SERIE TECNICA

ESTRUCTURAS PORTÁTILES DE MEDICION DE CAUDAL:

Aforadores de Garganta: RBC - PARSHALL

Daniel Vega Barbato
Oscar Delgadillo Iriarte
Vladimir Cossio Rojas

CENTRO AGUA
UMSS - FCAyP

Centro Andino para la Gestión
y Uso del Agua

SERIE TÉCNICA

ESTRUCTURAS DE MEDICION DE CAUDAL

AFORADORES DE GARGANTA
- RBC y Parshall -

Daniel Vega Barbato
Oscar Delgadillo Iriarte
Vladimir Cossio Rojas

2020

CENTRO AGUA
UMSS - FCAyP

Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua

©Centro AGUA

Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA)
Universidad Mayor de San Simón - Facultad de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y Forestales

Av. Petrolera Km. 5 (Zona Tamborada)
Teléfono: + 591 (4) 4 76 23 82 – Telefax: + 591 (4) 4 76 23 80
www.centro-agua.umss.edu.bo
Cochabamba, Bolivia.

***Edición y Diagramado**:*
Oscar Delgadillo Iriarte
*[**Versión digital**]*

Abril - 2020

Este documento ha sido elaborado como material de enseñanza, principalmente para estudiantes de la carrera de Ingeniería Agrícola, cursos de posgrado ejecutados por el Centro AGUA (diplomado y maestría), así como para profesionales que trabajan en el área de los Recursos Hídricos.

El Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA) es un centro de investigación y enseñanza, perteneciente a la Facultad de Ciencias Agrícolas Pecuarias y Forestales de la Universidad Mayor de San Simón (UMSS, Cochabamba-Bolivia). En base a las experiencias y conocimientos acumulados desde su creación, actualmente trabaja en forma interactiva y multidisciplinaria en la profundización del conocimiento sobre la gestión y los usos del agua.

PRESENTACION

Esta guía, es producto de la sistematización de información existente sobre el tema y la experiencia adquirida a través de la realización de aforos en campo. Constituye un texto de consulta rápida y brinda información esencial para realizar una apropiada medición de caudales, utilizando aforadores RBC y Parshall.

Es parte de la serie: "Métodos y Estructuras de Medición de Caudales", que el Centro AGUA elabora para coadyuvar la enseñanza de pre-grado en la Facultad de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y Forestales "Martín Cárdenas".

Es un texto dirigido a estudiantes de ingeniería agrícola principalmente. Sin embargo, esperamos pueda ser también de utilidad para distintos profesionales que trabajan en el área de recursos hídricos.

Los autores

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 1

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES 1

3. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO 3

4. CONDICIONES PARA SU UTILIZACION 4

4.1. Caudales a ser medidos 4
4.2. características del flujo en el aforador 4
4.3. Características del canal o cauce natural 5
4.4. Elección de sitio de aforo 5

5. AFORADOR PORTATIL RBC 7

5.1. Descripción de la estructura 7
5.2. Condiciones y límites recomendados para su utilización 8
5.3. Pautas para la construcción de aforadores portátiles RBC 10
5.3.1. Recomendaciones para su construcción 12
5.3.2. Tablas de caudales 12
5.4. Requerimiento de personal, materiales y equipos para su uso 15
5.5. Pasos para su utilización 15
5.5.1. Instalación del aforador 15
5.5.2. Toma de datos 17
5.6 Ejemplo de Aplicación 18

6. AFORADOR PARSHALL 22

6.1. Descripción de la estructura 22
6.2. Límites de aplicación 24
6.3. Materiales y equipos 24
6.4. Instalación del aforador 24
6.5. Evaluación de la descarga 25

BIBLIOGRAFÍA 30

ANEXOS 31

1. INTRODUCCIÓN

El RBC y el Parshall, son aforadores de garganta que pueden ser utilizados, como estructuras portátiles o estructuras fijas, para la medición de caudales en canales abiertos. Las condiciones de flujo, necesarias para la medición de caudal, son creadas por estas estructuras introduciendo un estrechamiento en el canal, mediante una cresta y/o el estrechamiento de las paredes del mismo. Ambas estructuras son utilizadas en nuestro medio, aunque la mayor practicidad en el uso y la construcción del RBC, motivó la mayor difusión de este último como estructura fija en canales revestidos, así como estructura portátil en canales de tierra.

Esta guía esta referida especialmente a la utilización y construcción de dos aforadores portátiles: RBC y Parshall, los cuales son muy útiles para la medición de pequeños caudales (hasta 50 l/s) en surcos, canales de tierra y pequeños cursos naturales. No se hace referencia directa a estructuras fijas, aunque los principios de funcionamiento y utilización de éstas son, en la práctica, los mismos.

El documento aborda, primeramente, las características generales y el principio de funcionamiento de estos aforadores. Posteriormente, se exponen en forma detallada las condiciones, las pautas para su construcción, así como los requerimientos para su utilización y construcción. Finalmente, se explican paso a paso, los procedimientos para la toma de datos necesarios y la evaluación de la descarga con ambos aforadores. Para una mejor lectura de la guía se presentan ejemplos de aplicación, incluyendo las planillas de campo que pueden ser utilizadas.

Aparte del manejo de conceptos básicos de hidráulica, la utilización y construcción de estos aforadores portátiles requiere de algunos conocimientos más específicos en esta materia, principalmente en lo referente a los regímenes de flujo en canales abiertos. Una revisión previa de estos conceptos contribuirá en una comprensión más rápida de lo presentado en la guía. Una explicación de estos conceptos fue incluida en el Anexo 1.

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES

Existen numerosas estructuras de medición de caudales (aforadores) que utilizan el estrechamiento de la sección de flujo de un canal (aforadores de garganta[1]), para provocar condiciones de flujo que permitan la medición del caudal[2]. Estas estructuras pueden ser

[1] Más detalles pueden encontrarse en Bos, 1985 y 1989; y Bos&Replogle&Clemmens 1984 y 1986.

[2] Los aforadores de garganta, y otros dispositivos de medición basados en el flujo crítico, crean una transición de flujo subcrítico a flujo supercrítico (Wahl, 2001), de ese modo, el flujo crítico se produce generalmente en la garganta del aforador.

separadas básicamente en tres grupos: (a) Aquellas en las que la sección de control[3] se forma elevando la solera del canal solamente, (b) en las que la sección de control se produce por estrechamiento de las paredes del canal, o (c) en las que la sección de control se forma elevando el fondo y estrechando las paredes al mismo tiempo (Figura 1a). Las formadas por estrechamiento de las paredes del canal (Figura 1b y 1c), presentan menos restricciones para la circulación del flujo de agua, por no requerir necesariamente la elevación de la solera del canal para provocar un flujo crítico (o pudiendo ser ésta no muy pronunciada).

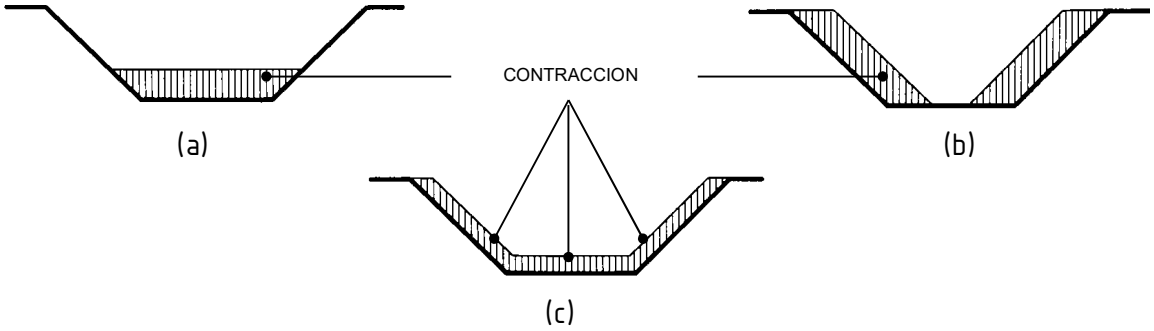


Figura 1. Diferentes tipos de aforadores de garganta (RBC, 1986)

La mayoría de las obras de medición o de regulación de caudales constan de un tramo convergente (Figura 2), en donde el agua, que llega en régimen subcrítico, se acelera y conduce hacia una contracción o garganta, en la que alcanza una velocidad supercrítica, a partir de la cual esta velocidad se va reduciendo gradualmente, hasta llegar, de nuevo, a un régimen subcrítico, en el que se recupera la energía potencial.

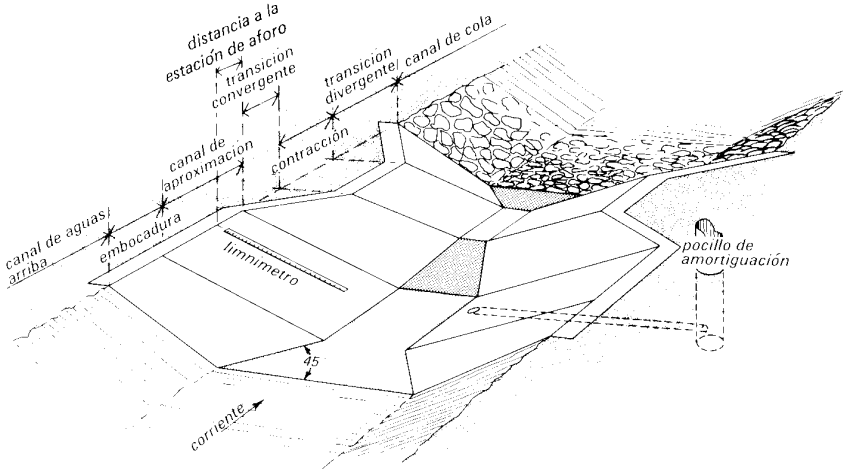


Figura 2. Disposición general de una estructura para medición de caudales (Bos et al, 1986)

[3] Es el lugar en el cual el flujo atraviesa la altura crítica. El término general *sección de control* es comúnmente utilizada, aunque, *cresta*, *umbral*, o *garganta* son también usados algunas veces, dependiendo en algún modo de la situación particular. (Wahl, 2001).

De todos los elementos, el más importante es el estrangulamiento o garganta, de cierta longitud, en donde el caudal entra sin derivación alguna y hace posible aplicar los principios de hidráulica, de manera que sea posible predecir con exactitud el comportamiento hidráulico de las obras con diferentes formas que puedan utilizarse.

3. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Los aforadores de garganta son dispositivos de medición basados en el flujo crítico (ver Anexo 1 para mayores detalles) creando en el canal, una transición de flujo subcrítico a flujo supercrítico. De ese modo, las condiciones de flujo en el canal aguas abajo no pueden afectar las condiciones de flujo en el canal de aproximación porque las ondas de gravedad en el flujo no pueden propagarse aguas arriba a través de la sección crítica. En tanto el flujo critico se mantenga en la garganta del aforador, existirá una relación única entre la carga aguas arriba y la descarga a través de la sección crítica, la misma que no es afectada por las condiciones de flujo en el canal aguas abajo (Wahl, 2001). En consecuencia, se podrá expresar: $Q = f(H_1)$. (ver Figura 3).

Las ecuaciones de Continuidad, de Bernoulli y del Flujo Crítico, permiten establecer la ecuación de la descarga para estas estructuras de medición de caudales. Como no es posible medir directamente la altura correspondiente a la energía específica ($H_1 = h_1 + \frac{v_1^2}{2g}$) con respecto a la cresta del aforador, se mide la altura de carga aguas arriba del aforador (h_1) y se introduce un coeficiente de corrección por la omisión de la altura correspondiente a la altura de velocidad ($\frac{v_1^2}{2g}$); en consecuencia, el caudal puede ser expresado en función de la altura de carga: $Q = f(h_1)$ (Figura 3).

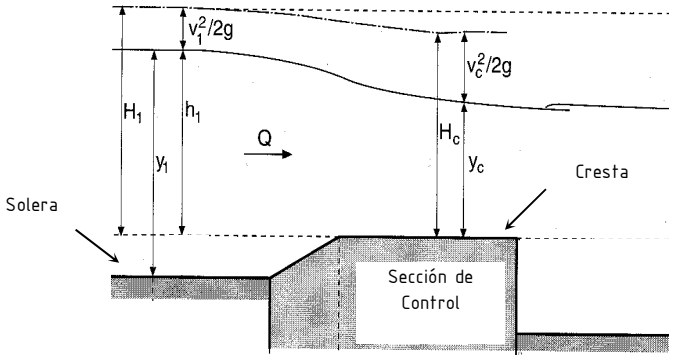


Figura 3. Principio de funcionamiento

Como se aprecia en la figura anterior, la altura de carga (h_1) se refiere a la altura de agua medida desde la cresta de la estructura de medición mientras que el tirante de agua (y_1) se refiere a la altura de agua medida desde la solera del canal.

4. CONDICIONES PARA SU UTILIZACION

El uso de los aforadores RBC y Parshall está condicionado a los siguientes aspectos principales:

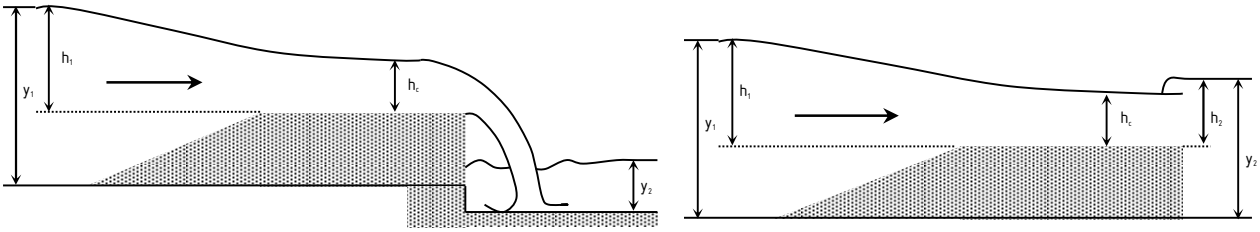
4.1. CAUDALES A SER MEDIDOS

Tratándose de aforadores portátiles, su capacidad está limitada por su tamaño y peso, importantes de considerar para su transporte y manipulación en condiciones de campo. En el caso del RBC, aforadores portátiles pueden ser utilizados para medir caudales desde 1 l/s hasta un máximo de 50 l/s. En cambio, los aforadores portátiles Parshall, permiten la medición de caudales desde 0.09 l/s hasta 32 l/s. No obstante, de que los aforadores Parshall permiten un menor rango de medición de caudales, son más adecuados para medir caudales muy pequeños.

4.2. CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO EN EL AFORADOR

Como se mencionó anteriormente, el principio de funcionamiento de estos aforadores está basado en la existencia de flujo crítico en alguna sección del aforador, lo cual significa la existencia de *flujo modular* a través del mismo.

Flujo Modular es aquel tipo de flujo en el cual "las condiciones aguas abajo no afectan las condiciones aguas arriba" (Merkley, 1991). Este flujo es fácil de reconocer en condiciones de descarga libre (Figura 4a), mientras que en condiciones de descarga sumergida (Figura 4b) la existencia o no del flujo modular deberá ser determinada. Para ello se define el *límite modular* que es "la tasa de sumergimiento (H_2/H_1) máxima para la cual un aforador operará con flujo crítico en la sección de la garganta" (Wahl, 2001), que en el caso de flujo normal en canales puede ser comparable con la "sumersión": $S = h_2/h_1$, puesto que la energía de velocidad puede despreciarse.



(a) **(b)**

Figura 4. Descarga libre (a) y Descarga sumergida (b) en aforadores de garganta.

El valor del límite modular, que generalmente es expresado en porcentaje, dependerá del tipo de estructura. Es decir que en condiciones de descarga sumergida (Figura 4b) se deberá verificar que la relación h_2/h_1 es menor o igual al límite de sumergimiento recomendable para el adecuado funcionamiento del aforador respectivo.

4.3. Características del canal o cauce natural

El uso de aforadores portátiles está restringido a canales que no presenten alta permeabilidad[4]. Por otro lado, el canal debe presentar suficiente bordo libre para evitar el desbordamiento aguas arriba debido al remanso ocasionado por el aforador. Sin embargo, el bordo libre requerido por estos aforadores es considerablemente menor al que se requiere, por ejemplo, para vertederos de pared delgada.

En el otro extremo, canales con cortes profundos dificultarán la medición con este tipo de estructuras por la dificultad de instalación de los mismos en estas condiciones.

4.4. Elección de sitio de aforo

En la mayoría de los casos, la elección del sitio de aforo puede ser realizada por inspección visual, para este fin se recomienda tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- El sitio debe ser fácilmente accesible e identificable (referenciado).
- El flujo en el sitio elegido debe ser preferentemente normal (permanente y uniforme) y tener régimen subcrítico. Se pueden utilizar como indicadores de este tipo de flujo la superficie de agua uniforme, un tirante de agua alto y velocidad relativamente lenta del agua (inferior a 0.15 m/s[5]).
- El canal debe tener un tramo lo más largo y recto posible, con una sección regular. Se recomienda que, para asegurar mediciones precisas, el canal aguas arriba tenga una sección recta, regular y sin obras de arte, en una longitud al menos diez veces el ancho promedio de la sección ($L_{a\ ar} \geq 10B$), como se observa en la Figura 5. No deben existir compuertas u otras estructuras aguas abajo, a menos que estén lo suficientemente alejadas (> a 5 m) para no afectar la condición de flujo modular del aforador. En situaciones en las cuales no se tiene estas condiciones, la persona encargada de la medición deberá decidir según su experiencia la medición o no del caudal.
- El canal debe estar libre de perturbaciones: remolinos, remansos o flujos de retorno, observar cambios súbitos de sección, juntas, obstrucciones, entradas o salidas de flujo.
- Evitar otras estructuras aguas abajo que pudiesen influenciar el nivel de agua. Los aforadores funcionarán adecuadamente dentro de los límites de sumergimiento máximos recomendados, como se verá más adelante.

---

[4] En este caso se están considerando solamente cauces naturales y acequias (canales de tierra)

[5] Esta velocidad permitirá que el número de Froude [$Fr = v_1/\sqrt{[(g*A_1/B_1)]}$ no sea mayor a 0.5 ($Fr \leq 0.5$).

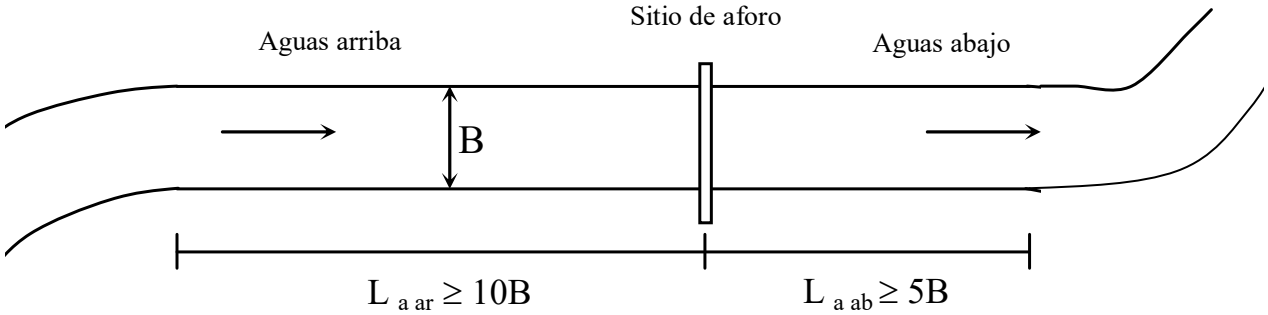


Figura 5. Sitio recomendado para el aforo.

5. AFORADOR PORTATIL RBC

Esta estructura de aforo portátil fue desarrollada por J.A. Replogle, M.G. Bos y A.J. Clemmens en 1984 y actualmente constituye una de las mejores estructuras de medición de caudales para canales no revestidos (Figura 6).

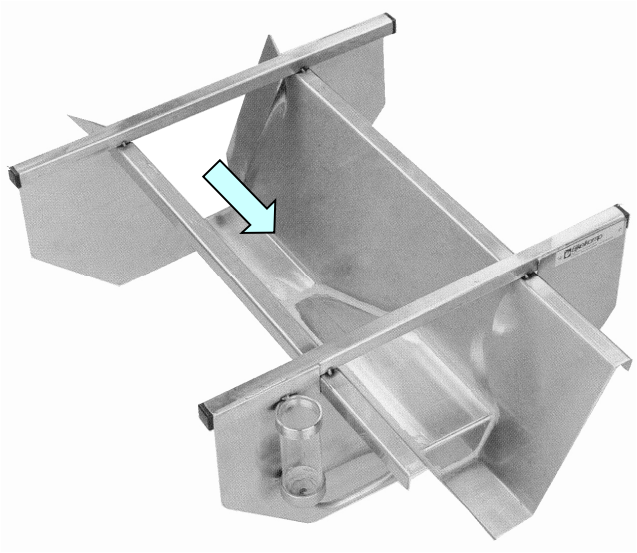


Figura 6. Aforador portátil RBC

5.1. Descripción de la estructura

El aforador RBC es básicamente un azud rectangular que se coloca en el fondo de un canal (Figura 7). Este tiene una rampa aguas arriba para evitar turbulencia y pérdidas de carga aguas arriba del aforador. Algunas veces, se construye también con rampa aguas abajo para reducir las pérdidas de carga, aunque "construir una rampa aguas abajo no ayuda significativamente a disminuir pérdidas" (Merkley, 1991).

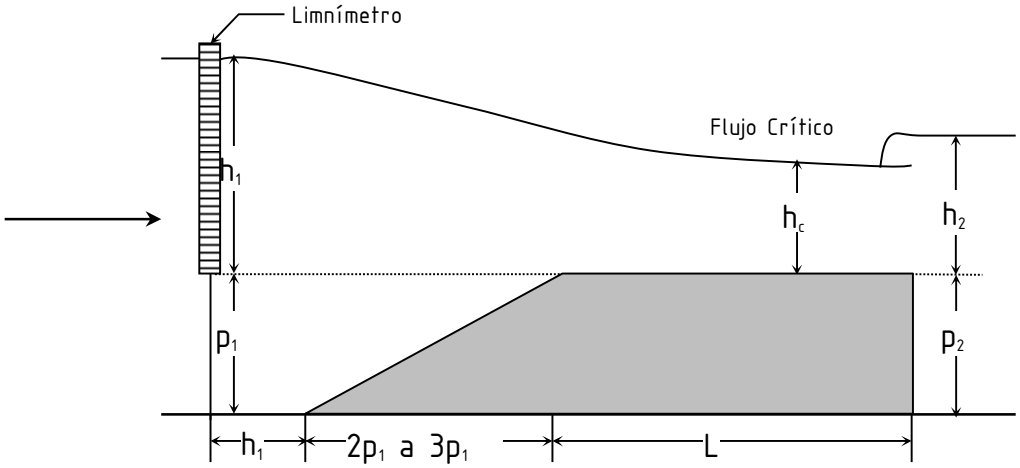


Figura 7. Aforador RBC (Merkley, 1991)

El aforador portátil RBC presenta las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas

- Su diseño y construcción son sencillos, por ello son de bajo costo.
- Buena exactitud para un amplio rango de caudales.
- No se requiere la calibración experimental de la estructura. Aunque se tienen dimensiones recomendadas, este se puede calibrar con ecuaciones teóricas usando los datos de sus dimensiones reales luego de ser construido. El error de dicha calibración suele ser menor al 2%.
- No tiene medidas estandarizadas como sucede con otro tipo de estructuras, como es el caso del aforador Parshall, cuyo funcionamiento puede ser seriamente afectado por pequeñas variaciones en sus dimensiones estándar.
- Imperfecciones en su construcción no inducen a grandes errores en la medición.
- Uso muy sencillo, la escala (limnímetro) puede ser calibrada directamente en unidades de caudal, prescindiendo del uso de tablas o figuras para su cálculo (lectura directa).
- No provoca grandes pérdidas de carga y no eleva excesivamente el tirante aguas arriba (remanso).
- Por la rampa aguas arriba, el aforador deja pasar fácilmente material flotante y sedimentos, en comparación a un vertedor de cresta delgada.
- Se adecua a cualquier forma de canal de aproximación.

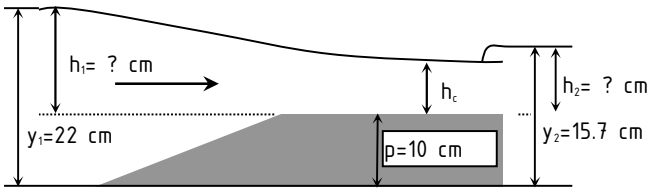
Desventajas

- A pesar de que el RBC ocasiona una menor elevación del tirante aguas arriba (remanso), en comparación con otras estructuras como ser un vertedor de pared delgada, en canales con escaso bordo libre puede producir desbordamientos aguas arriba.
- Como se trata de aforadores portátiles, al igual que otras estructuras de esta naturaleza, su capacidad de aforo se ve limitada por el tamaño y por el peso que influyen enormemente en su transporte y manipuleo en campo.
- Debe ser utilizado necesariamente en condiciones de descarga libre (flujo modular). Esto puede dificultar la elección del sitio de aforo, considerando que en el sitio elegido deberá producirse también un flujo subcrítico. En condiciones de descarga sumergida, la verificación del flujo modular, es requerida (tareas complementarias).

5.2. Condiciones y límites recomendados para su utilización

Para una utilización adecuada de este aforador, deberán ser considerados los siguientes aspectos:

- El flujo aguas arriba de éste debe ser subcrítico y menor a 50 l/s (aforadores portátiles).
- El límite de sumersión o sumergimiento de este aforador varía entre 70% a 95 % (Merkley, 1991). Si se supera este límite (flujo no modular), las condiciones de funcionamiento no serán las adecuadas y se deberá buscar otro sitio para la instalación del aforador. La comprobación de este límite se realiza haciendo mediciones de altura de agua (h1 y h2) y utilizando la siguiente expresión: h1 = y1 – p y h2 = y2 – p, como se muestra en la Figura 8:



h_1=22-10=12

h_2=15.7-10=5.7

% Sumersión = (h_2/h_1)*100=(5.7/12)*100

47.5 %

Figura 8. Ejemplo de flujo modular en descarga sumergida

Como el valor de sumersión es menor que el límite expresado arriba (70 %), entonces se estaría produciendo el flujo modular, por lo tanto, se puede proceder con las lecturas de caudal.

5.3. Pautas para la construcción de aforadores portátiles RBC

Clemmens et al (1984) diseñaron cinco aforadores portátiles de diferente tamaño, para su empleo en surcos o pequeños canales de tierra. Estos aforadores son modelos a escala en los cuales el ancho de la solera en la sección de control, b_c, va desde 50 hasta 200 mm.

Para fines de la presente guía, seguimos estos estándares de construcción. En el Cuadro 1 se presentan, para diferentes valores de b_c, las longitudes de la garganta y los caudales correspondientes, sugeridos por estos autores, quienes, para facilitar la construcción adoptan una forma de aforador relativamente simple, siendo así posible construirlo con la mayoría de los materiales laminados, aunque, por lo general, se emplee chapa (plancha) de hierro de 1 mm de espesor.

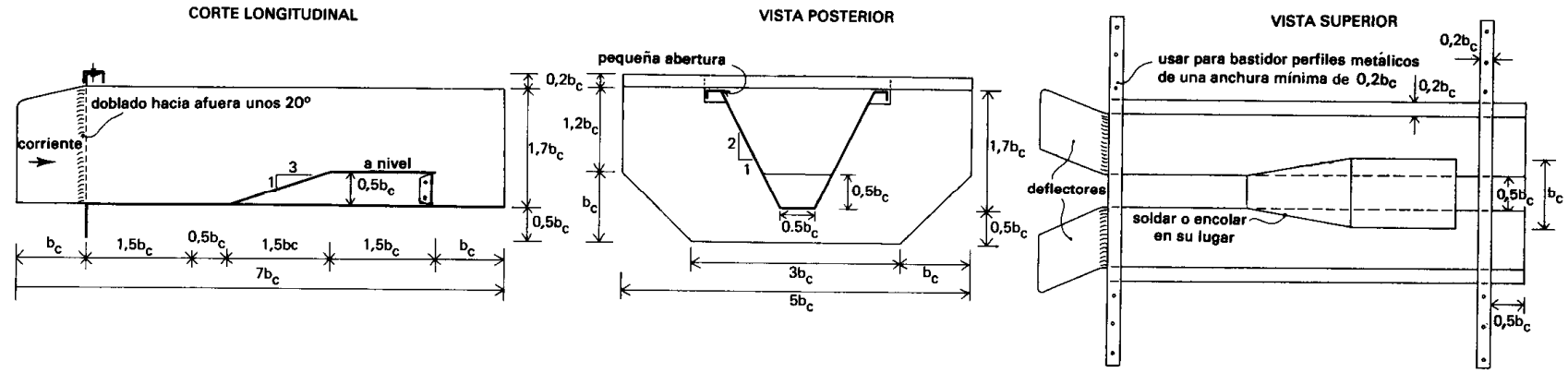
Cuadro 1. Características de cinco tamaños de aforadores RBC

Anchura de la garganta, b_c (medida exacta)	Longitud de la garganta, L	Rango aproximado de caudales a medir (litros/seg)		Pérdida aproximada de carga requerida
(mm)	(mm)	(mín)	(máx)	(mm)
50	75	0,03	1,5	10
75	112,5	0,07	4,3	15
100	150	0,16	8,7	20
150	225	0,40	24	30
200	300	0,94	49	40

Fuente: Bos, Replogle y Clemmens, 1986

Para construir uno de estos aforadores, en función a los rangos de caudal requeridos, se sugiere seguir el esquema gráfico de la Figura 9.

VISTAS



CHAPAS SIN DOBLAR

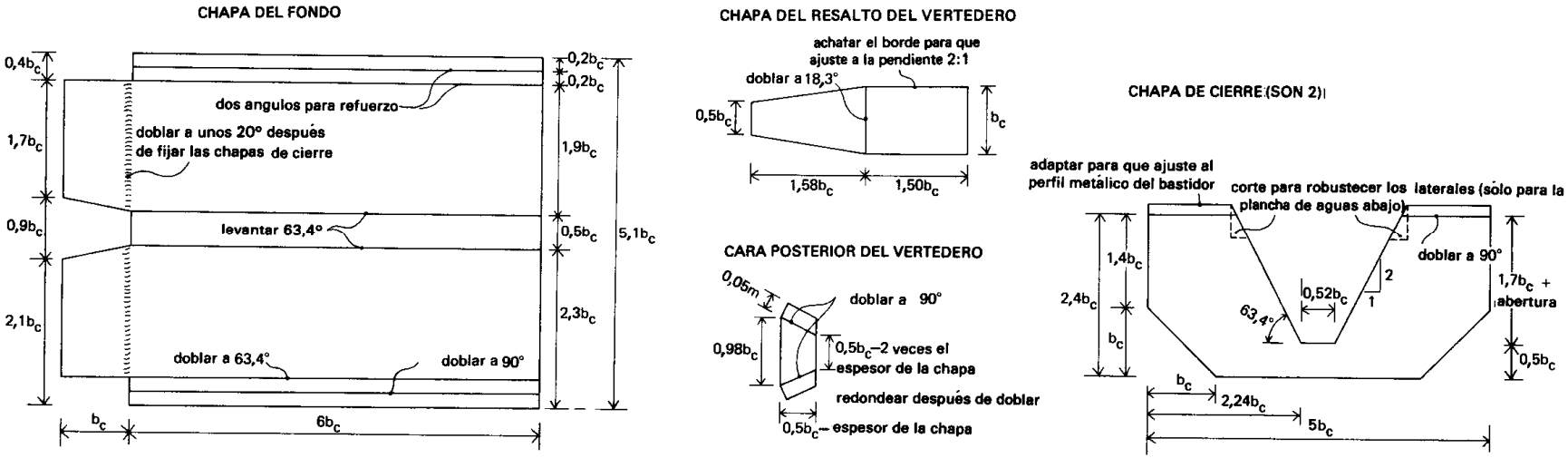


Figura 9. Esquema gráfico para construir un aforador portátil RBC, adaptado de Bos et al (1986)

5.3.1. Recomendaciones para su construcción

1. Fijar las "chapas de cierre" a la chapa de fondo" del medidor. El método más fácil es remacharlas en posición correcta, empleando cuatro escuadras y hacer las juntas de manera que no existan filtraciones (soldadura).
2. Encajar la "cara posterior del resalto" para que ajuste con precisión y remacharla en su posición exacta.
3. Soldar en su sitio la chapa del resalto del vertedero. Obsérvese que los bordes laterales de esta chapa deben estar biselados para que el ancho del citado resalto sea igual al valor deseado de b_c.
4. Remachar (o atornillar) los bastidores superiores a los bordes doblados de las chapas de cierre.
5. Colocar la escala limnimétrica en la pared de la chapa de fondo (doblada a 63.4° con respecto a la horizontal) a la distancia recomendada (Figura 7). Es recomendable que la escala limnimétrica sea hecha en un material adhesivo.

5.3.2. Tablas de caudales

A pesar de que los autores, sugieren utilizar un pozo tranquilizador para medir h_1 y por ende determinar el caudal correspondiente, por cuestiones prácticas sugerimos colocar una escala limnímetrica de lectura de caudal en la pared del aforador portátil y así poder realizar lecturas directas de caudal. Esta situación obliga a ser mucho más cuidadoso con la nivelación del aforador para realizar las lecturas, ya que una mala nivelación del mismo incrementa el error en la lectura.

En base a los valores de caudales generados por Bos, Replogle y Clemmens (1986), para los cinco aforadores portátiles, presentamos el Cuadro 2, el cual puede ser utilizado para construir directamente las escalas limnimétricas fijas para lectura directa de caudal.

Cuadro 2. Distancia real-caudal para construir las escalas limnimétricas fijas para 5 aforadores RBC

bc - 50 mm		bc - 75 mm		bc - 100 mm		bc - 150 mm		bc - 200 mm	
z_1 (mm)	Q (l/s)	z_1 (mm)	Q (l/s)	z_1 (mm)	Q (l/s)	z_1 (mm)	Q (l/s)	z_1 (mm)	Q (l/s)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5,7	0,03	10,0	0,10	14,7	0,25	18,3	0,50	24,1	1,00
12,1	0,10	16,9	0,25	22,0	0,50	27,0	1,00	35,4	2,00
18,4	0,20	25,9	0,50	28,3	0,75	34,6	1,50	45,4	3,00
23,2	0,30	32,8	0,75	33,7	1,00	41,4	2,00	54,3	4,00
27,2	0,40	38,5	1,00	38,5	1,25	47,5	2,50	62,4	5,00
30,7	0,50	43,5	1,25	42,8	1,50	53,1	3,00	69,7	6,00
34,0	0,60	48,1	1,50	46,8	1,75	58,1	3,50	76,4	7,00
37,0	0,70	52,4	1,75	50,4	2,00	62,8	4,00	82,5	8,00
39,9	0,80	56,5	2,00	53,8	2,25	67,2	4,50	88,2	9,00
42,5	0,90	60,3	2,25	57,0	2,50	71,3	5,00	93,6	10,00
44,9	1,00	63,8	2,50	60,1	2,75	75,2	5,50	98,7	11,00
47,1	1,10	67,1	2,75	63,1	3,00	78,9	6,00	103,6	12,00
49,3	1,20	70,1	3,00	65,9	3,25	82,5	6,50	108,3	13,00
51,5	1,30	73,1	3,25	68,7	3,50	86,0	7,00	112,8	14,00
53,6	1,40	76,0	3,50	71,4	3,75	89,4	7,50	117,2	15,00
55,5	1,50	78,9	3,75	74,1	4,00	92,7	8,00	121,5	16,00
56,7	1,60	81,7	4,00	76,6	4,25	95,9	8,50	125,7	17,00
		84,3	4,25	79,0	4,50	99,0	9,00	129,8	18,00
		86,0	4,50	81,4	4,75	102,1	9,50	133,8	19,00
				83,7	5,00	105,1	10,00	137,7	20,00
				85,9	5,25	108,1	10,50	141,6	21,00
				88,0	5,50	110,9	11,00	145,3	22,00
				90,1	5,75	113,7	11,50	149,0	23,00
				92,1	6,00	116,4	12,00	152,6	24,00
				94,1	6,25	119,0	12,50	156,1	25,00
				96,0	6,50	121,6	13,00	159,5	26,00
				97,9	6,75	124,1	13,50	162,8	27,00
				99,8	7,00	126,5	14,00	166,0	28,00
				101,7	7,25	128,8	14,50	169,2	29,00
				103,6	7,50	131,1	15,00	172,2	30,00
				105,5	7,75	133,4	15,50	175,2	31,00
				107,3	8,00	135,5	16,00	178,1	32,00
				109,1	8,25	137,7	16,50	181,0	33,00
				110,7	8,50	139,8	17,00	183,8	34,00
						141,9	17,50	186,6	35,00
						144,0	18,00	189,3	36,00
						146,1	18,50	192,0	37,00
						148,2	19,00	194,7	38,00
						150,3	19,50	197,4	39,00
						152,4	20,00	200,1	40,00
						154,5	20,50	202,8	41,00
						156,6	21,00	205,5	42,00
						158,6	21,50	208,2	43,00
						160,7	22,00	210,9	44,00
						162,6	22,50	213,5	45,00
						164,4	23,00	216,0	46,00
						166,1	23,50	218,5	47,00
						167,6	24,00	220,7	48,00
								222,7	49,00
								224,5	50,00

Fuente: Basado en la Tabla de caudales de Bos, Replogle y Clemmens, 1986

El cálculo de z_1 para caudales discretos, se realizó de la siguiente manera:

(1) Se generó valores de z para los caudales correspondientes a cada valor de 'h', utilizando como referencia la Figura 10.

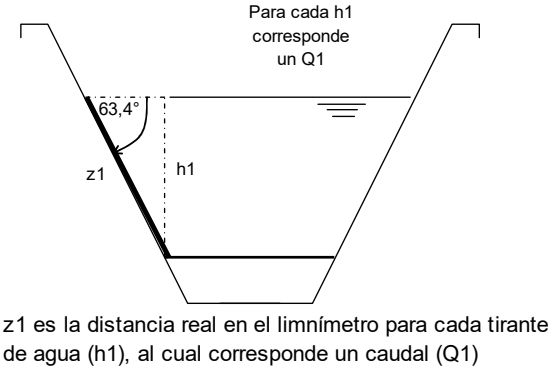


Figura 10. Determinación de z correspondiente a cada Q

(2) Se realizó un ploteo z y Q para los cinco aforadores portátiles, y en base a ecuaciones polinomiales representativas, se generaron valores de z para valores discretos de caudal (Q). A continuación presentamos un ejemplo de cómo se aplica la Tabla anterior para hacer una escala limnimétrica (en tamaño real) para el aforador portátil de 100 mm (8.5 l/s de capacidad máxima de aforo), el cual puede ser pegado directamente en la pared lateral del aforador a una distancia recomendada para cada tipo de aforador portátil, en función a 'h' (Figura 11), cuidando que el cero coincida con el nivel de la cresta del aforador:

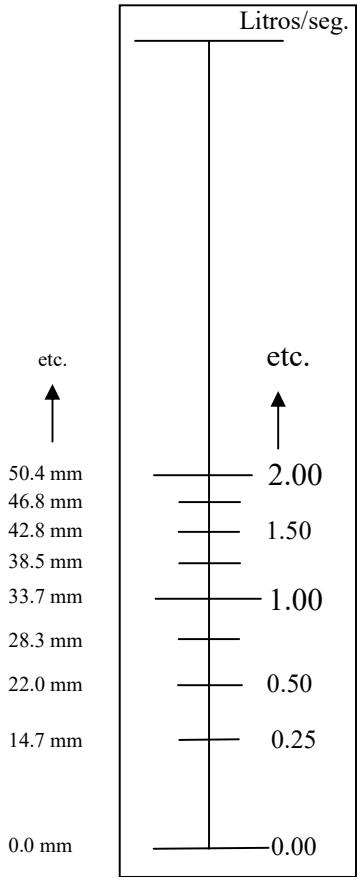


Figura 11. Escala limnímetrica, en tamaño real, para el aforador portátil RBC de bc: 100 mm

Para diseñar aforadores portátiles RBC diferentes a los tamaños diseñados por Bos, Replogle y Clemmens (1986), se sugiere utilizar programas informáticos disponibles en Internet. Por ejemplo, el Winflume, que sirve para dimensionar un aforador, así como para ver su calibración y puede encontrarse en:

https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/computer%20software/software/winflume/32bitwinflumedownload.html.

5.4. Requerimiento de personal, materiales y equipos para su uso

El requerimiento de personal para transportar e instalar el aforador portátil, dependerá del tamaño del RBC. Generalmente, para aforadores con capacidad de aforo hasta 12 l/s, una sola persona; para aforadores con capacidad de aforo hasta 24 l/s, dos personas; y para aforadores con capacidad de aforo hasta 50 l/s, cuatro personas. Estructuras portátiles con capacidad de aforo mayor a 50 l/s, no son utilizadas. La lectura en cualquiera de los aforadores es realizada por una sola persona.

Los materiales y equipos requeridos para aforar con RBC son los siguientes:

- Aforador RBC portátil
- Nivel de albañil
- Azadón o picota
- Tablero
- Planilla de campo y lápiz.

5.5. Pasos para su utilización

Al igual que para otras estructuras de medición de caudales el primer paso es la identificación del sitio de aforo, como se describe en el acápite 4.4.

5.5.1. Instalación del aforador

Una vez elegido el sitio de aforo, se recomienda seguir los siguientes pasos para la instalación del RBC:

1. Limpiar la solera del canal y regularizar las paredes del mismo aguas arriba del aforador (al menos 2 m de distancia), en caso de ser necesario. También se deben quitar las piedras que existan en el lugar elegido para colocar el aforador, estas pueden dificultar su buena colocación.
2. Hincar el aforador con el combo hasta que la base del aforador quede al mismo nivel que la solera del canal, esto evitará turbulencias que dificulten la lectura de caudal en la regla (limnímetro).

Se debe tener cuidado al hincar el aforador para no dañarlo, se puede usar el listón de madera para no golpear el aforador directamente con el combo. Los golpes deben ser localizados en los puntos indicados en la Figura 12, la fuerza del golpe tampoco debe exagerarse, si se tiene dificultad en el hincado es preferible quitar el aforador y acondicionar nuevamente el sitio de aforo o finalmente buscar otro sitio más conveniente.

Figura 12. Puntos de golpe en el aforador

Al momento del hincado puede ser necesario colocar plástico para facilitar el impermeabilizado en la parte del ingreso del agua al aforador.

3. El aforador tiene que estar bien nivelado, tanto en sentido transversal como en sentido longitudinal, para ello se requiere usar nivel de albañil (Figura 13).

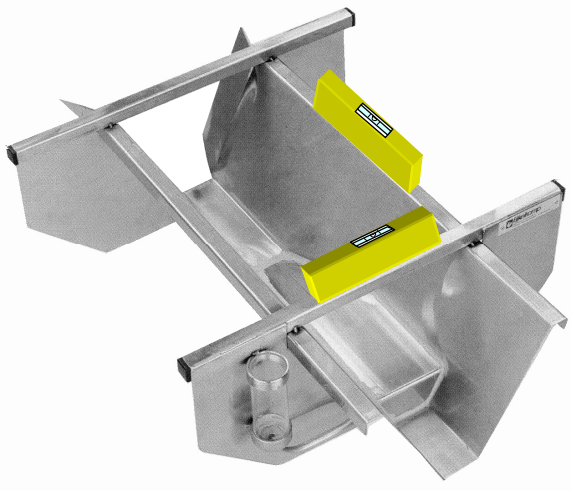


Figura 13. Nivelado longitudinal y transversal del RBC

4. Impermeabilizar cuidadosamente los laterales entre el aforador y las paredes del canal para evitar filtraciones, para este fin se emplea la misma tierra y hierbas del lugar, algunas veces será necesario usar plástico. Por lo general no es necesario impermeabilizar el fondo.

5. Verificar nuevamente la nivelación del aforador.

5.5.2. Toma de datos

Una vez instalado el vertedor:

1. En caso de requerir medir la descarga en un canal con flujo de agua permanente, es necesario esperar un tiempo para que el flujo se estabilice, entre 15 a 30 minutos, pero en caso de requerir medir la cantidad de agua que ingresa, por ejemplo, a una parcela, el tiempo de estabilización no es necesario, sino la mayor cantidad de lecturas, desde que empieza a atravesar el agua la estructura, cuidando solamente de evitar lecturas por debajo del caudal mínimo para cada tipo de aforador portátil, y así poder construir un hidrograma del evento de riego.
2. Verificar que la descarga del vertedor se produzca en forma libre. En caso de estar con descarga sumergida se deberá comprobar el porcentaje del límite de sumersión como se indicó en la Figura 4. Aunque el límite de sumersión de acuerdo a Merkley (1991), varía entre 70 a 95 %, se sugiere que este valor, por seguridad, no exceda el límite inferior (70%).
3. En caso de que el flujo no sea modular, es decir que el límite de sumersión fue superado, se deberá buscar otro sitio de aforo. En la práctica, es recomendable que la descarga se produzca en forma libre (Figura 14a) para evitar la medición de las alturas de carga aguas arriba (h_1) y aguas abajo (h_2) del aforador.
4. Tomar los datos de caudal según las lecturas obtenidas en la regla (limnímetro) del aforador. Por ejemplo, en la Figura 14b se puede leer 4.4 l/s, aproximadamente.

(a) (b)

Figura 14. Lectura de caudal en el RBC

Durante el tiempo en que se realizan las mediciones, se recomienda comprobar periódicamente la correcta instalación del aforador, vigilando que no existan fugas de agua y comprobando la nivelación de la estructura, caso contrario se debe corregir la posición, verificar nuevamente el nivel y repetir los pasos 1 y 2 para continuar con lecturas (paso 4).

Asimismo, se recomienda controlar la acumulación de piedras, sedimentos, hierbas y material de arrastre antes de la rampa aguas arriba? que pueden afectar el adecuado funcionamiento del aforador.

Otros datos de campo adicionales se registrarán de acuerdo al modelo de planilla de toma de datos propuesta (ver Anexo 2).

5.6 Ejemplo de Aplicación

El siguiente ejemplo, describe la utilización del RBC para determinar la lámina de riego aplicada en una parcela, por ello se requiere construir un hidrograma del evento de riego que permita reproducir lo más precisamente la cantidad de agua que esté ingresando a la parcela (Figuras 15 y 16). Por tanto, se requieren tomar varias lecturas de caudal desde el inicio de la entrada de agua hasta la finalización del riego. Por este motivo, no se considera un tiempo de estabilización, sino que las lecturas se toman desde que el agua llega al aforador, cuidando solamente de no leer caudales menores al mínimo recomendado para el aforador utilizado (1 l/s para el caso del RBC).

PLANILLA DE CAMPO PARA EL AFORO DE CAUDALES

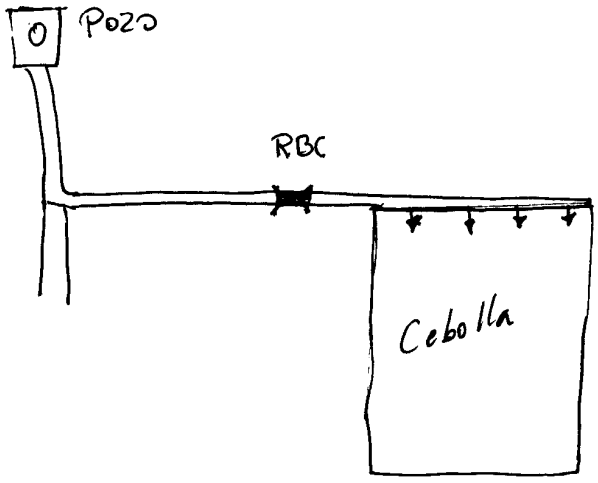
Información general del aforo

Cuenca mayor:	Pucara Mayu	*Responsable(s):*	Oscar Delgadillo	*Código de aforo:*
Cuenca:	Wasa Mayu			1 P
Localidad:	Wasa Mayu	*Fecha:*	24-Julio-03	
		Hora inicio aforo:	10:05	
Municipio:	Punata	*Hora fin aforo:*	11:49	

Nombre de la fuente de agua: Pozo Wasa Mayu
Descripción: Pozo entubado, 40 socios, utilizado para riego de hortalizas principalmente

Nombre del sitio de aforo: Co. Wasa Mayu, a la entrada de una parcela de Cebolla, a 80 m del pozo.
Descripción:

Croquis del sitio de aforo



Ubicar detalladamente el sitio de aforo

Materiales y/o equipos empleados

- Aforador RBC portatil de 24 l/s de cap. maxima
- Combo
- Nivel de albañil
- Azadón

Figura 15. Planilla de campo (información general) para aforo de caudales con RBC

AFORADOR RBC

Responsable(s): Oscar Delgadillo

Fecha: 24-Julio-03

Hora inicio aforo: 10:05

Hora fin aforo: 11:49

Código de aforo: 1P

No	Hora	Lectura de caudal en l/s	Observaciones
1	10:05	0.0	Llegada agua al aforador
2	10:06	16.0	
3	10:09	20.0	
4	10:19	22.5	
5	10:34	22.3	
6	10:49	21.0	
7	11:04	21.5	
8	11:19	22.0	
9	11:34	22.3	
10	11:46	18.2	Corte entrada de agua
11	11:49	0.0	Final descoradura
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			

Observaciones

Durante el riego se presentó fugas en el canal q' afectaron a la variación del caudal.

Figura 16. Planilla de campo (datos de medición) para aforo de caudales con RBC

El hidrograma resultante del procesamiento de datos de campo (construido en Excel) es el siguiente (Figura 17).

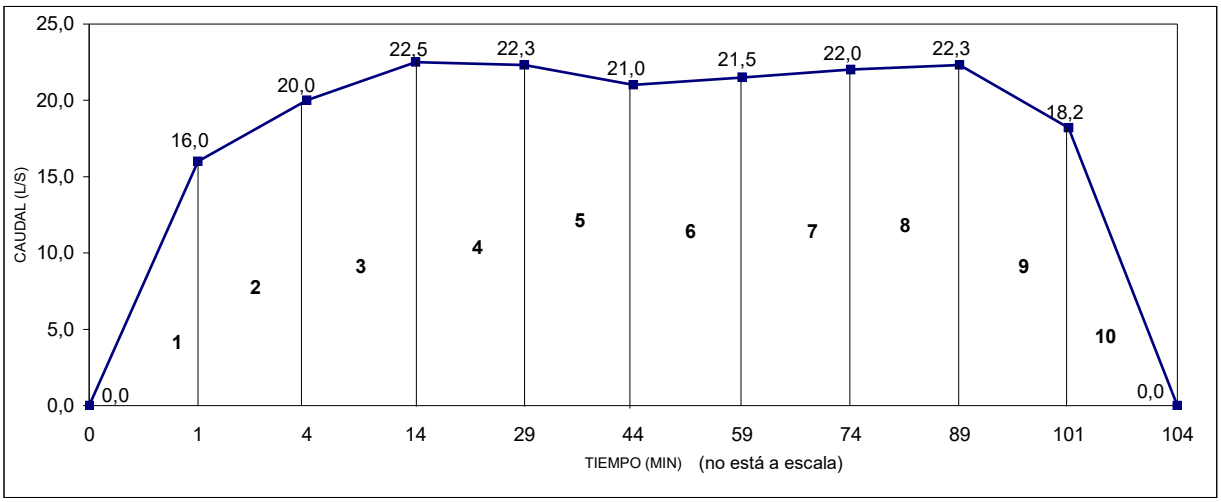


Figura 17. Hidrograma del riego en la parcela ejemplo

Haciendo un procesamiento de la información del hidrograma (Figura 18), se puede determinar el volumen ingresado a la parcela con bastante precisión, determinando todas las subáreas dentro el hidrograma (triángulos y trapecios), así como la lámina aplicada finalmente en la parcela.

Cálculo de los subvolúmenes (subáreas)

Subvolumen 1 = ((Caudal1 + Caudal2)/2)*Intervalo de tiempo1

Ejemplo	((0 + 16)/2)*60)	0,48 m3
	((16,0 + 20,0)/2)*180)	3,24 m3
	etc	

Cálculo del Volumen y la lámina ingresado en la parcela

Subarea	Hora		Intervalo de tiempo (min)	Tiempo acumulado (seg)	Intervalo de tiempo (seg)	Caudal (l/s)	Volumen m3
1	Inicio entrada de agua	10:05	0	0	0	0,0	0,48
2		10:06	1	1	60	16,0	3,24
3		10:09	3	4	180	20,0	12,75
4		10:19	10	14	600	22,5	20,16
5		10:34	15	29	900	22,3	19,485
6		10:49	15	44	900	21,0	19,125
7		11:04	15	59	900	21,5	19,575
8		11:19	15	74	900	22,0	19,935
9		11:34	15	89	900	22,3	14,58
10	Corte entrada de agua	11:46	12	101	720	18,2	1,638
	Final descorredura	11:49	3	104	180	0,0	
Volumen total							**130,97**
Area de la parcela							2150,0
Lámina aplicada en m							0,06
Lámina aplicada en mm							*61*

Figura 18. Cálculo del volumen y la lámina aplicada a la parcela

6. AFORADOR PARSHALL

Como se mencionó anteriormente, el diseño complejo y la precisión que se requiere en su construcción, ha causado que los aforadores Parshall no sean comúnmente empleados como estructuras fijas de medición de caudales de agua en nuestro medio. Sin embargo, los aforadores portátiles son de uso frecuente, especialmente para el aforo de caudales pequeños como los de vertientes y el flujo en surcos.

6.1. Descripción de la estructura

El aforador Parshall es una estructura calibrada para la medición de caudales en canales abiertos. Este aforador, desarrollado por Parshall (1922), consiste en una sección convergente a nivel del piso, una garganta con una rampa hacia abajo, y una sección divergente con una rampa hacia arriba (Figura 19).

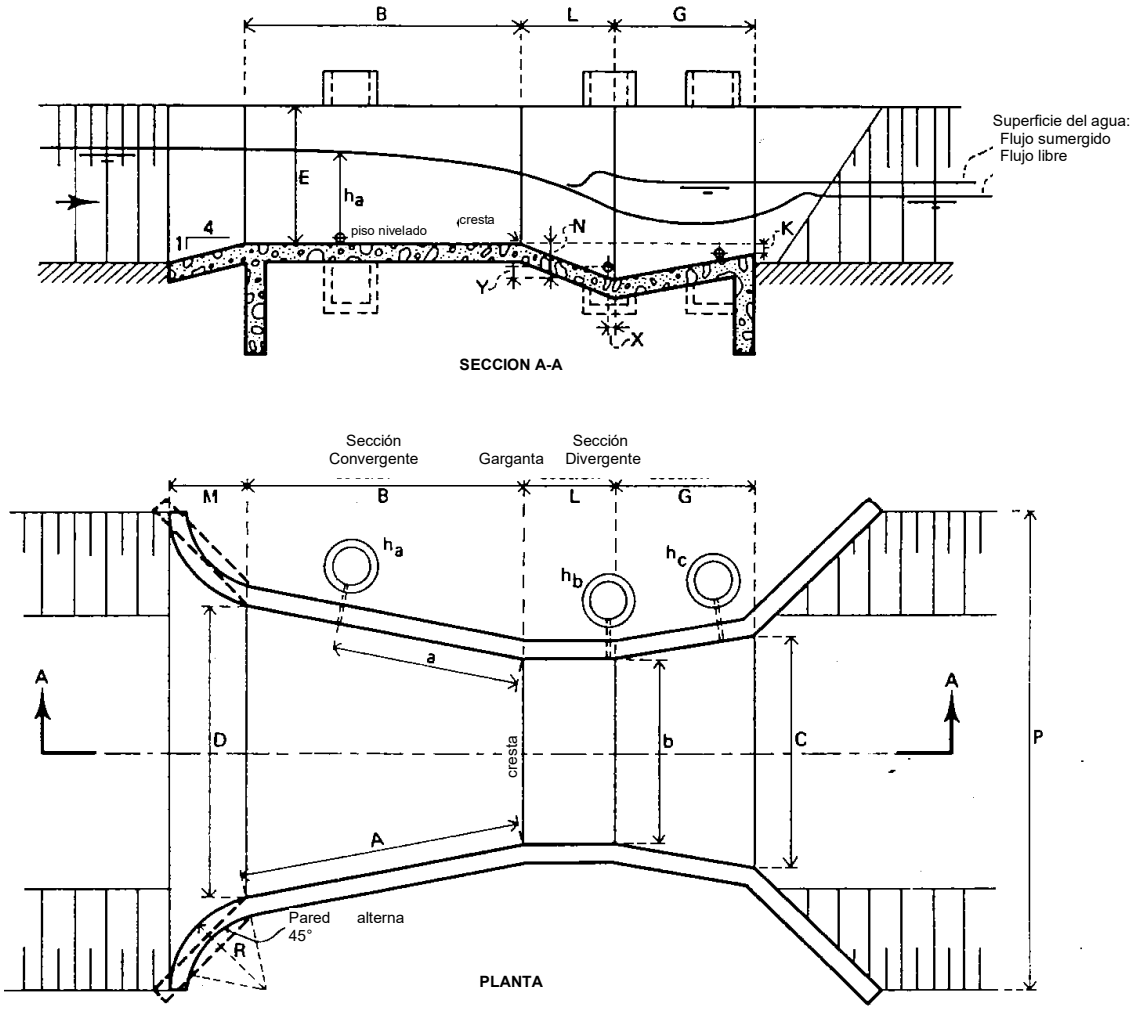


Figura 19. Partes del aforador Parshall (Bos, 1989)

A diferencia de la mayor parte de los aforadores de garganta larga, los cuales están calibrados con relación a la altura de carga aguas arriba en el canal de aproximación, los aforadores Parshall son calibrados con relación a la altura de carga medida en un sitio señalado de la sección convergente (h_a). La altura de carga "aguas abajo" es medida en la garganta (h_b) (ver Figura 19).

Los aforadores Parshall fueron desarrollados en varios tamaños (22 en total). De acuerdo con la dimensión del ancho de la garganta, estos aforadores pueden clasificarse en tres grupos: aforadores muy pequeños (1, 2 y 3 pulgadas), aforadores pequeños (6 pulgadas a 8 pies) y aforadores grandes (10 pies a 50 pies). Las dimensiones estándar de los mismos se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Dimensiones de los aforadores Parshall (Bos, 1989)

	b_c	A	a	B	C	D	E	L	G	H	K	M	N	P	R	X	Y	Z
1"	25.4	363	242	356	93	167	229	76	203	206	19	-	29	-	-	8	13	3
2"	50.8	414	276	406	135	214	254	114	254	257	22	-	43	-	-	16	25	6
3"	76.2	467	311	457	178	259	457	152	305	309	25	-	57	-	-	25	38	13
6"	152.4	621	414	610	394	397	610	305	610	-	76	305	114	902	406	51	76	-
9"	228.6	879	587	864	381	575	762	305	457	-	76	305	114	1080	406	51	76	-
1'	304.8	1372	914	1343	610	845	914	610	914	-	76	381	229	1492	508	51	76	-
1'6"	457.2	1448	965	1419	762	1026	914	610	914		76	381	229	1676	508	51	76	-
2'	609.6	1524	1016	1495	914	1206	914	610	914	-	76	381	229	1854	508	51	76	-
3'	914.4	1676	1118	1645	1219	1572	914	610	914	-	76	381	229	2222	508	51	76	-
4'	1219.2	1829	1219	1794	1524	1937	914	610	914	-	76	457	229	2711	610	51	76	-
5'	1524.0	1981	1321	1943	1829	2302	914	610	914	-	76	457	229	3080	610	51	76	-
6'	1828.0	2134	1422	2092	2134	2667	914	610	914	-	76	457	229	3442	610	51	76	-
7'	2133.6	2286	1524	2242	2438	3032	914	610	914	-	76	457	229	3810	610	51	76	-
8'	2438.4	2438	1626	2391	2743	3397	914	610	914	-	76	457	229	4172	610	51	76	-
10'	3048	-	1829	4267	3658	4756	1219	914	1829	-	152	-	343	-	-	305	229	-
12'	3658	-	2032	4877	4470	5607	1524	914	2438	-	152	-	343	-	-	305	229	-
15'	4572	-	2337	7620	5588	7620	1829	1219	3048	-	229	-	457	-	-	305	229	-
20'	6096	-	2845	7620	7315	9144	2134	1829	3658	-	305	-	686	-	-	305	229	-
25'	7620	-	3353	7620	8941	10668	2134	1829	3962	-	305	-	686	-	-	305	229	-
30'	9144	-	3861	7925	10566	12313	2134	1829	4267	-	305	-	686	-	-	305	229	-
40'	12191	-	4877	8230	13818	15481	2134	1829	4877	-	305	-	686	-	-	305	229	-
50'	15240	-	5893	8230	17272	18529	2134	1829	6096	-	305	-	686	-	-	305	229	-

Dimensiones tal como se muestran en la Figura 19

Tomando en cuenta sus dimensiones, solamente los aforadores de 1, 2 y 3 pulgadas (aforadores "muy pequeños") podrían ser considerados como portátiles, es decir, aforadores que pueden ser movidos e instalados por una o dos personas. Aforadores Parshall de mayores dimensiones deben ser utilizados necesariamente como estructuras fijas o como estructuras móviles que podrían ser instalados en un lugar por periodos relativamente largos (varios meses).

Los aforadores deben ser construidos cuidadosamente respetando las dimensiones estándar, para poder utilizar las tablas de descarga (ver cuadros Anexo 3), de otro modo se requeriría realizar la calibración experimental de la estructura, pues la máxima tolerancia del ancho de la garganta b_c es de ± 0.5 mm. Esta exactitud requerida en su construcción es una fuerte limitante que ha ocasionado la poca difusión de este aforador como estructura de medición de caudales en nuestro medio.

6.2. Límites de aplicación

Los límites de aplicación para realizar mediciones con una exactitud razonable (alrededor del 3% - descarga modular) cuando se utilizan aforadores Parshall, son:

- Cada tipo de aforador debe estar construido exactamente con las dimensiones estándar, indicadas en el Figura 19.
- El rango práctico de las alturas ha para cada tipo de aforador, según la Figura 20, son recomendados como un límite para h_a.
- Aforadores portátiles permitirán el aforo de caudales hasta un máximo de 32.1 l/s.

6.3. Materiales y equipos

El aforo de caudales utilizando el aforador Parshall requiere de los siguientes materiales y equipos:

- Aforador Parshall
- Nivel de albañil (en caso de que el aforador no cuente con este dispositivo)
- Flexómetro
- Azadón
- Plástico
- Tablero
- Planilla de campo y lápiz

En caso de que el aforador este construido con un material frágil, por ejemplo, fibra de vidrio, no se requerirá de un combo para el colocado del aforador.

6.4. Instalación del aforador

Una vez elegido el sitio de aforo, la instalación del aforador deberá seguir los siguientes pasos:

1. Limpiar la solera del canal y regularizar las paredes del mismo aguas arriba del aforador (al menos 2 m de distancia) en caso de ser necesario. También se deben quitar las piedras que existan en el lugar elegido para colocar el aforador, estas pueden dificultar su buena colocación.
2. Colocar el aforador de modo que el inicio de la rampa aguas arriba del aforador quede al mismo nivel que la solera del canal, lo cual evitará turbulencias que dificulten la lectura del caudal en la regla (limnímetro). Se debe tener cuidado al colocar el aforador para no dañarlo, si se tiene dificultad en el colocado es preferible quitar el aforador y

acondicionar nuevamente el sitio de aforo o finalmente buscar otro sitio más conveniente.

3. Una vez colocado, se debe comprobar que el aforador este bien nivelado, tanto en sentido transversal como en sentido longitudinal, para ello, algunos aforadores portátiles vienen con un dispositivo de nivelación ("ojo de pollo"), que ayuda en la verificación rápida de la nivelación (Figura 20).

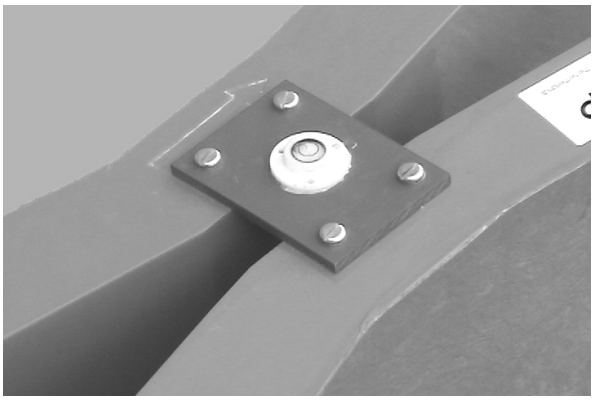


Figura 20. Dispositivo de nivelación ("ojo de pollo") en aforador Parshall de 1"

4. Impermeabilizar cuidadosamente los laterales entre el aforador y las paredes del canal para evitar filtraciones. Para este fin se emplea la misma tierra y hierbas del lugar, algunas veces será necesario usar plástico durante la colocación del aforador. Por lo general no es necesario impermeabilizar el fondo.
5. Verificar nuevamente la nivelación del aforador.

6.5. Evaluación de la descarga

La descarga (caudal) en los diferentes tamaños de aforadores Parshall está determinada por la relación entre la altura de carga (h_a) y la descarga (Q), definida a partir de calibraciones empíricas, según la siguiente ecuación general:

$$Q = Kh_a^u$$

Donde "K" es un factor adimensional, el cual es función del ancho de la garganta. La potencia "u" varia entre 1.522 y 1.600. Los valores de K y u para cada tamaño de aforador se presentan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Características de descarga de los Aforadores Parshall (Bos, 1989)

Ancho de garganta b_c en pies o pulgadas	Rango de descarga in $m^3/s \times 10^{-3}$		Ecuación $Q = K\ h_a^u$ (Q en m^3/s)	Rango de carga en metros		Límite modular h_b / h_a
	Mínimo	máximo		mínimo	máximo	
1"	0.09	5.4	$0.0604\ h_a^{1.55}$	0.015	0.21	0.50
2"	0.18	13.2	$0.1207\ h_a^{1.55}$	0.015	0.24	0.50
3"	0.77	32.1	$0.1771\ h_a^{1.55}$	0.03	0.33	0.50
6"	1.50	111	$0.3812\ h_a^{1.58}$	0.03	0.45	0.60
9"	2.50	251	$0.5354\ h_a^{1.53}$	0.03	0.61	0.60
1'	3.32	457	$0.6909\ h_a^{1.522}$	0.03	0.76	0.70
1' 6"	4.80	695	$1.056\ h_a^{1.538}$	0.03	0.76	0.70
2'	12.1	937	$1.428\ h_a^{1.550}$	0.046	0.76	0.70
3'	17.6	1427	$2.184\ h_a^{1.566}$	0.046	0.76	0.70
4'	35.8	1923	$2.953\ h_a^{1.578}$	0.06	0.76	0.70
5'	44.1	2424	$3.732\ h_a^{1.587}$	0.06	0.76	0.70
6'	74.1	2929	$4.519\ h_a^{1.595}$	0.076	0.76	0.70
7'	85.8	3438	$5.312\ h_a^{1.601}$	0.076	0.76	0.70
8'	97.2	3949	$6.112\ h_a^{1.607}$	0.076	0.76	0.70
	en m^3/s					
10'	0.16	8.28	$7.463\ h_a^{1.60}$	0.09	1.07	0.80
12'	0.19	14.68	$8.859\ h_a^{1.60}$	0.09	1.37	0.80
15'	0.23	25.04	$10.96\ h_a^{1.60}$	0.09	1.67	0.80
20'	0.31	37.97	$14.45\ h_a^{1.60}$	0.09	1.83	0.80
25'	0.38	47.14	$17.94\ h_a^{1.60}$	0.09	1.83	0.80
30'	0.46	56.33	$21.44\ h_a^{1.60}$	0.09	1.83	0.80
40'	0.60	74.70	$28.43\ h_a^{1.60}$	0.09	1.83	0.80
50'	0.75	93.04	$35.41\ h_a^{1.60}$	0.09	1.83	0.80

En el cuadro anterior Q es la descarga modular en m^3/s y h_a es la carga de agua en metros (m). En caso de aforadores muy pequeños el caudal varía de 0.09 l/s a 32 l/s, y su límite modular (h_b/h_a) es de 0.50 (50%).

Una vez el flujo a través del aforador se haya estabilizado (15 a 30 min luego de instalado el aforador), se puede realizar la evaluación del caudal siguiendo los siguientes pasos:

1. *Realizar las lecturas en los limnímetros.*

En los aforadores muy pequeños, la turbulencia producida por la sección relativamente profunda y estrecha de la garganta, ocasiona que la lectura de la carga h_b sea dificultosa. Consecuentemente, es necesario realizar la lectura de la carga h_c localizada aguas abajo cerca de la sección divergente, la cual tiene condiciones de flujo sumergido (Figura 21).

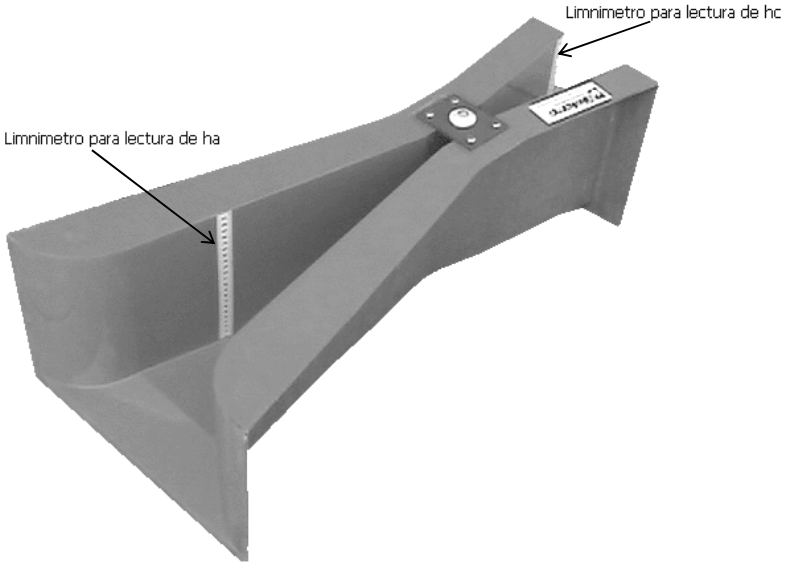


Figura 21. Aforador Parshall de 1" con limnímetros para la lectura de h_a y h_c

Las lecturas de h_c pueden ser convertidas en lecturas h_b utilizando el grafico mostrado en la Figura 22. Por ejemplo, para una lectura h_c = 0.13 m. (aforador de 1"), h_b será aproximadamente 0.124 m. como se muestra en la Figura 22.

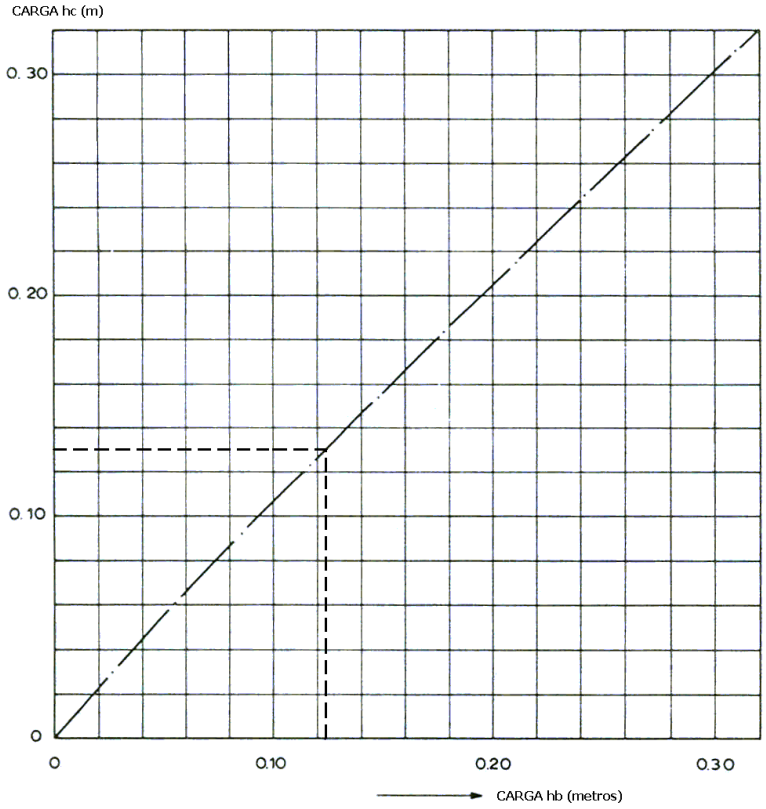


Figura 22. Relación de h_c y h_b para aforadores Parshall de 1", 2" y 3" para sumergencias > al 50 % (Bos, 1989)

2. *Comprobar el límite de sumergencia.*

Una vez obtenido el valor h_b, este es usado para calcular la relación h_b/h_a (tasa de sumergencia). Esta deberá ser menor que 0.5 (límite modular para aforador Parshall de 1" – Cuadro 4) si es que se esta produciendo flujo modular.

Siguiendo el ejemplo anterior, para una lectura h_a = 0.19 m. la tasa de sumergencia será:

$$\frac{h_b}{h_a} = \frac{0.124}{0.19} = 0.65$$

Como el límite de sumergencia para aforadores de 1" es 0.5, en este caso se estaría produciendo un flujo no modular a través del aforador.

3. *Realizar la lectura del Caudal (Q) correspondiente a* h_a

El siguiente cuadro proporciona los valores de caudal en función a la altura de carga (h_a) aguas arriba del aforador, en condiciones de flujo modular. En caso de que el flujo sea no modular, este caudal deberá ser corregido, como se explicará mas adelante.

Siguiendo el ejemplo, para h_a = 0.19 m el caudal resultante es: Q = 4.60 l/s (Cuadro 5).

Cuadro 5. Descarga a través de aforadores Parshall de 1" de garganta para flujo libre en l/s (Bos, 1989)

Carga h_a (m)	.000	.001	.002	.003	.004	.005	.006	.007	.008	.009
.01						0.09	0.10	0.11	0.12	0.13
.02	0.14	0.15	0.16	0.17	0.19	0.20	0.21	0.22	0.24	0.25
.03	0.26	0.28	0.29	0.31	0.32	0.33	0.35	0.36	0.38	0.40
.04	0.41	0.43	0.44	0.46	0.48	0.49	0.51	0.53	0.55	0.56
.05	0.58	0.60	0.62	0.64	0.66	0.67	0.69	0.71	0.73	0.75
.06	0.77	0.79	0.81	0.83	0.85	0.87	0.89	0.92	0.94	0.96
.07	0.98	1.00	1.02	1.05	1.07	1.09	1.11	1.14	1.16	1.18
.08	1.20	1.23	1.25	1.28	1.30	1.32	1.35	1.37	1.40	1.42
.09	1.45	1.47	1.50	1.52	1.55	1.57	1.60	1.62	1.65	1.68
.10	1.70	1.73	1.76	1.78	1.81	1.84	1.86	1.89	1.92	1.95
.11	1.97	2.00	2.03	2.06	2.09	2.11	2.14	2.17	2.20	2.23
.12	2.26	2.29	2.32	2.35	2.38	2.41	2.44	2.47	2.50	2.53
.13	2.56	2.59	2.62	2.65	2.68	2.71	2.74	2.77	2.80	2.84
.14	2.87	2.90	2.93	2.96	3.00	3.03	3.06	3.09	3.13	3.16
.15	3.19	3.22	3.26	3.29	3.32	3.36	3.39	3.43	3.46	3.49
.16	3.53	3.56	3.60	3.63	3.66	3.70	3.73	3.77	3.80	3.84
.17	3.87	3.91	3.95	3.98	4.02	4.05	4.09	4.12	4.16	4.20
.18	4.23	4.27	4.31	4.34	4.38	4.42	4.45	4.49	4.53	4.57
.19	**4.60**	4.64	4.68	4.72	4.75	4.79	4.83	4.87	4.91	4.95
.20	4.98	5.02	5.06	5.10	5.14	5.18	5.22	5.26	5.30	5.34
.21	5.38									

4. *Realizar el ajuste del caudal calculado para flujo modular (Q) en caso de ser necesario.*

Como se mencionó anteriormente, la condición de flujo modular está definida para cada tipo de aforador y está determinada por el límite modular, de acuerdo con la relación: h_b/h_a. En caso de rebasar el límite indicado el flujo se denomina sumergido o ahogado.

Cuando la relación h_b/h_a excede el límite de 0.5 (para aforadores muy pequeños), la descarga en flujo modular se reduce también debido a la sumersión (ahogo). En estos casos, la descarga deberá ser ajustada de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q_s = Q - Qe$$

Donde Q_s es el caudal para descarga sumergida, Q es el caudal para descarga modular (Cuadro 5) y Qe es la reducción en la descarga modular debido a la sumersión, dato que puede obtenerse de gráficos elaborados para distintos tamaños de aforadores Parshall (ver figuras Anexo 3).

Siguiendo el ejemplo, para una tasa de sumergencia de 0,65; al ser esta mayor que 0.5, el caudal obtenido para h_a = 0.19 deberá ser ajustado como se indicó anteriormente. El valor de Q para flujo modular es 4.60 l/s (Cuadro 5) y el valor Qe para h_b/h_a=0.65 (65 %) es igual a 0.28 l/s (Figura 23). Entonces el caudal ajustado (Q_s) será:

$$Q_s = 4.60 - 0.28 = 4.32 \text{ l/s}$$

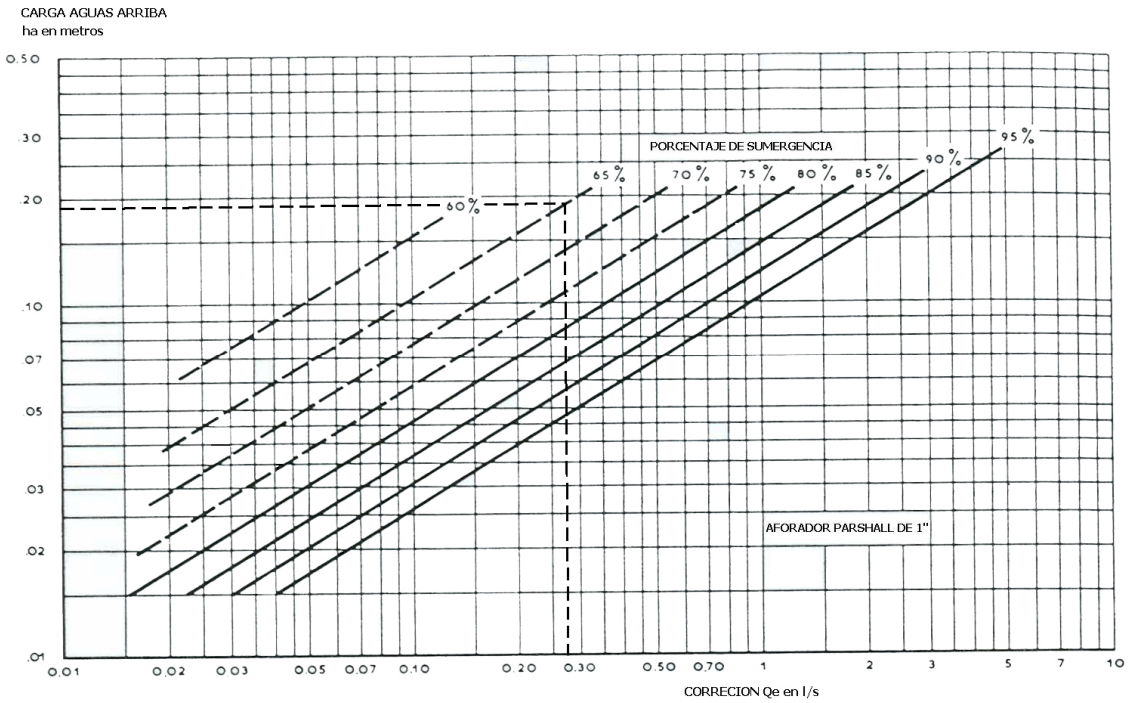


Figura 23. Factor de corrección de descarga para flujo sumergido (Parshall 1")

BIBLIOGRAFÍA

BOS, M. G. 1989. Discharge measurement structures. 3 ed. Wageningen, The Netherlands. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI). 401 p.

BOS, M. G.; REPLOGLE, J. A.; CLEMMENS, A. J. 1986. Aforadores de caudal para canales abiertos. Trad. Jose Ortiz y otros. Wageningen, The Netherlands. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI). 293 p.

BOITEN, W. 2000. Hydrometry. Rotterdam, The Netherlands. Balkema. IHE Delft lecture notes series. 246 p.

MERKLEY, G. P. 1991. Aforador de Cresta Ancha. Utah State University USA. 10 p.

WAHL, T. L. 2001. Winflume, User's Manual: Software for design and calibration of long throated flumes and broad crested weirs for open channel water flow measurement Ver. 1.05. USBR-USDA-ILRI. USA. 40 p.

ANEXOS

Anexo 1. Necesidad de régimen crítico en la sección de control de aforadores de garganta (Bos, Replogle, Clemmens, 1986; Villón, 1985)

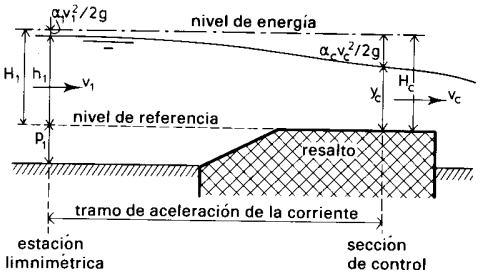


Figura 1. Niveles de energía en la estación limnimétrica y en la sección de control.

En el tramo de aceleración del aforador, tal como se muestra en la Figura 1, se puede aplicar la ecuación de continuidad,

$$Q = v_1 A_1 = v A = \text{constante} \qquad (1)$$

y también la ecuación del movimiento o de Bernoulli,

$$H_1 = h_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = y + \frac{\alpha v^2}{2g} \qquad (2)$$

Combinando estas dos ecuaciones se obtiene que

$$Q = A \sqrt{\frac{2g\,(H_1 - y)}{\alpha}} \qquad (3)$$

en donde A, que es el área de la sección transversal de la corriente en la sección de control, puede expresarse también en función de la profundidad de agua (*y*). Para calcular el gasto, *Q*, con esta ecuación, se requiere medir los valores de H_1 y de *y*. Como esto no es práctico, es preciso encontrar una ecuación que exprese *y*, en función de H_1. Si en la Ecuación 2 se sustituye la ecuación de continuidad, se obtiene

$$H_1 = H = y + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2} \qquad (4)$$

El segundo sumando del segundo miembro de la Ecuación 4 decrece al aumentar *y*, ya que *A* es función de *y*. Para una cierta forma de la sección de control y un gasto constante, *Q*, puede observarse que, para cada carga, H, existen dos posibilidades de profundidad del agua (ver Figura 2). Cuando la velocidad de la corriente es baja, la profundidad, y_{sub}, es

grande, denominándose a este régimen, subcrítico; si la profundidad es pequeña, y_{super}, la velocidad de la corriente es alta y el flujo se denomina supercrítico.

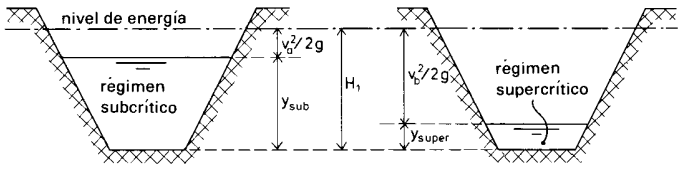


Figura 2 Calados alternativos para un determinado nivel de energía y un caudal constante.

La Ecuación 4 puede representarse, para un valor constante de *Q*, como una curva en un sistema de coordenadas, en el que la carga total referida a la solera del canal es la abscisa, y la profundidad del agua, la ordenada, según se muestra en la Figura 3. En esta curva pueden observarse las profundidades de agua, y_{sub} e y_{super}, de la Figura 2 y sus respectivas cargas de velocidad.

La carga total, medida con respecto a la solera del canal, puede ser menor que la utilizada en la Figura 2. Si el valor de H disminuye, la diferencia entre y_{sub} y e y_{super} decrece también, hasta que coincide para el mínimo valor posible de *H*, lo que corresponde al punto *c* de la Figura 3.

La profundidad de la corriente en el punto c se llama 'profundidad crítica' y se representa por y_c. Todos los demás símbolos tienen también el subíndice c, si se refieren a una sección de canal en la que el flujo es 'crítico'.

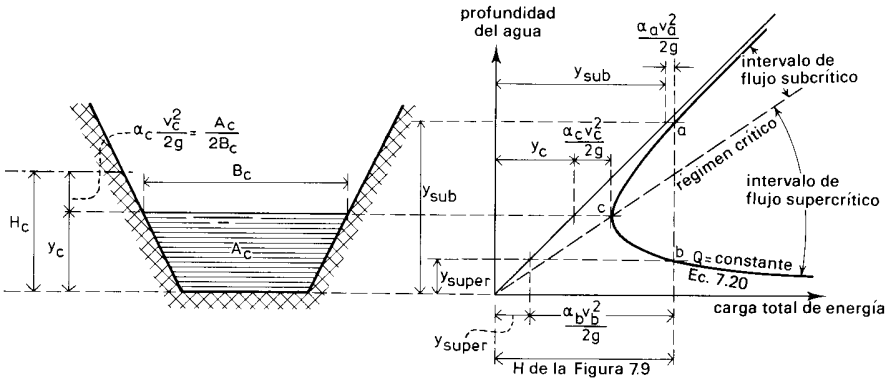


Figura 3 Curva de energía para un caudal constante.

Si el flujo es crítico y *Q* es constante, sólo existe un valor de y_c para cada valor de $H = H_c$ correspondiente a la energía mínima para ese caudal. Este puede calcularse con la siguiente ecuación de flujo crítico obtenida derivando la energía, *H*, con respecto de *y* en la ecuación 4 (Energía mínima):

$$H_1 = H = H_c = y_c + \frac{\alpha_c A_c}{2B_c} \qquad (5)$$

donde:

A_c = Area mojada en la sección de control, si la profundidad de la corriente es igual a y_c
B_c = Ancho de la superficie libre del agua.

Tanto A_c como B_c vienen definidos por y_c por lo que el flujo crítico en la sección de control se refiere exclusivamente a la carga total, H_1. Por lo tanto, la profundidad de la corriente en la sección de control de un aforador debe ser crítica para evitar la necesidad de medirla.

En este caso la Ecuación 3 puede expresarse de la forma siguiente:

$$Q = A_c \sqrt{\frac{2\,g\,(H_1 - y_c)}{\alpha_c}} \qquad (6)$$

en la cual, según la Ecuación 5,

$$H_1 - y_c = \frac{\alpha_c A_c}{2B_c} \qquad (7)$$

Combinando estas dos ecuaciones se obtiene:

$$Q = \sqrt{\frac{g\,A_c^3}{\alpha_c B_c}} \qquad (8)$$

Esta ecuación del gasto es válida para flujo crítico en todas las secciones de control, cualquiera que sea su forma. Se puede aplicar fácilmente siempre que existan ecuaciones sencillas para determinar A_c y B_c.

Anexo 2. Planillas de Toma de Datos

PLANILLA DE CAMPO PARA EL AFORO DE CAUDALES

Información general del aforo

Cuenca mayor:	.....	*Responsable(s):*	.....	*Código de aforo:*
Cuenca:	.....		.....	
	.....		.....	
Localidad:	.....	*Fecha:*	.....	
	.....	*Hora inicio aforo:*	.....	
Municipio:	.....	*Hora fin aforo:*	.....	

Nombre de la fuente de agua:
Descripción:

Nombre del sitio de aforo:
Descripción:

Croquis del sitio de aforo

Ubicar detalladamente el sitio de aforo

Materiales y/o equipos empleados

Nº de hoja: _____

AFORADOR RBC

Responsable(s): .....
.....
.....

Fecha: .....
Hora inicio aforo: .....
Hora fin aforo: .....

Código de aforo:

No	Hora	Lectura de caudal en l/s	Observaciones
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			

Apuntes Generales

AFORADOR PARSHALL

Responsable(s): .....
.....
.....

Fecha: .....
Hora inicio aforo: .....
Hora fin aforo: .....

Código de aforo:

No	Hora	Lectura de ha (m)	Lectura de hc (m)	Observaciones
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

Apuntes Generales

Anexo 3. Cuadros y Gráficos para Lectura de Caudales en Aforadores Parshall muy Pequeños (1", 2" y 3").

Cuadro 1. Descarga a través de aforadores Parshall de 1" de garganta para flujo modular en l/s (Bos, 1989)

Carga h_a (m)	.000	.001	.002	.003	.004	.005	.006	.007	.008	.009
.01						0.09	0.10	0.11	0.12	0.13
.02	0.14	0.15	0.16	0.17	0.19	0.20	0.21	0.22	0.24	0.25
.03	0.26	0.28	0.29	0.31	0.32	0.33	0.35	0.36	0.38	0.40
.04	0.41	0.43	0.44	0.46	0.48	0.49	0.51	0.53	0.55	0.56
.05	0.58	0.60	0.62	0.64	0.66	0.67	0.69	0.71	0.73	0.75
.06	0.77	0.79	0.81	0.83	0.85	0.87	0.89	0.92	0.94	0.96
.07	0.98	1.00	1.02	1.05	1.07	1.09	1.11	1.14	1.16	1.18
.08	1.20	1.23	1.25	1.28	1.30	1.32	1.35	1.37	1.40	1.42
.09	1.45	1.47	1.50	1.52	1.55	1.57	1.60	1.62	1.65	1.68
.10	1.70	1.73	1.76	1.78	1.81	1.84	1.86	1.89	1.92	1.95
.11	1.97	2.00	2.03	2.06	2.09	2.11	2.14	2.17	2.20	2.23
.12	2.26	2.29	2.32	2.35	2.38	2.41	2.44	2.47	2.50	2.53
.13	2.56	2.59	2.62	2.65	2.68	2.71	2.74	2.77	2.80	2.84
.14	2.87	2.90	2.93	2.96	3.00	3.03	3.06	3.09	3.13	3.16
.15	3.19	3.22	3.26	3.29	3.32	3.36	3.39	3.43	3.46	3.49
.16	3.53	3.56	3.60	3.63	3.66	3.70	3.73	3.77	3.80	3.84
.17	3.87	3.91	3.95	3.98	4.02	4.05	4.09	4.12	4.16	4.20
.18	4.23	4.27	4.31	4.34	4.38	4.42	4.45	4.49	4.53	4.57
.19	4.60	4.64	4.68	4.72	4.75	4.79	4.83	4.87	4.91	4.95
.20	4.98	5.02	5.06	5.10	5.14	5.18	5.22	5.26	5.30	5.34
.21	5.38									

Cuadro 2. Descarga a través de aforadores Parshall de 2" de garganta para flujo modular en l/s (Bos, 1989)

Carga ha (m)	.000	.001	.002	.003	.004	.005	.006	.007	.008	.009
.01						0.18	0.20	0.22	0.24	0.26
.02	0.28	0.30	0.33	0.35	0.37	0.40	0.42	0.45	0.47	0.50
.03	0.53	0.55	0.58	0.61	0.64	0.67	0.70	0.73	0.76	0.79
.04	0.82	0.85	0.89	0.92	0.95	0.99	1.02	1.06	1.09	1.13
.05	1.16	1.20	1.23	1.27	1.31	1.35	1.38	1.42	1.46	1.50
.06	1.54	1.58	1.62	1.66	1.70	1.74	1.79	1.83	1.87	1.91
.07	1.96	2.00	2.04	2.09	2.13	2.18	2.22	2.27	2.31	2.36
.08	2.41	2.45	2.50	2.55	2.60	2.64	2.69	2.74	2.79	2.84
.09	2.89	2.94	2.99	3.04	3.09	3.14	3.19	3.24	3.30	3.35
.10	3.40	3.45	3.51	3.56	3.62	3.67	3.72	3.78	3.83	3.89
.11	3.94	4.00	4.06	4.11	4.17	4.22	4.28	4.34	4.40	4.45
.12	4.51	4.57	4.63	4.69	4.75	4.81	4.87	4.93	4.99	5.05
.13	5.11	5.17	5.23	5.29	5.35	5.42	5.48	5.54	5.60	5.67
.14	5.73	5.79	5.86	5.92	5.99	6.05	6.12	6.18	6.25	6.31
.15	6.38	6.44	6.51	6.58	6.64	6.71	6.78	6.84	6.91	6.98
.16	7.05	7.12	7.19	7.25	7.32	7.39	7.46	7.53	7.60	7.67
.17	7.74	7.81	7.88	7.96	8.03	8.10	8.17	8.24	8.31	8.39
.18	8.46	8.53	8.61	8.68	8.75	8.83	8.90	8.98	9.05	9.12
.19	9.20	9.27	9.35	9.43	9.50	9.58	9.65	9.73	9.81	9.88
.20	9.96	10.04	10.12	10.19	10.27	10.35	10.43	10.51	10.59	10.66
.21	10.74	10.82	10.90	10.98	11.06	11.14	11.22	11.30	11.38	11.47
.22	11.55	11.63	11.71	11.79	11.87	11.96	12.04	12.12	12.20	12.29
.23	12.37	12.45	12.54	12.62	12.71	12.79	12.87	12.96	13.04	13.13
.24	13.21									

Cuadro 3. Descarga a través de aforadores Parshall de 3" de garganta para flujo modular en l/s (Bos, 1989)

Carga ha (m)	.000	.001	.002	.003	.004	.005	.006	.007	.008	.009
.03	0.77	0.81	0.85	0.90	0.94	0.98	1.02	1.07	1.11	1.16
.04	1.21	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45	1.50	1.55	1.60	1.65
.05	1.70	1.76	1.81	1.87	1.92	1.98	2.03	2.09	2.15	2.20
.06	2.26	2.32	2.38	2.44	2.50	2.56	2.62	2.68	2.75	2.81
.07	2.87	2.94	3.00	3.06	3.13	3.20	3.26	3.33	3.40	3.46
.08	3.53	3.60	3.67	3.74	3.81	3.88	3.95	4.02	4.09	4.17
.09	4.24	4.31	4.39	4.46	4.53	4.61	4.69	4.76	4.84	4.91
.10	4.99	5.07	5.15	5.23	5.30	5.38	5.46	5.54	5.62	5.70
.11	5.79	5.87	5.95	6.03	6.12	6.20	6.28	6.37	6.45	6.54
.12	6.62	6.71	6.79	6.88	6.97	7.05	7.14	7.23	7.32	7.41
.13	7.50	7.59	7.68	7.77	7.80	7.95	8.04	8.13	8.22	8.32
.14	8.41	8.50	8.60	8.69	8.78	8.88	8.97	9.07	9.16	9.26
.15	9.36	9.45	9.55	9.65	9.75	9.85	9.94	10.04	10.14	10.24
.16	10.34	10.44	10.54	10.64	10.75	10.85	10.95	11.05	11.15	11.26
.17	11.36	11.46	11.57	11.67	11.78	11.88	11.99	12.09	12.20	12.31
.18	12.41	12.52	12.63	12.74	12.84	12.95	13.06	13.17	13.28	13.39
.19	13.50	13.61	13.72	13.83	13.94	14.05	14.16	14.28	14.39	14.50
.20	14.62	14.73	14.84	14.96	15.07	15.19	15.30	15.42	15.53	15.65
.21	15.76	15.88	16.00	16.11	16.23	16.35	16.47	16.59	16.70	16.82
.22	16.94	17.06	17.18	17.30	17.42	17.54	17.66	17.79	17.91	18.03
.23	18.15	18.27	18.40	18.52	18.64	18.77	18.89	19.01	19.14	19.26
.24	19.39	19.51	19.64	19.77	19.89	20.02	20.15	20.27	20.40	20.53
.25	20.66	20.78	20.91	21.04	21.17	21.30	21.43	21.56	21.69	21.82
.26	21.95	22.08	22.21	22.34	22.48	22.61	22.74	22.87	23.01	23.14
.27	23.27	23.41	23.54	23.67	23.81	23.94	24.08	24.21	24.35	24.49
.28	24.62	24.76	24.89	25.03	25.17	25.31	25.44	25.58	25.72	25.86
.29	26.00	26.14	26.28	26.42	26.56	26.70	26.84	26.98	27.12	27.26
.30	27.40	27.54	27.68	27.83	27.97	28.11	28.25	28.40	28.54	28.68
.31	28.83	28.97	29.12	29.26	29.41	29.55	29.70	29.84	29.99	30.14
.32	30.28	30.43	30.58	30.72	30.87	31.02	31.17	31.32	31.46	31.61
.33	31.76	31.91	32.06							

Figura 1. Grafico para la estimación del factor de corrección de descarga para flujo sumergido (Parshall 1")

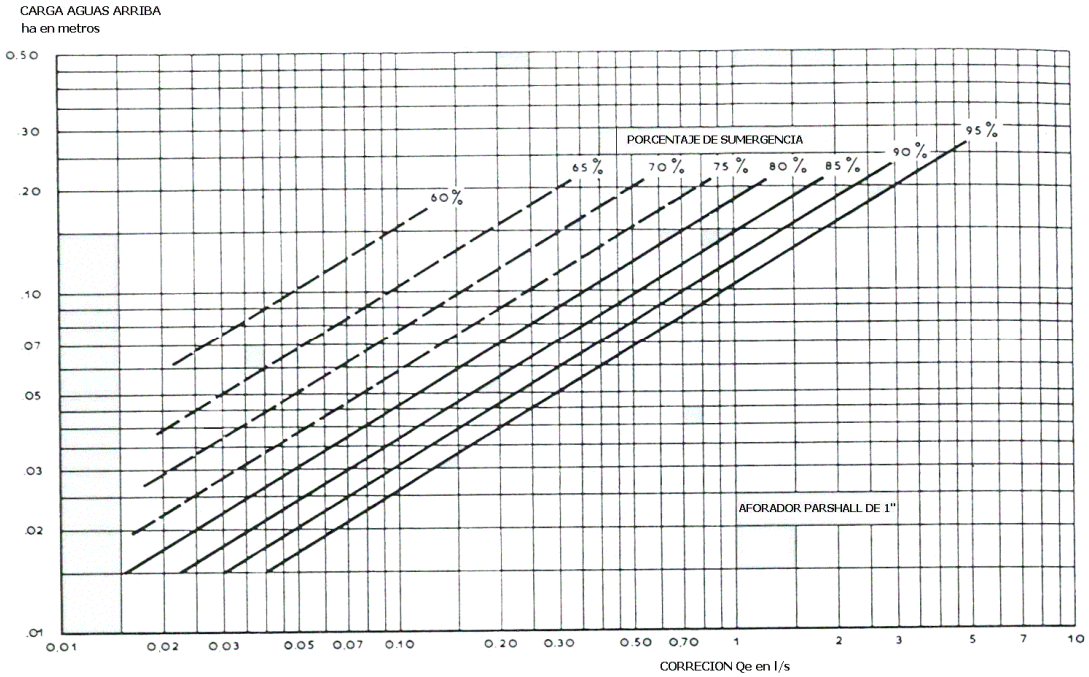


Figura 2. Grafico para la estimación del factor de corrección de descarga para flujo sumergido (Parshall 2")

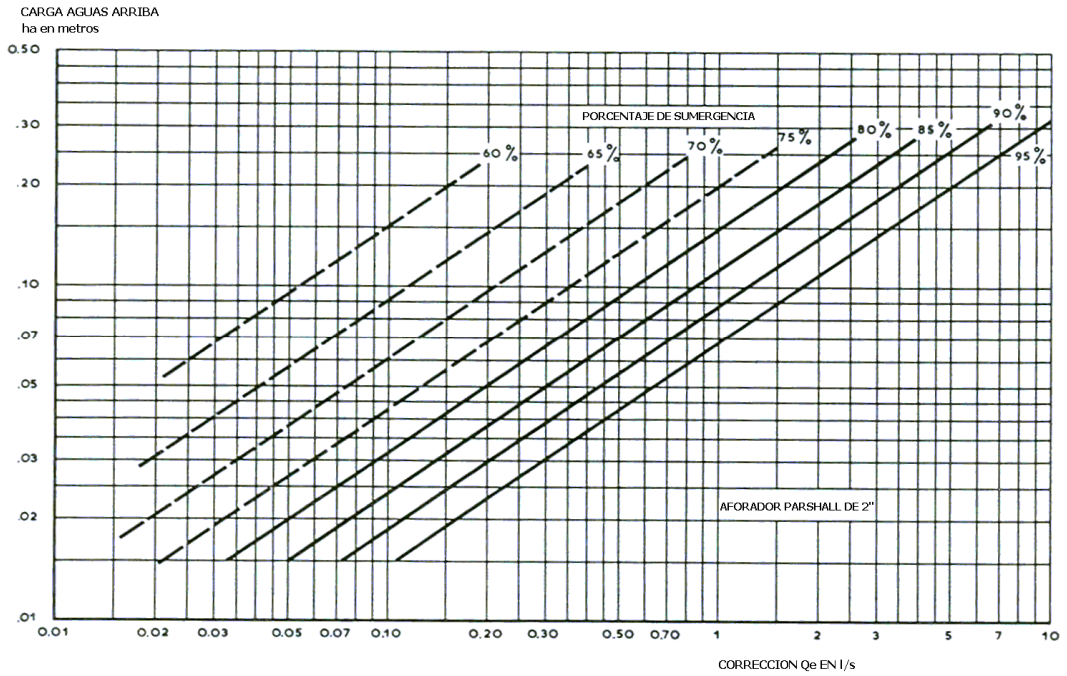
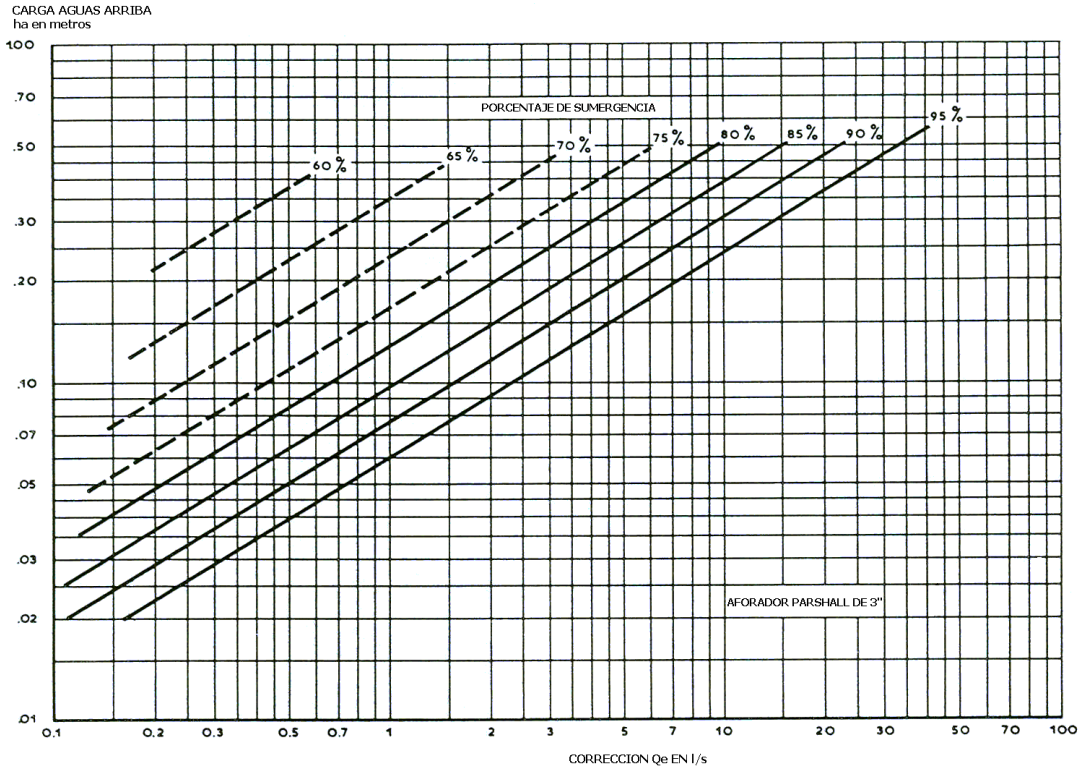


Figura 3. Grafico para la estimación del factor de corrección de descarga para flujo sumergido (Parshall 3")



CENTRO AGUA
UMSS - FCAyP

Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua

El Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA) es un centro de investigación y enseñanza, perteneciente a la Facultad de Ciencias Agrícolas Pecuarias y Forestales de la Universidad Mayor de San Simón (UMSS, Cochabamba-Bolivia). En base a las experiencias y conocimientos acumulados desde su creación, actualmente trabaja en forma interactiva y multidisciplinaria en la profundización del conocimiento sobre la gestión y los usos del agua.