0.63	0.97	1.27	1.88	2.48	3.68	4.88	6.02	7.20	8.38	9.51
0.48	0.319	0.65	1.00	1.31	1.94	2.57	3.80	5.05	6.24	7.44	8.65	9.84
0.49	0.329	0.67	1.03	1.35	2.00	2.65	3.92	5.23	6.45	7.69	8.94	10.2
0.50	0.339	0.69	1.06	1.39	2.06	2.73	4.06	5.38	6.66	7.94	9.25	10.6
0.51	0.350	0.71	1.10	1.44	2.13	2.82	4.18	5.53	6.87	8.20	9.55	10.9
0.52	0.361	0.73	1.13	1.48	2.19	2.90	4.31	5.70	7.09	8.46	9.85	11.2
0.53	0.371	0.75	1.16	1.53	2.25	2.99	4.44	5.88	7.30	8.72	10.1	11.5
0.54	0.382	0.78	1.20	1.57	2.32	3.08	4.57	6.06	7.52	8.98	10.3	11.9
0.55	0.393	0.80	1.23	1.62	2.39	3.17	4.70	6.25	7.74	9.25	10.6	12.2
0.56	0.404	0.82	1.26	1.66	2.45	3.26	4.84	6.41	7.97	9.52	11.1	12.6
0.57	0.415	0.85	1.30	1.70	2.52	3.35	4.98	6.59	8.20	9.79	11.4	12.9
0.58	0.427	0.87	1.33	1.75	2.59	3.44	5.11	6.77	8.43	10.1	11.7	13.2
0.59	0.438	0.90	1.37	1.79	2.66	3.53	5.25	6.96	8.66	10.4	12.0	13.7
0.60	0.450	0.92	1.40	1.84	2.73	3.62	5.39	7.15	8.89	10.6	12.4	14.1
0.61	0.462	0.94	1.44	1.88	2.80	3.72	5.53	7.34	9.13	10.9	12.7	14.5
0.62	0.474	0.97	1.48	1.93	2.87	3.81	5.68	7.52	9.37	11.2	13.0	14.8
0.63	0.486	1.00	1.51	1.98	2.95	3.91	5.82	7.72	9.61	11.5	13.4	15.2
0.64	0.497	1.02	1.55	2.02	3.02	4.01	5.97	7.91	9.85	11.8	13.7	15.6
0.65	0.509	1.04	1.59	2.08	3.09	4.11	6.13	8.11	10.1	12.1	14.1	16.0
0.66	0.522	1.07	1.63	2.13	3.17	4.20	6.28	8.31	10.3	12.4	14.4	16.4
0.67	0.534	1.10	1.68	2.18	3.24	4.30	6.41	8.51	10.6	12.7	14.8	16.8
0.68	0.546	1.13	1.70	2.23	3.31	4.40	6.56	8.71	10.8	13.0	15.1	17.2
0.69	0.558	1.15	1.74	2.28	3.39	4.50	6.71	8.91	11.1	13.3	15.5	17.6
0.70	0.571	1.17	1.78	2.33	3.46	4.60	6.86	9.11	11.4	13.6	15.8	18.0
0.71	0.584	1.20	1.82	2.38	3.54	4.70	7.02	9.32	11.6	13.9	16.2	18.5
0.72	0.597	1.23	1.86	2.43	3.62	4.81	7.17	9.53	11.9	14.2	16.6	18.9
0.73	0.610	1.26	1.90	2.48	3.69	4.91	7.32	9.74	12.1	14.5	16.9	19.3
0.74	0.623	1.28	1.94	2.53	3.77	5.02	7.49	9.96	12.4	14.9	17.3	19.7
0.75	0.636	1.31	1.98	2.58	3.86	5.12	7.66	10.2	12.7	15.2	17.7	20.1
0.76	0.649	1.34	2.02	2.63	3.93	5.23	7.81	10.4	12.9	15.5	18.0	20.6
0.77	0.662	1.36	2.06	2.68	4.01	5.34	7.97	10.6	13.2	15.8	18.4	21.0
0.78	0.675	1.39	2.10	2.74	4.09	5.44	8.13	10.8	13.5	16.2	18.8	21.5
0.79	0.688	1.42	2.14	2.80	4.17	5.55	8.30	11.0	13.8	16.5	19.2	21.9

Caudales, en flujo libre para el aforador Parshall,
según la carga y el ancho de la garganta

Carga H. (pies)	Descarga, Q, para anchuras de garganta, W, de-											
	3 pulg.	6 pulg.	9 pulg.	1 pie	1.5 pies	2 pies	3 pies	4 pies	5 pies	6 pies	7 pies	8 pies
	seg.-pie	seg.-pie	seg.-pie	seg.-pie	seg.-pie	seg.-pie	seg.-pie	seg.-pie	seg.-pie	seg.-pie	seg.-pie	seg.-pie
.80	.702	1.48	2.18	2.88	4.36	6.08	8.46	11.2	14.0	18.8	19.6	22.4
.81	.710	1.48	2.22	2.90	4.34	6.77	8.63	11.5	14.3	17.3	20.0	22.8
.82	.720	1.49	2.27	2.98	4.42	6.86	8.79	11.7	14.6	17.5	20.4	23.2
.83	.744	1.53	2.31	3.07	4.36	6.80	8.96	11.9	14.9	17.8	20.8	22.7
.84	.757	1.56	2.36	3.12	4.30	6.71	9.13	12.2	15.2	18.0	21.2	24.2
.85	.771	1.59	2.38	3.13	4.67	6.23	9.80	12.4	15.3	18.5	21.6	24.6
.86	.788	1.62	2.44	3.18	4.76	6.23	9.48	12.6	15.6	18.6	22.0	25.1
.87	.800	1.65	2.48	3.24	4.34	6.44	9.63	12.8	15.8	18.9	22.4	25.6
.88	.814	1.68	2.52	3.29	4.83	6.56	9.23	13.1	16.3	19.4	22.8	26.1
.89	.828	1.71	2.57	3.36	4.91	6.68	9.68	13.3	16.6	19.9	23.2	26.5
.90	.843	1.74	2.61	3.41	4.19	6.80	10.2	13.6	16.9	20.2	23.7	27.0
.91	.856	1.77	2.66	3.46	4.19	6.92	10.4	13.8	17.2	20.7	24.1	27.5
.92	.872	1.81	2.70	3.52	4.28	7.03	10.5	14.0	17.5	21.0	24.5	28.0
.93	.887	1.84	2.75	3.58	4.37	7.15	10.7	14.2	17.8	21.4	24.9	28.5
.94	.902	1.87	2.79	3.64	4.46	7.27	10.9	14.5	18.1	21.8	25.4	29.0
.95	.916	1.90	2.84	3.70	4.55	7.39	11.1	14.8	18.4	22.1	25.8	29.5
.96	.931	1.93	2.88	3.76	4.64	7.51	11.3	15.0	18.8	22.5	26.3	30.0
.97	.946	1.97	2.93	3.82	4.73	7.63	11.4	15.3	19.1	22.9	26.7	30.5
.98	.961	2.00	2.98	3.88	4.82	7.75	11.6	15.5	19.4	23.2	27.1	31.0
.99	.977	2.03	3.03	3.94	4.91	7.88	11.8	15.8	19.7	23.6	27.6	31.5
1.00	.992	2.06	3.07	4.00	4.99	8.00	12.0	16.0	20.0	24.0	28.0	32.0
1.01	1.01	2.09	3.12	4.08	5.09	8.12	12.2	16.3	20.3	24.4	28.5	32.5
1.02	1.02	2.12	3.17	4.17	5.19	8.25	12.4	16.5	20.6	24.8	29.0	33.0
1.03	1.04	2.16	3.21	4.18	5.28	8.39	12.6	16.8	21.0	25.3	29.5	33.5
1.04	1.06	2.19	3.26	4.26	5.37	8.50	12.8	17.0	21.3	25.6	29.8	34.1
1.06	1.07	2.22	3.31	4.31	5.47	8.63	13.0	17.3	21.6	26.0	30.3	34.6
1.08	1.09	2.25	3.36	4.37	5.56	8.76	13.2	17.5	21.9	26.3	30.7	35.1
1.07	1.10	2.28	3.40	4.43	5.66	8.88	13.3	17.8	22.3	26.7	31.2	35.7
1.08	1.12	2.32	3.45	4.50	5.75	9.01	13.5	18.1	22.6	27.1	31.7	36.2
1.09	1.13	2.36	3.50	4.56	5.85	9.14	13.7	18.3	22.9	27.5	32.1	36.8
1.10	1.15	2.40	3.55	4.63	5.95	9.27	13.9	18.6	23.3	27.9	32.6	37.3
1.11	1.16	2.43	3.60	4.68	6.04	9.40	14.1	18.9	23.6	28.4	33.1	37.8
1.12	1.18	2.46	3.65	4.75	7.14	9.54	14.3	19.1	23.9	28.8	33.6	38.4
1.13	1.20	2.50	3.70	4.82	7.24	9.67	14.5	19.4	24.3	29.3	34.1	38.9
1.14	1.21	2.53	3.75	4.88	7.34	9.80	14.7	19.7	24.6	29.6	34.5	39.5
1.15	1.22	2.57	3.80	4.94	7.44	9.94	14.9	19.9	25.0	30.0	35.0	40.1
1.16	1.25	2.60	3.85	5.01	7.54	10.1	15.1	20.3	25.3	30.4	35.5	40.6
1.17	1.26	2.64	3.90	5.07	7.64	10.2	15.3	20.5	25.7	30.8	36.0	41.2
1.18	1.28	2.68	3.95	5.15	7.74	10.3	15.6	20.8	26.0	31.2	36.5	41.8
1.19	1.30	2.71	4.01	5.21	7.84	10.5	15.8	21.1	26.4	31.7	37.0	42.3
1.20	1.32	2.75	4.06	5.28	7.94	10.6	16.0	21.3	26.7	32.1	37.5	42.9
1.21	1.33	2.78	4.11	5.34	8.05	10.8	16.3	21.6	27.1	32.5	38.0	43.5
1.22	1.35	2.82	4.16	5.41	8.15	10.9	16.4	21.9	27.4	32.9	38.5	44.1
1.23	1.37	2.86	4.22	5.48	8.25	11.0	16.6	22.2	27.8	33.4	39.0	44.6
1.24	1.38	2.90	4.27	5.55	8.36	11.2	16.8	22.5	28.1	33.8	39.5	45.2
1.25	1.40	2.93	4.33	5.62	8.46	11.3	17.0	22.8	28.5	34.3	40.0	45.8
1.26	1.42	2.97	4.37	5.69	8.56	11.5	17.2	23.0	28.9	34.7	40.5	46.4
1.27	1.44	3.01	4.43	5.76	8.67	11.6	17.4	23.3	29.3	35.1	41.1	47.0
1.28	1.45	3.04	4.48	5.83	8.77	11.7	17.7	23.6	29.6	35.6	41.6	47.6
1.29	1.47	3.08	4.53	5.90	8.88	11.9	17.9	23.9	30.0	36.0	42.1	48.2
1.30	1.49	3.12	4.59	5.98	8.99	12.0	18.1	24.2	30.3	36.5	42.6	48.8
1.31	1.50	3.16	4.64	6.05	9.09	12.2	18.3	24.5	30.7	36.9	43.1	49.4
1.32	1.52	3.19	4.69	6.13	9.20	12.3	18.5	24.8	31.1	37.4	43.7	50.0
1.33	1.54	3.22	4.75	6.18	9.30	12.4	18.8	25.1	31.4	37.8	44.2	50.6
1.34	1.56	3.27	4.80	6.25	9.41	12.6	19.0	25.4	31.8	38.3	44.7	51.2
1.35	1.58	3.31	4.86	6.32	9.52	12.7	19.2	25.7	32.2	38.7	45.3	51.8
1.36	1.60	3.35	4.92	6.39	9.63	12.9	19.4	26.0	32.6	39.2	45.8	52.3
1.37	1.61	3.39	4.97	6.44	9.74	13.0	19.6	26.3	33.0	39.7	46.4	52.9
1.38	1.63	3.43	5.03	6.52	9.85	13.2	19.9	26.6	33.3	40.1	46.9	53.5
1.39	1.65	3.47	5.08	6.60	9.96	13.3	20.1	26.9	33.7	40.6	47.4	54.1
1.40	1.67	3.51	5.14	6.68	10.1	13.5	20.3	27.2	34.1	41.1	48.0	54.7
1.41	1.69	3.55	5.19	6.75	10.2	13.6	20.6	27.5	34.5	41.6	48.5	55.3
1.42	1.70	3.59	5.25	6.82	10.3	13.8	20.8	27.8	34.9	42.1	49.1	55.9
1.43	1.72	3.63	5.31	6.90	10.4	13.9	21.0	28.1	35.3	42.6	49.6	56.5
1.44	1.74	3.67	5.37	6.97	10.5	14.1	21.2	28.4	35.7	43.1	50.2	57.1
1.45	1.76	3.71	5.43	7.04	10.6	14.2	21.5	28.7	36.1	43.6	50.7	57.7
1.46	1.78	3.75	5.48	7.12	10.7	14.4	21.7	29.0	36.5	44.1	51.3	58.3
1.47	1.80	3.79	5.54	7.19	10.8	14.5	21.9	29.3	36.9	44.6	51.8	58.9
1.48	1.82	3.83	5.60	7.26	11.0	14.7	22.2	29.6	37.3	45.1	52.4	59.5
1.49	1.84	3.87	5.66	7.34	11.1	14.9	22.4	29.9	37.7	45.6	53.0	60.1

Cálculo del tirante normal:

$$Q = \frac{1}{0.025} \frac{(b y_n)^{5/3} (0.0005)^{1/2}}{(b + 2 y_n)^{2/3}}$$

$$0.3 = \frac{0.02236}{0.025} * 2 y_n \frac{(2 y_n)^{0.6667}}{(2 + 2 y_n)}$$

$$0.335 = 2y \left(\frac{2 y_n^{0.6667}}{2 + 2 y_n} \right)$$

$$F(y_n) = 2y_n \left(\frac{2 y_n^{0.6667}}{2 + 2 y_n} \right)$$

$$F(y_n)^* = 0.335$$

$$F(y_n=1) = 2 \left(\frac{1^{0.6667}}{4} \right) = 2 \left(\frac{1}{4} \right) = 0.5 < 0.335$$

$$F(y_n=1) = 1.2599 > F(y_n)^*$$

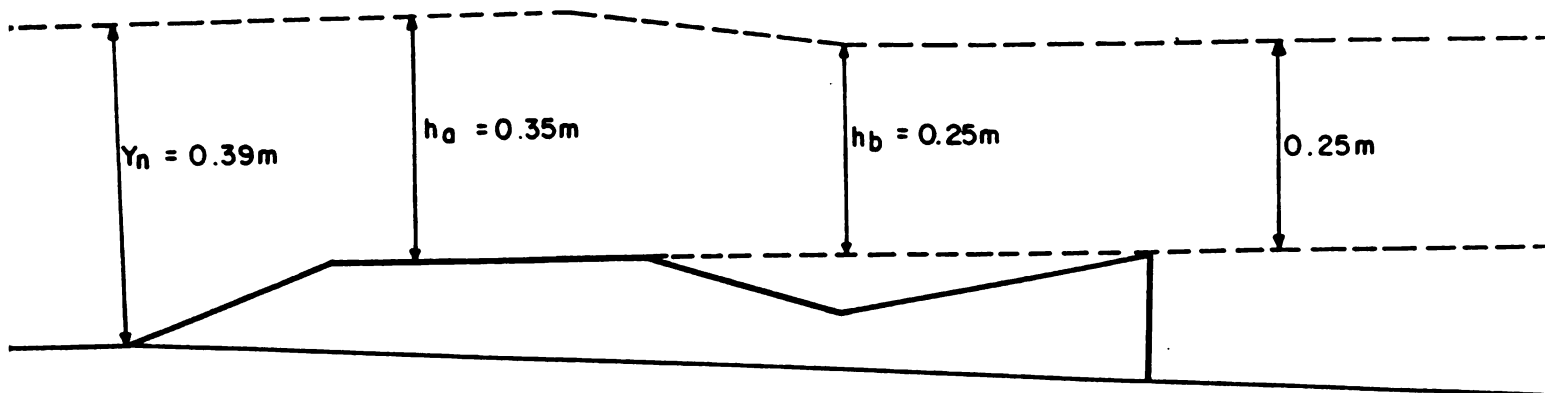
$$F(y=0.5) = 1.0 \left(\frac{1^{0.6667}}{2 + 1} \right) = 0.4807 > f(y_n)^*$$

$$F(y=0.4) = 0.8 \left(\frac{0.8^{0.6667}}{2.8} \right) = 0.3470 > F(y_n)^*$$

$$F(y=0.39) = 0.78 \left(\frac{0.78^{0.6667}}{2.78} \right) = 0.3343$$

Las relaciones de carga aguas arriba, sumergencia y aguas abajo son :

carga aguas arriba	ancho de la garganta	sumergencia	carga aguas arriba
0.27	0.91	0.7	0.19
0.23	1.22	0.7	0.16
0.35	0.61	0.7	0.25
0.56	0.30	0.7	0.39



Si utilizamos un aforador Parshall de 0.61 m , la carga aguas arriba para el caudal de $0.30\text{ m}^3/\text{s}$ es de 0.35 m y la altura aguas abajo para una sumergencia de 0.7 es de 0.25 m . Para acoplarse con el flujo normal se requiere que el lecho aguas arriba se levante 0.04 m y que aguas abajo disminuya 0.14 m . Luego de instalado el aforador Parshall con sus limnómetros debe de verificarse la sumergencia y calibrarse para obtener la relación:

$$Q = F(h_a)$$

El aforador sin cuello

Es un instrumento para medir el caudal basado en la creación del flujo crítico mediante el estrechamiento de la sección transversal. El lecho del aforador es horizontal lo que facilita su instalación. Está conformado por una sección de entrada convergente (3:1) y longitud L_1 de paredes verticales. El cuello, una sección divergente (6:1) de paredes verticales y longitud L_2 . El fondo o plantilla del aforador es horizontal.

El aforador sin cuello se identifica por el ancho del cuello (A) y la longitud del instrumento (l). Así un aforador $20 * 90$ tiene un ancho del cuello de 0.20 m y un largo de 0.90 m . El ancho de la sección de entrada y el de la salida son iguales y se determina por la expresión:

$$B = A + (L/4.5) \text{ o también}$$

$$B = A + 2 L_1/3 = A + L_2/3$$

Para calcular el caudal es necesario medir las alturas del nivel de agua tanto aguas arriba como aguas abajo del cuello y con respecto al fondo del canal para lo cual, se requiere instalar los piezómetros a las longitudes L_a y L_b .

$$L_a = 2L/q \quad L_b = 5L/q$$

En los piezómetros se colocan limnómetros para leer directamente las alturas h_a y h_b .

Principio de la medición del caudal

La medición del caudal se basa en la producción del flujo crítico. Si el grado de sumergencia (h_b/h_a) es mayor que el valor límite para el tipo de aforador, se dice que este trabaja en flujo sumergido, en caso contrario el flujo es libre. Para esta situación el caudal puede estimarse a partir de la lectura de la altura aguas arriba (h_a), mientras que en el primer caso se requiere de las dos lecturas. En el flujo sumergido las condiciones aguas abajo influyen sobre las de aguas arriba y el caudal se ve afectado. Para cada aforador sin cuello existe un valor de sumergencia transitoria (St) a partir de la cual el flujo se considera sumergido:

Valores de St , n , y , k para flujo libre

L(m)	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6
St(%)	60.7	62	63	64.2	65.3	66.4	68.5	70.5	72
n	2.08	1.989	1.932	1.88	1.843	1.81	1.756	1.712	1.675
k	6.15	5.17	4.63	4.18	3.89	3.60	3.22	2.93	2.72

L(m)	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.7
St(%)	73.8	75.5	77.0	78.4	79.5	80.5
n	1.646	1.620	1.60	1.579	1.568	1.562
k	2.53	2.40	2.30	2.22	2.15	2.13

Ecuaciones de diseño del aforador sin cuello

Flujo libre: En este tipo de flujo se admite una relación unívoca entre el caudal y la altura aguas arriba.

$$Q = C (h_a)^n$$

donde:

Q = caudal m³/s

C = coeficiente de flujo libre, depende de la longitud y del ancho del cuello del aforador

h_a = nivel del agua, en el piezómetro aguas arriba (m)

n = exponente del flujo libre, depende de la longitud del aforador

Experimentalmente, se ha determinado una relación entre C y A (ancho del cuello del aforador)

$$C = K A^{1.025}$$

donde:

A = ancho del cuello del aforador

K = coeficiente de la longitud del aforador para flujo libre

Flujo sumergido

En este caso se requiere disponer de dos lecturas piezométricas.

$$Q = C_s (h_a - h_b)^n / (\text{colog } S)^{n_s}$$

donde:

Q = caudal m³/s

h_a = nivel del agua, en el piezómetro aguas arriba (m)

h_b = lectura piezométrica, aguas abajo (m)

n = exponente del flujo libre

n_s = exponente del flujo sumergido, depende de la longitud del aforador

S = sumergencia (h_b/h_a)

C_s = coeficiente del flujo sumergido, depende de la longitud y del ancho del cuello del aforador

$$C_s = K_s A^{1.025}$$

donde:

A = ancho del cuello del aforador

K_s = coeficiente de la longitud del aforador para el flujo sumergido

Valores de K_s y n_s (flujo sumergido)

L(m)	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6
n_s	1.675	1.60	1.55	1.513	1.483	1.456	1.427	1.407	1.393
K_s	3.5	2.9	2.6	2.35	2.15	2.0	1.75	1.56	1.45

L(m)	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.7
n_s	1.386	1.381	1.378	1.381	1.386	1.39
K_s	1.32	1.24	1.18	1.12	1.08	1.06

Ejemplos de uso de las fórmulas:

1- Calcular la descarga de un canal donde se ha instalado un aforador sin cuello de 20 * 180 cm (ancho del cuello 20 cm, largo del aparato 180 cm). En flujo establecido se tiene que $h_a = 0.25$ m y $h_b = 0.10$ m

Solución:

Cálculo de $S = h_a/h_b = 0.1/0.25 = 40\%$

$S_t = 73.8$; $S < S_t$ flujo libre

Cálculo del coeficiente C del flujo libre

$C = 2.53 (0.20)^{1.025} = 0.486$

$Q = 0.486 (0.25)^{1.646} = 0.0496 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q = 50 \text{ l/s}$

2- En un aforador sin cuello de 20 * 90 (A = 20 cm y L = 90 cm) se ha medido $h_a = 0.27$ m y $h_b = 0.22$ m. Estimar el caudal.

Solución

Cálculo de $S = 0.22/0.27 = 0.81$

$S_t = 65.3 < S$; El flujo es sumergido

$$\text{Cálculo de } C_s = 2.15 (0.20)^{1.025} = 0.413$$

$$S = 0.81 ; \log 0.81 = 1.908485 ; \text{colog } 0.81 = 0.09$$

$$Q = 0.413(0.27 - 0.22)1.843 / (0.09)^{1.483} = 0.001653/0.0281$$

$$Q = 0.059 = 59 \text{ l/s}$$

Instalación de un aforador sin cuello

Selección del sitio de instalación.

Es aconsejable que el aforador se instale en un tramo uniforme del canal para que las líneas de corriente ingresen uniformemente a la sección convergente del aforador. Para seleccionar el tipo de aforador es necesario conocer los caudales normales máximos y mínimos que pasarán por el aforador. También los respectivos tirantes así como el ancho, el talud, y el borde libre del canal. Debe destacarse que la introducción del aparato en el canal, perturbará el flujo, especialmente, aguas arriba.

Situación del flujo libre

Por la facilidad en la determinación del caudal se prefiere que el aforador funcione en flujo libre.

Ejemplo de selección de un aforador sin cuello para que funcione en flujo libre. $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ es el máximo caudal que discurre por un canal trapecial ($z=1$; $b=1.25$ y borde libre igual a 0.12 m . Escoger el aforador sin cuello más conveniente para medir los caudales. ($I = 0.0005$ y $n=0.025$)

Solución:

Cálculo del tirante normal.

$$\frac{0.3 * 0.025}{0.0223} = \frac{(1.25y + y^2)^{5/3}}{(1.25 + 2y\sqrt{1 + 1})^{2/3}}$$

$$0.3363 = \frac{1.25y + y^2)^{1.6667}}{(1.25 + 2.8284y)^{2/3}}$$

$$F(y^*) = 0.3363$$

$$y = 1 ; F(1) = 1.5147$$

$$y = 0.5 ; F(0.5) = 0.4165$$

$$y = 0.45 ; F(0.45) = 0.3453$$

$$y = 0.44 ; F(0.44) = 0.3318$$

Admitamos que:

$$\begin{aligned} F(y^*) &= F(0.44) \\ y^* &= 0.44 \text{ m} \\ Y_n &= 0.44 \text{ m} \end{aligned}$$

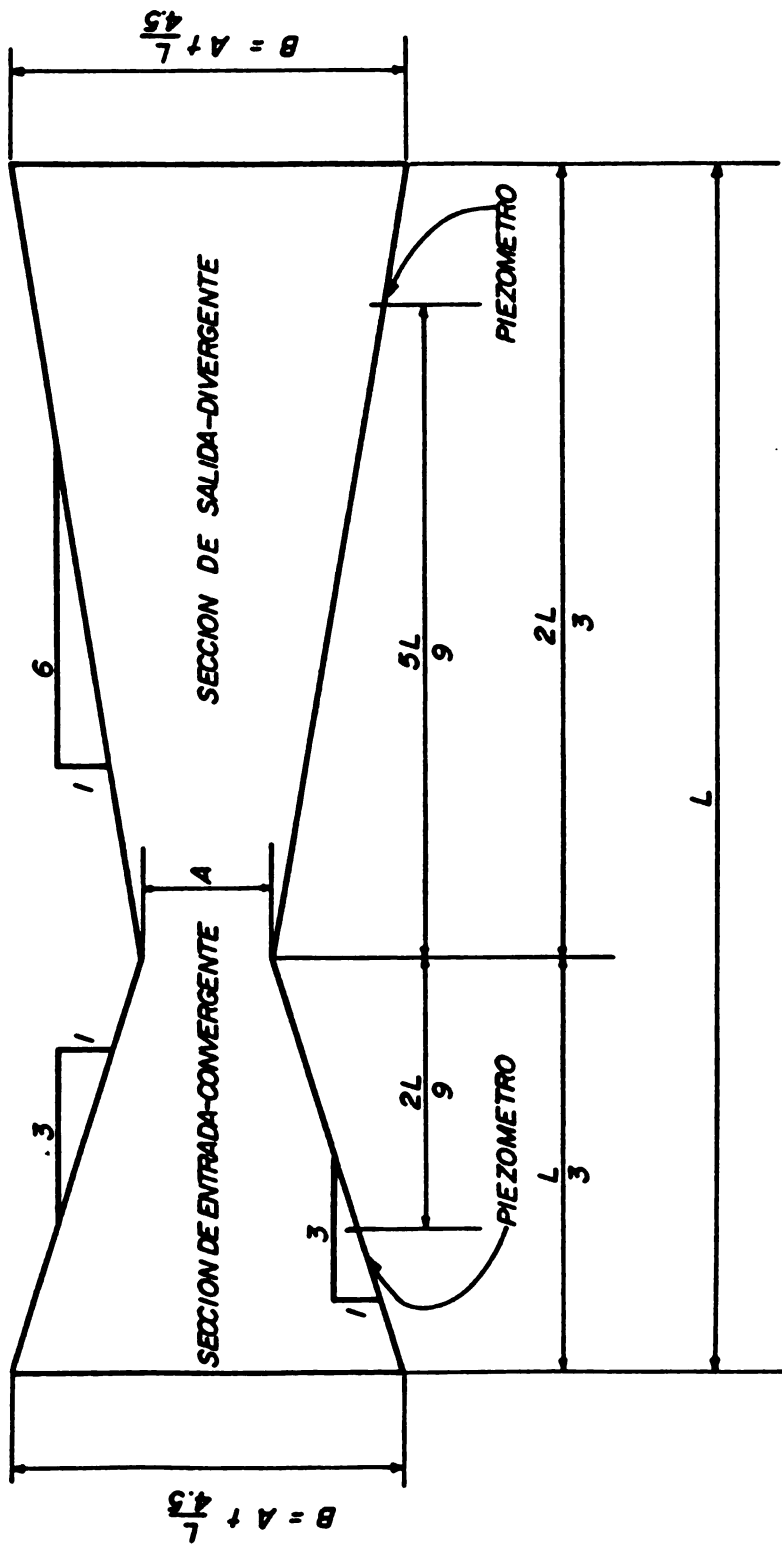
Determinemos el valor de h_a correspondiente al caudal $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$, empleando:

$$Q = C h_a^n$$

Dimensiones aforador	n	k	C	h_a	S_t	h_b
20 * 180	1.648	2.53	0.486	0.746	73.4	54.8
20 * 240	1.579	2.22	0.4265	0.800	78.4	62.7
20 * 270	1.562	2.13	0.4092	0.820	80.5	66.0
40 * 180	1.648	2.53	0.9891	0.4849	73.4	35.0
40 * 240	1.579	2.22	0.8679	0.5103	78.4	40.0
40 * 270	1.562	2.13	0.8327	0.5202	80.5	42.0

Podemos escoger para este caso, el aforador (40 * 180) para medir los 300 lps, $h_a = 0.48 \text{ m}$ y $h_b = 0.35 \text{ m}$. Considerando que el tirante normal es de 0.44 m , el fondo del canal aguas abajo del aforador hará subir el nivel de agua 0.13 m . Equivalente a la pérdida de carga ($h_a - h_b$) $0.48 - 0.35 = 0.13 \text{ m}$; luego la profundidad del canal aguas arriba, para evitar el desbordamiento deberá ser $0.48 + 0.13 = 0.61$, es decir; que es necesario aumentar el nivel del bordo del canal para satisfacer esta condición.

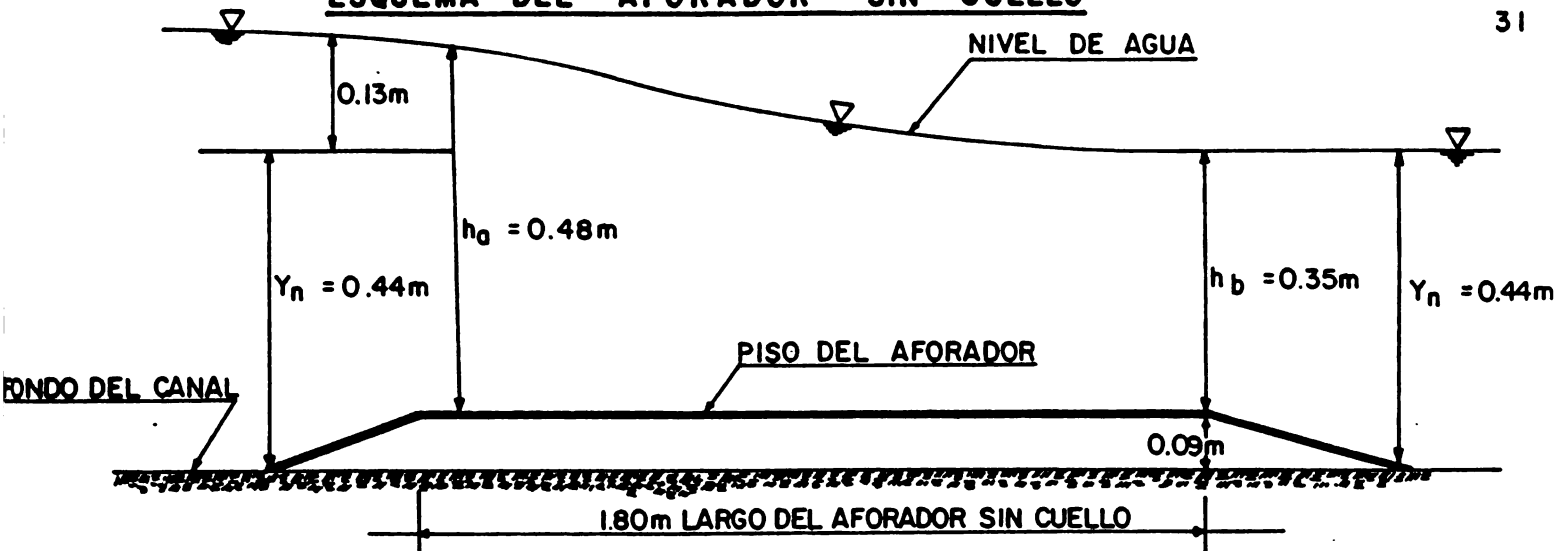
Después de instalado el aparato, debe verificarse su correcto funcionamiento, incluyendo los dos limnómetros en los piezómetros. Es necesario calibrar el aforador para encontrar los valores correspondientes que permitirán determinar el caudal en función de h_a .



ESQUEMA DEL AFORADOR SIN CUELLO-PLANTA

ESQUEMA DEL AFORADOR SIN CUELLO

31



b- Medición del caudal por medios químicos:

Se base en el principio de una solubilidad completa y homogénea de una sal en el agua. De tal manera que el cambio de concentración permita calcular el caudal.

Sea: C_0 la concentración natural de la sal en el curso de agua; objeto de medición.

C_1 la concentración de la sal que se inyectará en el curso de agua; se admite que la calidad de q_0 y q_1 es la misma.

C_2 la concentración de la sal en la muestra extraída del curso de agua, después de haberse disuelto homogéneamente en el curso de agua.

La aplicación del principio de conservación de la masa nos muestra que:

$$C_0Q + C_1q = C_2(Q + q)$$

$$C_0Q + C_1q = C_2Q + C_2q$$

$$(C_2 - C_0)Q = q(C_1 - C_2)$$

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

donde:

Q = caudal que se desea medir

q = caudal que se agrega en el curso y que sirve para inyectar la sal en el agua.

Se admite que: $C_1 \gg C_0$ y $C_1 \gg C_2$

Para facilitar, la medición del caudal es conveniente que

1- Se emplee una sal de bajo costo y que su concentración sea mínima en el caudal objeto de medición.

2- El flujo debe ser turbulento para lograr la disolución completa de la sal aplicada.

3- El tramo entre la inyección de la sal y la toma de la muestra, debe ser suficientemente largo para favorecer la homogenización total de la sal.

El conocimiento del caudal, en un sistema de riego es de gran importancia para planificar su uso en la agricultura de regadío, con el fin de optimizar su empleo en la búsqueda de lograr los mayores beneficios, permanentemente, lo que conlleva la conservación y protección de los recursos para enmarcarla dentro de los criterios de Desarrollo Sostenible.

Bibliografía:

- 1- Ven-te- Chow. 1981. Open Channel Flow (Flujo en canales). Mc Graw-Hill International book Company. México. 680 páginas. (17 impresión)
- 2- Servicio de Conservación de Suelos. U.S.D.A. 1979. Medición del agua de riego. Editorial Diana México. 86 páginas (Colección Ingeniería de Suelos)
- 3- Alfaro José F. 1980. Medición de agua en Canales por medio del aforador sin cuello. Sub-Secretaría de Recursos Naturales. Departamento de Tierras y Aguas. Santo Domingo. República Dominicana. 44 páginas.

