



Manual de aforos

SECRETARIA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRAULICOS

COMISION NACIONAL DEL AGUA

Manual de aforos

*INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA
CENTRO DE CONSULTA DEL AGUA*



Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje
Marzo de 1992

Ing. Arturo Kennedy Pérez
Ing. Fernando Fragoza Díaz
Ing. Efrén Peña Peña
Ing. J. Eduardo Moreno Bañuelos

Clasf. _____

Adqs. 16733

Precio _____

Proc. DONACION

Fecha 26-MARZO-93

Título
Manual de aforos

Diseño y Producción
Subcoordinación Editorial, IMTA

Colección Manuales

© Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1991
Primera edición
Reservados todos los derechos
Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos
Tel. 19 39 57 19 40 00 ext. 122
Fax (73) 19 39 46
Hecho en México
Made in Mexico

Revisión

Dr. Enrique Palacios Vélez
Dr. J. Luis Trava Manzanilla
Dr. Polioptro Martínez Austria
Ing. Jesús Cuadra Ramírez
Ing. Efrén Peña Peña
Ing. Luis Zierold Reyes
Ing. Luis Villarino Olivares
Ing. Nahum García Villanueva
Lic. Javier Sicilia Zardain

Apoyo

Ing. Jorge A. Castillo González
Ing. Rodolfo Namuche Vargas
Ing. Juan Herrera Ponce
Ing. Jorge Bautista Morales
C. Ma. de la Luz Espinosa Jiménez

INDICE

INTRODUCCION	1
1. METODOS DE AFORO PARA RIOS Y CANALES	3
1.1 <u>Métodos de área y velocidad</u>	3
1.1.1 Velocidad media en una corriente	3
1.1.2 Area de la sección transversal de una corriente	4
1.1.3 Aforo con molinete.	6
1.1.4 Aforo con flotador.....	16
1.2 <u>Métodos de relación escala-gasto</u>	19
1.2.1 Aforo con limnómetro	19
1.2.2 Aforo con limnógrafo	20
1.2.3 Obtención de relación escala-gasto	21
1.3 <u>Métodos de compuertas</u>	23
1.3.1 Compuertas radiales	25
1.3.2 Compuertas rectangulares	26
1.3.3 Calibración de compuertas radiales y rectangulares	26
2. METODOS DE AFORO PARA CANALES Y TOMAS PARCELARIAS	33
2.1 <u>Aforo con vertedores</u>	33
2.1.1 Vertedor rectangular	35
2.1.2 Vertedor rectangular <u>Guamúchil</u>	41
2.1.3 Vertedor trapezoidal <u>Cipolletti</u>	44
2.1.4 Vertedor triangular	48
2.2 <u>Aforo con orificios y compuertas calibradas</u>	52
2.2.1 Compuertas deslizantes	53
2.2.2 Compuertas tipo <u>Mayo</u>	55
2.2.3 Compuertas rectangulares en bocatomas ...	58
2.2.4 Compuertas circulares en bocatomas	64
2.2.5 Compuertas dobles	72
2.3 <u>Aforadores de régimen crítico</u>	74
2.3.1 Aforadores de garganta larga	76
2.3.2 Aforadores de garganta corta <u>Parshall</u> ...	80
2.3.3 Aforador Venturi tipo <u>Tecamachalco</u>	85

2.4	<u>Aforador tipo Neyrpic</u>	88
2.4.1	Módulo para gastos pequeños	88
2.4.2	Módulo para gastos grandes	92
2.5	<u>Aforador de hélice para tomas</u>	96
3.	METODOS DE AFORO PARA APLICACION DEL AGUA EN LAS PARCELAS	99
3.1	<u>Aforo para gastos en melgas y surcos</u>	99
3.1.1	Aforador <u>Chapingo</u>	99
3.1.2	Aforador de garganta corta con plantilla horizontal	103
3.1.3	Aforo volumétrico	108
3.1.4	Aforo con sifones calibrados	109
3.1.5	Aforo mediante placa con orificios	113
4.	METODOS DE AFORO PARA DESCARGAS EN EQUIPOS DE BOMBEO ...	117
4.1	<u>Método de la escuadra</u>	117
4.2	<u>Medidores de hélice</u>	122
4.3	<u>Medidores de orificio en tuberías</u>	123
5.	METODOS DE AFORO EN SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADOS	127
5.1	<u>Aforos de aspersores, microaspersores y goteros</u>	127
5.2	<u>Relación gasto-presión</u>	129
6.	GLOSARIO DE TERMINOS	131
7.	BIBLIOGRAFIA	137

INDICE DE CUADROS

1	Separación de sondeo en función del ancho de la corriente	5
2	Velocidades (m/s) para molinetes Gurley tipo Price No 622	8
3	Ajuste de relación escala-gasto mediante regresión	22
4	Calibración de una compuerta radial, mediante regresión	28
5	Porcentaje de variación del gasto estimado respecto al de aforo	31
6	Gasto para vertedor rectangular, sin contracción (m^3 / s)	37
7	Gasto para vertedor rectangular, con contracción (m^3 / s)	38
8	Gasto para vertedores <u>Cipolletti</u> (m^3 / s)	46
9	Gasto para vertedores triangulares 60^0 y 90^0 (m^3 / s)	50
10	Fórmulas para el gasto de una compuerta tipo <u>Mayo</u> (plantilla de 60 cm)	55
11	Método matemático, compuerta rectangular	59
12	Determinación del producto (CA), compuerta circular ...	67
13	Comparación del gasto obtenido gráficamente, respecto al aforado	69
14	Tamaño del medidor y relación con el grado de sumersión	82
15	Tamaño del medidor y fórmula de gasto	82
16	Especificaciones de escalón de entrada, tirantes y pérdidas de carga para gastos con variación de $\pm 5\%$ y $\pm 10\%$	92
17	Tamaño y número de compuertas para módulos tipo XX-2	92
18	Tamaño y número de compuertas para módulos tipo L-2	93
19	Relación carga-gasto para aforadores <u>Chapíngo</u> (lps)	101
20	Relación carga-gasto para aforadores con plantilla horizontal (lps)	106
21	Relación carga-gasto para sifones de diferente diámetro (lps)	111
22	Coeficientes de descarga para orificios en placa	115
23	Gasto para orificios en placa (lps)	115
24	Gasto en tubo, descargando lleno (lps)	119
25	Porcentaje de área con respecto a tubo lleno	121

INDICE DE LAMINAS

1 División en franjas de la sección transversal de una corriente	5
2 Molinete Gurley tipo Price No. 622	7
3 Variación de la velocidad en la sección transversal y en una vertical de la corriente	9
4 Torres de concreto para estaciones de aforo	10
5 Corrección por desviación de la vertical	12
6 Medición del gasto de una corriente por medio de molinete	14
7 Flotador semisumergido de corcho lastrado	17
8 Limnómetro	20
9 Limnógrafo	21
10 Curva escala-gasto ajustada	24
11 Compuerta radial	25
12 Compuerta rectangular	26
13 Curvas carga-gasto de una compuerta radial	30
14 Descripción del escurrimiento y partes que integran un vertedor	33
15 Vertedor rectangular con escala graduada aguas arriba	36
16 Curvas carga-gasto para vertedores rectangulares sin contracción lateral	39
17 Curvas carga-gasto para vertedores rectangulares con contracción lateral	40
18 Nomograma de <u>Francis</u> para vertedores rectangulares con contracción lateral	42
19 Aforador tipo <u>Guamúchil</u>	43
20 Vertedor trapezoidal <u>Cipolletti</u>	44
21 Curvas carga-gasto para vertedor <u>Cipolletti</u>	47
22 Vertedor triangular	48
23 Curvas carga-gasto para vertedores triangulares	51
24 Compuerta deslizante a descarga libre	54
25 Compuerta deslizante a descarga ahogada	54
26 Compuerta tipo <u>Mayo</u>	56
27 Curvas carga-gasto para compuerta tipo <u>Mayo</u>	57
28 Compuerta rectangular en bocatoma	58
29 Curvas carga-gasto para compuerta rectangular	60
30 Nomograma auxiliar generado por el programa NOMO	62
31 Nomograma auxiliar generado por el programa NOMO2	63
32 Nomograma de uso general para calibrar una compuerta	65
33 Gráfica (CA) Vs. (a) de la compuerta circular	68
34 Nomograma para compuerta circular	70

35	Compuerta doble <u>Calco</u>	73
36	Gasto para diversos grados de abertura compuerta <u>Calco</u>	75
37	Datos para el programa de cómputo del aforador de garganta larga	76
38	Geometría del aforador y canal	78
39	Curva calibrada carga-gasto del aforador	79
40	Planta y sección longitudinal de un medidor <u>Parshall</u> ..	81
41	Gasto a través de un aforador <u>Parshall</u> de 0.15 m (6") .	84
42	Gasto a través de un aforador <u>Parshall</u> de 0.23 m (9") .	84
43	Aforador <u>Venturi</u> tipo <u>Tecamachalco</u>	86
44	Módulos <u>Aguacontrol</u> tipo <u>Neyrpic</u>	89
45	Características hidráulicas de módulos con doble reductor	90
46	Curva de operación de un módulo con dos reductores	91
47	Esquema de variación del gasto en módulos de doble reductor	94
48	Condiciones para la instalación de un módulo en la entrada de la bocatoma	94
49	Condiciones para la instalación de un módulo a la salida de la bocatoma	95
50	Instalación de un módulo en sustitución de un aforador <u>Guamúchil</u>	95
51	Condiciones para la instalación de un módulo en una bocatoma sin tubería	96
52	Medidor volumétrico totalizador	98
53	Aforador <u>Chapingo</u>	100
54	Curvas carga-gasto para aforador <u>Chapingo</u>	102
55	Relaciones geométricas, aforador plantilla horizontal	103
56	Valores del coeficiente (K) y el exponente (α)	104
57	Dimensiones de los aforadores ensayados	105
58	Curvas carga-gasto para aforadores con plantilla horizontal	107
59	Instalación para la medición volumétrica en surcos ...	109
60	Descarga en un sifón	110
61	Curvas carga-gasto para sifones	112
62	Placa con orificios para medir gasto en surcos	114
63	Aforo en tubo descargando lleno	117
64	Escuadra para aforo	118
65	Aforo en tubo descargando parcialmente lleno	120
66	Medidor volumétrico en tubería	122
67	Orificio circular colocado en la descarga de un tubo	123
68	Coeficiente de descarga (C), para orificios en tubo	124
69	Aforo en un sistema de riego presurizado	127
70	Aforo en microaspersor y gotero	128

INTRODUCCION

En los Distritos de Riego se conduce el agua desde las fuentes de abastecimiento hasta las parcelas de los usuarios, tratando de dar el servicio de entrega de agua para riego en el momento oportuno y con la cantidad necesaria. El problema principal es entregar el agua a los usuarios en el momento en que los cultivos lo demandan, esto se debe a que los distritos de riego generalmente comprenden varios millares de hectáreas dominadas y no disponen de la programación de los cultivos. Para conducir y distribuir el agua desde la fuente de abastecimiento hasta las parcelas, es necesario hacerlo por un sistema de canales, con obras de control y complementarias, construidas y localizadas de manera que permitan su distribución entre las diferentes unidades, zonas y secciones de riego.

Por otra parte, cuando el agua es escasa, su costo de oportunidad es alto, haciendo indispensable que su distribución sea eficiente y que las pérdidas de conducción sean mínimas.

Para dar el servicio oportuno y suficiente es necesario contar con la programación adecuada, mediante la estimación de la demanda (uso consuntivo). También se requiere conocer las eficiencias de los canales y sus factores de pérdidas de conducción, con la finalidad de conocer los volúmenes que deben extraerse, derivarse y distribuirse en los diferentes niveles de operación de los distritos de riego. Las eficiencias y las pérdidas de conducción se determinan mediante aforos.

De acuerdo con los programas de extracción se regulan las válvulas de las obras de toma en las fuentes de abastecimiento, las compuertas de presas derivadoras, canales principales y tomas laterales. Para entregar los gastos solicitados a cada jefe de unidad o de zona, se verifica, mediante aforos, la regulación de las compuertas, a su vez, los jefes de zona entregan los volúmenes solicitados por los canaeros, para que estos los distribuyan entre los predios que van a regarse.

En los distritos de riego los aforos son la base del manejo eficiente del agua en el proceso de extracción, conducción, y distribución; por lo que se ha considerado de gran importancia elaborar este manual, con un enfoque práctico, de fácil aplicabilidad en los diferentes niveles de medición del agua, como son: red mayor (corrientes grandes), red menor (corrientes medianas) y parcelario (caudales pequeños).

La modernización de los procedimientos de operación se debe basar en el uso correcto de los métodos de aforo para lograr: entregar

el agua a los usuarios por dotación volumétrica, por tandeo o por demanda libre, obtener estadísticas reales que permitan elaborar mejores planes de riego, la distribución equitativa en las tomas granjas y cobrar el agua por volumen entregado a usuarios.

Los dispositivos para aforar deben ser: fáciles de leer e instalar, hidráulicamente eficientes, precisos, autolimpiables y resistentes al uso, con la finalidad de reducir su mantenimiento.

Los equipos y estructuras de aforo para uso común deben usar escalas para estimar el valor del gasto directamente, debido a que pocas personas hacen cálculos en el campo y se les dificulta usar tablas y gráficas. Las escalas que indican gastos directamente, rara vez se encuentran en el campo.

Para la operación de las redes de canales es necesario aforar frecuentemente y en muchos sitios, por lo que se requieren muchos dispositivos de aforo. De acuerdo con la carga hidráulica disponible o los desniveles del terreno, es indispensable usar dispositivos de aforo que reúnan las características mencionadas con anterioridad y sobre todo que sean hidráulicamente eficientes, es decir, que para funcionar adecuadamente, la pérdida de carga sea mínima.

Para lograr los requisitos anteriores es necesario sacrificar cierto grado de precisión en las medidas de gasto, siempre y cuando el error máximo varíe desde 5% hasta 10%.

En este manual se ha clasificado a los métodos de aforo para: ríos y canales, tomas parcelarias, aplicación del agua en las parcelas, descargas de equipos de bombeo y sistemas de riego presurizados. Estos métodos pueden servir de apoyo a las brigadas de hidrometría y al personal de distribución de agua de los distritos de riego. Se incluye la descripción de cada método, con ejemplos de aplicación que orientan sobre su uso.

El objetivo general de este trabajo, es dar apoyo técnico al personal encargado de medir y distribuir el agua de riego, con el fin de avanzar en la modernización de los procedimientos de operación de las obras hidráulicas.

1 METODOS DE AFORO PARA RIOS Y CANALES

En los distritos de riego, se necesita medir los caudales para distribuir el agua. Frecuentemente se encuentran corrientes naturales, como son los ríos que aportan agua a las presas y los canales de derivación o tramos de río, que sirven para conducir el agua, desde las presas de almacenamiento hasta las presas derivadoras. Estos cauces naturales o artificiales operan con grandes gastos y tienen anchos que requieren puentes o el sistema cable canastilla, para realizar los trabajos de aforo.

Generalmente las brigadas de hidrometría realizan los aforos en la red mayor de los distritos de riego, usando los métodos del molinete, secciones calibradas y estructuras, tales como compuertas radiales y rectangulares.

1.1 Métodos de área y velocidad

Consiste en determinar el área de una sección transversal de la corriente y la velocidad del agua a través de ésta; la primera por medio de sondeos y la velocidad por cualquiera de los métodos que se describen posteriormente.

1.1.1 Velocidad media del agua en una corriente

En este inciso se proporcionan los antecedentes, respecto al origen de los coeficientes empleados en los aforos con molinete.

La velocidad del agua en los canales abiertos depende: de las características de la sección transversal, rozamiento, viscosidad, tensión superficial y alineación de la corriente. Las líneas de igual velocidad son aproximadamente paralelas al fondo y a los costados del canal. En la superficie se presenta una disminución ligera de la velocidad.

Con base en mediciones experimentales sobre la distribución de velocidades, que se presenta en una vertical de la corriente, se concluyeron las siguientes reglas prácticas (Manual de hidráulica king 1981).

- La velocidad máxima se presenta entre el 5% y el 25% de la profundidad del agua en el canal y el porcentaje aumenta con incrementos en la profundidad del canal. En corrientes poco profundas con lecho rugoso la velocidad máxima se presenta muy cerca de la superficie.

- La velocidad media en una vertical de un canal se presenta a 0.6 de la profundidad. Esto se cumplió con un error medio de 1% y un error máximo de 3%.
- La velocidad media en una vertical, es la media aritmética de las velocidades a 0.2 y 0.8 de la profundidad, respectivamente. Esto se cumplió con un error medio nulo (cero) y error máximo de 1%.
- La velocidad media en una vertical es del 85% al 95% de la velocidad de la superficie, siendo 90% el promedio de varios cientos de observaciones. La variación de este coeficiente es más irregular que los anteriores.
- La curva de variación vertical de la velocidad se aproxima una parábola de eje vertical, es decir aumenta de la superficie del agua hacia abajo, hasta llegar al punto de velocidad máxima y a partir de éste comienza a disminuir.

La determinación de la velocidad media del agua en una corriente puede hacerse por métodos directos o indirectos; los primeros se realizan empleando el molinete o el flotador; los segundos mediante el uso de fórmulas.

1.1.2 Area de la sección transversal de una corriente.

Para determinar el gasto en una sección se requiere conocer el área hidráulica de la sección transversal de la corriente. El método a emplear dependerá de las condiciones del cauce; en el caso de canales revestidos de mampostería o de concreto, las secciones están bien definidas y será fácil el cálculo del área hidráulica, en caso contrario se tendrá que determinar por medio de sondeo.

La sección transversal de una corriente está limitada en la parte superior por la superficie del agua, que es prácticamente horizontal, por las paredes del cauce que forman los lados y por el fondo. En canales naturales, la sección es una línea caprichosa con cierta tendencia a la forma de "U".

El área puede determinarse usando sondas, ya sean rígidas o flexibles. La separación de los sondeos dependerá del ancho de la corriente (cuadro 1).

Las sondas rígidas consisten en una varilla metálica o de madera graduada, del tamaño suficiente como para tocar el fondo del cauce, pudiendo medir con ella la profundidad en las secciones transversales; este tipo de sonda se emplea cuando la corriente lleva gastos pequeños o en canales de riego y regaderas.

La sonda flexible está compuesta de un escandallo, que es un cuerpo pesado, generalmente de plomo para no ser arrastrado por la corriente y de forma aerodinámica para no oponer resistencia, sujeto al extremo de una sondaleza que puede ser una cuerda, cable o cadena, similar al empleado para lastrar al molinete.

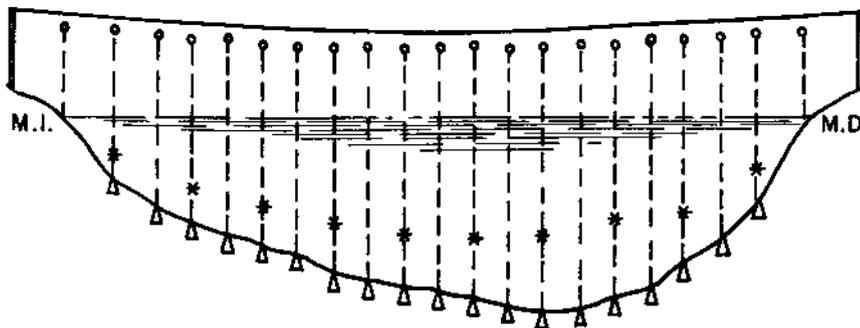
Cuadro 1. Separación de sondeo en función del ancho de la corriente

Ancho de la corriente (m)	Espaciamiento (m)
hasta 1.2	0.2 - 0.3
1.2 - 5	0.3 - 0.5
5 - 10	0.5 - 1.0
10 - 50	1.0 - 5.0
50 - 100	5.0 - 10.0
más de 100	10.0 - 20.0

El sondeo consiste en dejar que el escandallo llegue al fondo del cauce, si el técnico aforador está cerca de la superficie del agua, simplemente marcará la sondaleza tomándola con los dedos; de otra manera, deberá tomar la cuerda referida a un punto fijo una vez que el escandallo esté en el fondo e irá midiendo la longitud de cuerda que vaya sacando hasta que el escandallo esté sobre la superficie del agua.

En las secciones de aforo seleccionadas se puede instalar: un puente, un cable con canastilla o con una lancha; con la finalidad de dividir el ancho de la corriente en franjas, generalmente de igual anchura, que queden marcadas y sean la base para dividir la sección transversal de la corriente en áreas pequeñas (lámina 1), en las cuales se mide la velocidad media.

Lámina 1. División en franjas de la sección transversal de una corriente



Un método rápido para determinar el área hidráulica en regaderas de tierra pequeñas consiste en hacer un sondeo en el centro del canal, multiplicarlo por el ancho y por 0.667, esto equivale a considerar que la sección tiene forma de "U".

1.1.3 Aforo con molinete

Este método es muy conocido en los Distritos y las Unidades de Riego, aplicable a todo tipo de corrientes y se emplea como método patron para calibrar otros metodos de aforo.

El molinete consiste esencialmente de dos partes que son: una hélice de aspas o copas, que el agua en movimiento hace girar y un mecanismo que permite contar el número de vueltas que da la helice a intervalos de tiempo definido (lámina 2).

La relación velocidad-número de revoluciones, se determina en laboratorio, midiéndose el tiempo en segundos que tarda la hélice en dar cierto número de vueltas y para diferentes velocidades. Con estos valores se obtiene una ecuación y una tabla, de las cuales debe disponer cada molinete (cuadro 2).

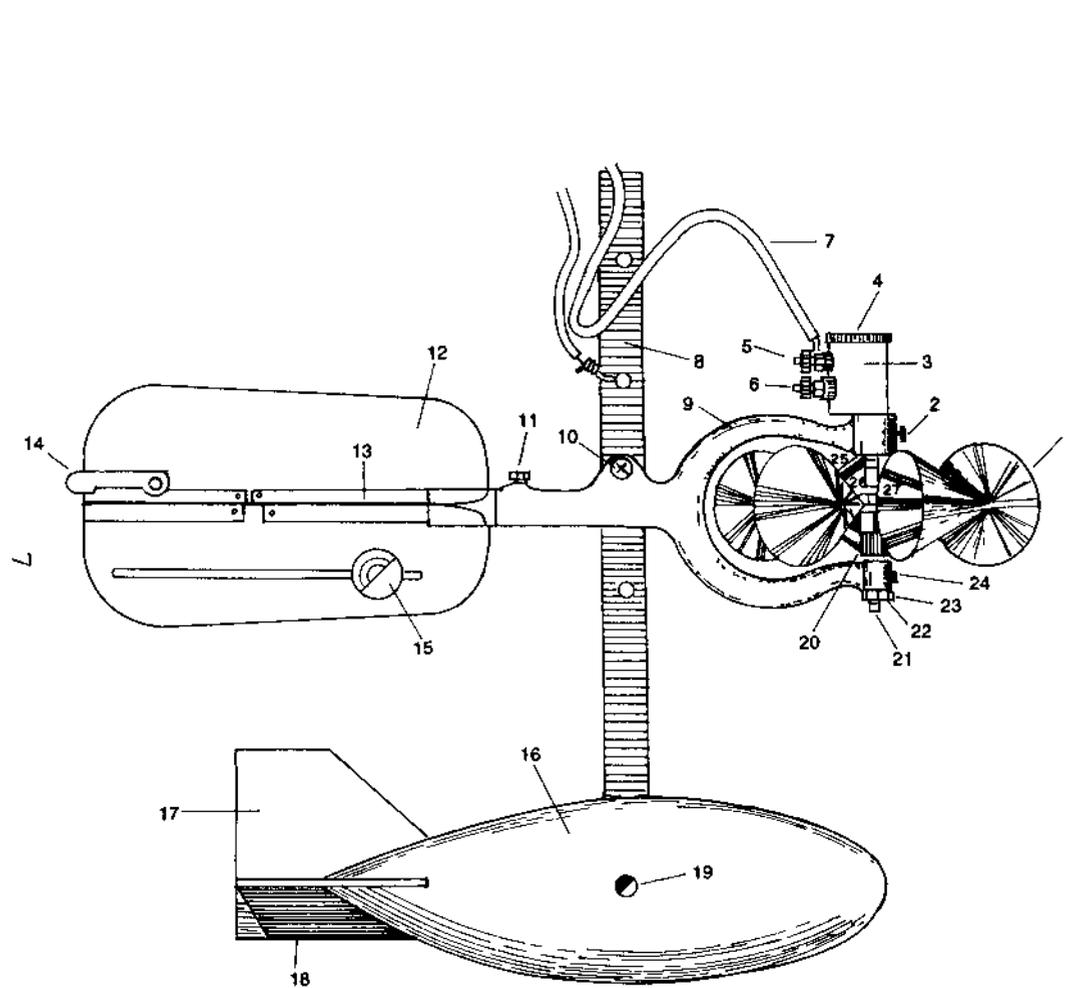
Los molinetes requieren mantenimiento, debido al desgaste y a golpes durante su uso, es por esto que cada molinete debe calibrarse por personal especializado, para obtener la nueva ecuación y tabla que le corresponde; si un molinete no se ha calibrado despues de mucho tiempo, sus mediciones serán erróneas.

Para obtener el gasto que pasa por la seccion transversal de la corriente, mediante el molinete; se acostumbra dividir la sección transversal en franjas verticales (lámina 1), debido a que la velocidad media en una corriente no es uniforme; para medir en cada franja el area (a_i) y la velocidad media (v_i). El producto de (a_i) y (v_i) en la franja, proporciona un gasto parcial (q_i) de la sección transversal. El gasto total se estima, sumando los gastos parciales obtenidos en cada franja, por medio de la expresión:

$$Q = \sum_{i=1}^n a_i v_i = \sum_{i=1}^n q_i \quad (1.1)$$

Donde:
Q =Gasto total (m^3/s)
 a_i =Area de la franja i (m^2)
 v_i =Velocidad media en la franja i (m/s)
 q_i =Gasto en la franja i.
 $i = 1, 2, 3, \dots, n$ franjas

Lámina 2. Molinete Gurley Tipo Price No. 622



- 1 - Rueda de copas
- 2 - Tornillo de ajuste
- 3 - Cámara de contactos
- 4 - Toca de la cámara de contactos
- 5 - Borne para el contacto simple (una revolución)
- 6 - Borne para el contacto penta (cinco revoluciones)
- 7 - Alambre conductor de corriente
- 8 - Solera de soporte
- 9 - Horquilla
- 10 - Tornillo de suspensión en solera
- 11 - Tornillo de conexión entre horquilla y cola
- 12 - Timón vertical
- 13 - Timón horizontal
- 14 - Broche de cierre para armar el timón
- 15 - Contrapeso corredizo.
- 16 - Escandallo (torpedo).
- 17 - Timón vertical del escandallo
- 18 - Timón vertical del escandallo
- 19 - Tornillo de suspensión del escandallo
- 20 - Tuerca para fijar la rueda de copas
- 21 - Pivote
- 22 - Tuerca para ajuste del pivote
- 23 - Tornillo opresor.
- 24 - Tornillo de ajuste
- 25 - Eje
- 26 - Soporte de la rueda de copas
- 27 - Tuerca del soporte.
- 28 - Tole del contacto simple
- 29 - Soporte del eje de la rueda de copas.
- 30 - Sinfin para el contacto penta
- 31 - Engrane del contacto penta
- 32 - Espiral del contacto penta
- 33 - Topes del contacto penta
- 34 - Espiral del contacto simple.
- 35 - Rosca de pasta aislante del contacto

Cuadro 2. Velocidades (m/s) para molinetes Gurley tipo Price No. 622¹

R T	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	150
40	0.353	0.438	0.523	0.609	0.694	0.779	0.865	1.036	1.206	1.377	1.548	1.718	2.527
41	0.344	0.428	0.511	0.594	0.677	0.761	0.844	1.011	1.177	1.344	1.510	1.677	2.509
42	0.336	0.418	0.499	0.580	0.662	0.743	0.824	0.987	1.149	1.312	1.474	1.637	2.450
43	0.329	0.408	0.488	0.567	0.646	0.726	0.805	0.964	1.123	1.282	1.440	1.599	2.393
44	0.322	0.399	0.477	0.554	0.632	0.710	0.787	0.942	1.093	1.253	1.403	1.563	2.339
45	0.315	0.391	0.467	0.542	0.618	0.694	0.770	0.922	1.073	1.225	1.377	1.529	2.287
46	0.308	0.382	0.457	0.531	0.605	0.679	0.753	0.902	1.050	1.199	1.347	1.496	2.238
47	0.302	0.375	0.447	0.520	0.592	0.665	0.738	0.883	1.028	1.173	1.319	1.464	2.190
48	0.296	0.367	0.438	0.509	0.580	0.651	0.723	0.865	1.007	1.149	1.292	1.434	2.145
49	0.290	0.360	0.429	0.499	0.569	0.638	0.708	0.847	0.987	1.126	1.265	1.405	2.101

Ecuación²: $V=0.68279 N + 0.011333$

Donde: N=Número de revoluciones por segundo ($N=R/T$).
V=Velocidad de la corriente (m/s).

¹Estas velocidades, se tomaron de la tabla correspondiente al molinete empleado para los aforos del ejemplo descrito (lámina 2).

²Deducida en el laboratorio de Tara-Molinetes, con esta ecuación se generó la tabla.

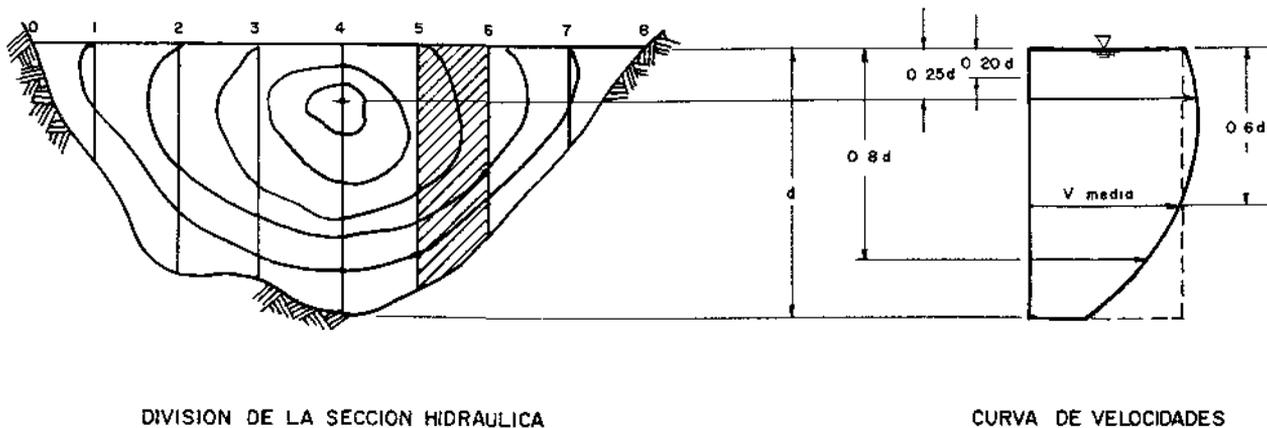
NOTA: los valores remarcados son los utilizados en el ejemplo desarrollado.

En corrientes cuyas velocidades varían desde 0.1 m/s hasta 2.5 m/s, la velocidad se puede obtener mediante el molinete, ligado a un escandallo; si la velocidad está por abajo de 0.1 m/s, disminuye la precisión del aparato, mientras que en velocidades arriba de 2.5 m/s, puede ser dañado por objetos que acarrea la corriente.

El método más sencillo para determinar la velocidad media en la franja, consiste en colocar el molinete a un 60% de la profundidad medida a partir de la superficie del agua en cada franja vertical, ya que a esta profundidad la velocidad es muy semejante a la velocidad media (lámina 3).

Otra forma más precisa para determinar la velocidad media, consiste en tomar lecturas a 20% y 80% del tirante a partir de la superficie libre del agua y promediar las velocidades a dichas profundidades (lámina 3).

Lámina 3. Variación de la velocidad en la sección transversal y en una vertical de la corriente



Si la velocidad del agua es mayor a 2.5 m/s, es preferible no hacer observaciones profundas, tanto por la dificultad de mantener el molinete en posición correcta, como por el peligro de que sufra desperfectos, ya que puede ser golpeado por diversos objetos. En este caso, basta con tomar lecturas a 0.15 m de profundidad y multiplicar el valor resultante por un factor de reducción de 0.9, este producto corresponde a la velocidad media.

Las mediciones de la velocidad del agua con molinete, se pueden realizar desde un puente (pasarela), una barca o un sistema de cable canastilla, donde se instala el operador (lámina 4).

Lámina 4. Torres de concreto para estaciones de aforo

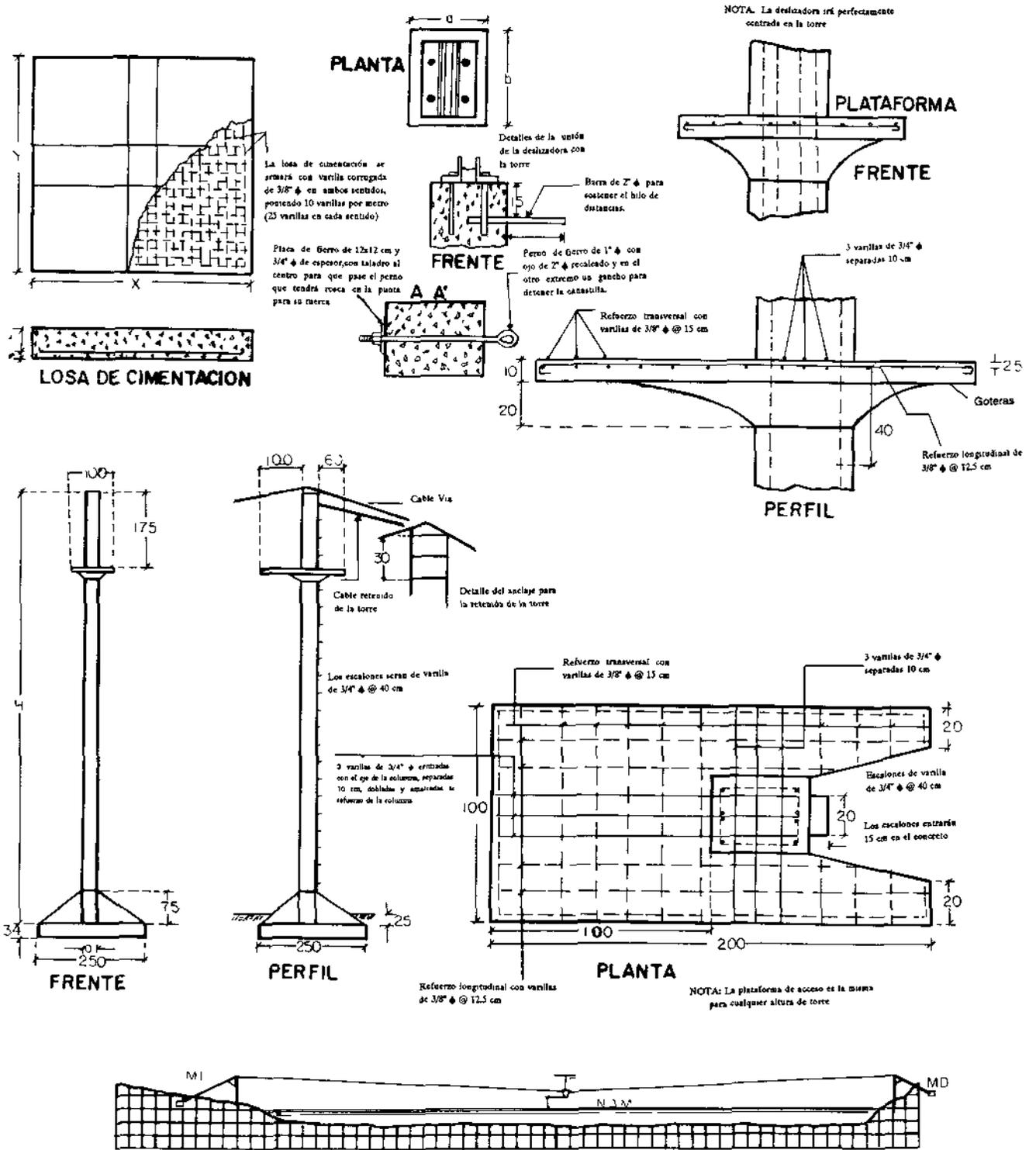
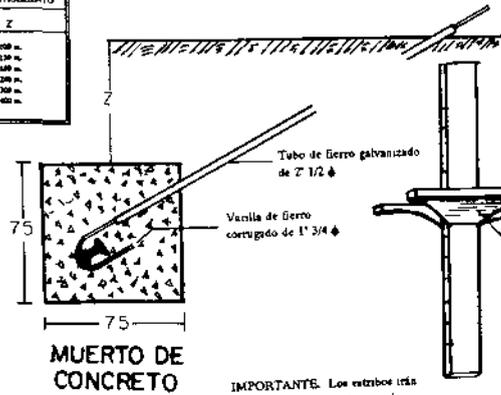


Lámina 4. Torres de concreto para estaciones de aforo (continuación)

Ø	A L T U R A									
	40'	45'	50'	55'	60'	65'	70'	75'	80'	85'
10"	47	50	53	56	59	62	65	68	71	74
12"	50	53	56	59	62	65	68	71	74	77
14"	53	56	59	62	65	68	71	74	77	80
16"	56	59	62	65	68	71	74	77	80	83

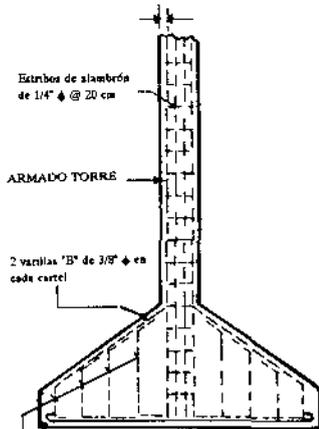
MUERTOS, PROFUNDIDAD DE ENTALACE	
CLASE	Z
10 m.	100 m.
150 m.	150 m.
150 m.	150 m.
200 m.	200 m.
300 m.	300 m.



Ø de 1 1/2 Ø mínimo, recalcado
DETALLE DEL TEMPLADOR

PERSPECTIVA DE LA PLATAFORMA

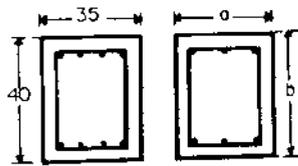
IMPORTANTE: Los estribos irán perfectamente amarrados a cada uno de las varillas del refuerzo de la torre con alambre recocido



FRETE

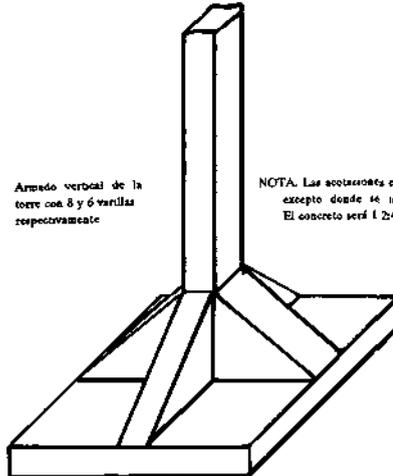
Detalle del armado de la torre

Varillas de 3/8 Ø para armar los cartels



DETALLE DE LOS ESTRIBOS

NOTAS: Todas las torres se calcularon con una carga superior a 10,000 kg, por lo cual se pueden instalar en claros hasta de 300 m.



PERSPECTIVA DE LA CIMENTACION

NOTA: Las acotaciones están en cm excepto donde se indica. El concreto será 1:2:4

T O R R E S					L O R A				M A T E R I A L		T O T A L E S		
H	A	B	C	R	R E F U E R Z O		X	Y	Z	A	B	P E R R O	C O N C R E T O
					Arms. en Ø	Núm. Varillas 7 Ø							
4.00	15	Ø	1	13.32	1 varilla de 10"	2.30	2.30	27	7	353	3.69	353	3.69
4.50	15	Ø	1	13.32	2 varillas de 10"	2.30	2.30	27	7	353	3.69	353	3.69
5.00	15	Ø	1	13.32	3 varillas de 10"	2.30	2.30	27	7	353	3.69	353	3.69
5.50	15	Ø	1	13.32	4 varillas de 10"	2.30	2.30	27	7	353	3.69	353	3.69
6.00	15	Ø	1	13.32	5 varillas de 10"	2.30	2.30	27	7	353	3.69	353	3.69
6.50	15	Ø	1	13.32	6 varillas de 10"	2.30	2.30	27	7	353	3.69	353	3.69
7.00	15	Ø	1	13.32	7 varillas de 10"	2.30	2.30	27	7	353	3.69	353	3.69
7.50	15	Ø	1	13.32	8 varillas de 10"	2.30	2.30	27	7	353	3.69	353	3.69
8.00	15	Ø	1	13.32	9 varillas de 10"	2.30	2.30	27	7	353	3.69	353	3.69
8.50	15	Ø	1	13.32	10 varillas de 10"	2.30	2.30	27	7	353	3.69	353	3.69
9.00	15	Ø	1	13.32	11 varillas de 10"	2.30	2.30	27	7	353	3.69	353	3.69
9.50	15	Ø	1	13.32	12 varillas de 10"	2.30	2.30	27	7	353	3.69	353	3.69
10.00	15	Ø	1	13.32	13 varillas de 10"	2.30	2.30	27	7	353	3.69	353	3.69
10.50	15	Ø	1	13.32	14 varillas de 10"	2.30	2.30	27	7	353	3.69	353	3.69
11.00	15	Ø	1	13.32	15 varillas de 10"	2.30	2.30	27	7	353	3.69	353	3.69

El sistema cable canastilla, permite hacer mediciones sobre un eje que generalmente es transversal a la corriente, en cauces mayores a 20 metros de ancho, consiste de un cable de acero tendido a una altura conveniente, por donde se desplaza la canastilla, desde allí, el personal de la estación toma las lecturas del molinete.

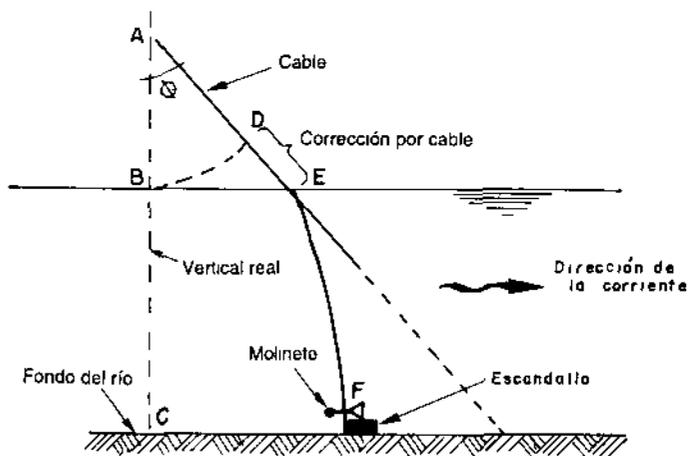
Debido al empuje de la corriente, el cable que sostiene el molinete, se desplaza un ángulo (ϕ) con respecto a la vertical (BC), presentando una curvatura (EF), ésta lectura se debe corregir para obtener la profundidad real de la corriente:

$$\overline{BC} = (1 - k) \overline{EF} \quad (1.2)$$

donde: BC=Profundidad real de la corriente (m).
 EF=Longitud del cable (m).
 K=Coficiente de corrección, esta en función del ángulo ϕ (lámina 5)

Lámina 5. Corrección por desviación de la vertical

ϕ	K
10	.0050
12	.0072
14	.0098
16	.0128
18	.0164
20	.0204
22	.0248
24	.0296
26	.0350
28	.0408
30	.0472
32	.0544
34	.0620
36	.0698



Ejemplo: Si la longitud del cable (EF) es 10m, y el ángulo con respecto a la vertical (ϕ) es 16° . Encontrar la vertical real (BC). Primero, localizar el valor del ángulo (ϕ) en la primer columna de la lámina 5; después desplazarse a la segunda columna en forma horizontal, para obtener el valor del coeficiente (0.0128). Reemplazando los datos en la ecuación 1.2, resulta:

$$BC = (1 - 0.0128) \times 10$$

$$BC=9.87 \text{ m (Profundidad real)}$$

Un ejemplo de medición del gasto, empleando molinete, se presenta en la hoja de "Registro de aforo con molinete" (lámina 6). En ésta se tiene 15 columnas y un número variable de líneas, que depende de la cantidad de lecturas realizadas en la sección transversal de la corriente.

La primer línea indica las características: distancia y profundidad³, de la orilla en que se inician las lecturas; orilla del agua margen derecha (O.A.M.D.) u orilla del agua margen izquierda (O.A.M.I).

La segunda línea proporciona las características: distancia, profundidad, velocidad, etcétera, de la vertical central, primera franja en la que se realiza el primer aforo con el molinete. La tercera línea corresponde al punto límite entre la primera y segunda franja; la cuarta línea es el punto medio de la 2a. franja, en que se realiza el 2o. aforo; las líneas subsecuentes siguen el mismo orden, una corresponde al límite y otra al aforo, así hasta llegar a la orilla contraria.

Respecto a las columnas; las dos primeras proporcionan información de los sondeos, límites de franja y profundidad de aforo.

Columna 1: distancia (m) del origen⁴ al punto límite o punto de aforo.

Columna 2: profundidad, considerada desde el nivel del agua hasta el fondo del cauce (m).

Desde la columna 3 hasta la 7 se proporciona información del molinete en los puntos de aforo.

Columna 3: método empleado, es decir la profundidad en décimos a que se realiza la medición de la velocidad: superficial (sup); seis décimos (6/10); dos y ocho décimos (2/10 y 8/10).

Columna 4: profundidad (m) a que se realiza la medición de la velocidad, resulta del producto de las columnas 2 y 3.

Columna 5: número de revoluciones (R), proporcionadas por el molinete.

³La profundidad de la orilla generalmente es nula, excepto los casos en que el cauce tenga pared vertical.

⁴Se considera origen el punto donde se inicia el puente o cable, pudiendo ser de cualquier orilla.

Lamina 6. Medicion del gasto de una corriente por medio de molinete

SONDEOS		MOLINETE					VELOCIDAD			SECCION			OBSERVACIONES RELATIVAS A VARIACIONES OBSTRUCCIONES Y DEBORDAMIENTOS EN EL CAUCE METODOS USADOS SI FUE HECHO EN SECCION DE VA DEDO, INDICAR POSICION CON RESPECTO A LA SECCION OFICIAL Y LA RELACION ENTRE LEC TURAS DE ESCALA	
INSTAN CIA DEL PUNTO INICIAL	PROFUN DIDAD	PROFUNDA D DE LA OBSERVACION		NUMERO DE REVOLU CIONES	TIEMPO EN SEGUN DOS	REVOLU CIONES POR SEGUNDO	EN EL PUNTO	COEFI CIENTE	MEDIA DEL TRAMO	ANCHURA	PROFUN DIDAD MEDIA	AREA		GASTO PARCIAL
#	#	METODO	#	#	#	#	m/s	#	m/s	m	m	m ²		m ³ /s
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		14
26.40	0.03	O	A	M	D									
28.20	0.40	Sup	Sup	30	40		0.523	0.90	0.471	3.60	0.330	1.206	0.968	
30.00	0.51													
33.00	0.72	6/10	0.43	40	41		0.677		0.677	6.00	0.723	4.335	2.900	
36.00	0.94													
39.00	1.06	6/10	0.64	50	42		0.524		0.824	6.00	1.048	6.285	5.179	
42.00	1.13													
45.00	1.24	6/10	0.74	70	46		1.050		1.050	6.00	1.248	7.485	7.859	
48.00	1.38													
51.00	1.55	6/10	0.93	80	40		1.377		1.377	6.00	1.530	9.180	12.641	
54.00	1.64													
57.00	1.73	6/10	1.04	100	40		1.718		1.718	6.00	1.710	10.260	17.627	
60.00	1.74													
63.00	1.76	6/10	1.06	100	42		1.637		1.637	6.00	1.765	10.590	17.336	
66.00	1.80													
69.00	1.83	6/10	1.10	90	42		1.474		1.474	6.00	1.835	11.010	16.229	
72.00	1.88													
75.00	2.00	6/10	1.20	90	44		1.403		1.403	6.00	1.913	11.835	16.605	
78.00	2.01													
81.00	2.07	6/10	1.24	80	43		1.282		1.282	6.00	2.045	12.330	15.807	
84.00	2.07													
87.00	1.92	6/10	1.15	70	44		1.093		1.093	6.00	1.948	11.685	12.712	
90.00	1.88													
93.00	1.72	6/10	1.03	60	44		0.942		0.942	6.00	1.745	10.470	9.863	
96.00	1.66													
99.00	1.63	6/10	0.98	60	43		0.964		0.964	6.00	1.618	9.705	9.356	
102.00	1.55													
105.00	1.45	6/10	0.87	60	43		0.964		0.964	6.00	1.433	8.595	8.286	
108.00	1.28													
111.00	1.15	6/10	0.69	40	41		0.677		0.677	6.00	1.160	6.96	4.712	NP10
114.00	1.06													480
												131.931 m ²	157.775 m ³ /s	CALCULO
														REVISO

SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS SERVICIO HIDROMETRICO	FECHA -----	AFORO NUMERO -----
	MOLINETE -----	MARCA TIPO Y NUMERO -----
	NUMERO DE LA TABLA DE VELOCIDADES USADA -----	PROMEDIO LECT. ESC -----
	OBSERVADOR -----	AREA TOTAL ----- m ²
PRINCIPIO ----- h ----- m. LECT. ESC -----	VELOCIDAD MEDIA ----- m/s	
TERMINO ----- h ----- m. LECT. ESC -----	GASTO TOTAL ----- m ³ /s	

Columna 6: tiempo (T), en segundos, que duró la observación.

Columna 7: número de revoluciones por segundo (N), resulta de dividir la columna 5 por la 6 ($N=R/T$). Se obtiene únicamente cuando no se dispone de la tabla, pero sí de la ecuación.

Desde la columna 8 hasta la 10, se tiene información de la velocidad media.

Columna 8: velocidad en el punto (m/s); si el método es el superficial o el de 6/10, se tendrá una sola medición; pero si es el de 2/10 y 8/10, se tendrán dos mediciones. Esta velocidad se obtiene entrando con los valores de R y T, columnas 5 y 6, en la tabla que le corresponde **únicamente al molinete empleado**. Para el ejemplo descrito (lámina 6) la velocidad ⁵ se ha obtenido del cuadro 2.

Columna 9: en esta columna se anota el coeficiente, generalmente se considera de 0.9, se emplea únicamente en caso de que la profundidad, de medición de la velocidad, haya sido superficial.

Columna 10: proporciona la velocidad media en la franja (m/s), se obtiene según el método empleado para determinar la velocidad; si el método es de 6/10 la velocidad es la misma que en la columna 8; si es el superficial, la velocidad se obtiene del producto de las columnas 8 y 9; si es el método 2/10 y 8/10 la velocidad media, se obtiene promediando las dos velocidades que se tienen en la columna 8 para la misma vertical.

Desde la columna 11 hasta la 14 se tiene información respecto a la franja vertical.

Columna 11: anchura de la franja (m), se obtiene restando al límite final el inicial, los cuales se encuentran en la columna uno, antes

⁵Cuando no se dispone de la tabla, pero sí de la ecuación del molinete, se puede obtener la velocidad, mediante esta última. Considerando $R=30$ y $T=40$, del primer aforo:

$$N = \frac{R}{T} = \frac{30}{40} = 0.75$$

La velocidad se obtiene sustituyendo N en la ecuación que le corresponde al molinete (cuadro 2).

$$V = 0.68279 (0.75) + 0.011333 = 0.523 \text{ m/s}$$

Que es igual a la obtenida de la tabla.

y después, de la distancia al origen, correspondiente al aforo.

Columna 12: profundidad media⁶ en la franja, se obtiene mediante la expresión:

$$Pm = \frac{a + 2b + c}{4}$$

Donde: Pm=Profundidad media en la franja (m).
a=Profundidad límite inferior (m).
b=Profundidad de la vertical sobre la que se realiza el aforo (m).
c=Profundidad límite superior (m).

Columna 13: área de la franja (m²), resulta del producto de las columnas 11 y 12.

Columna 14: gasto parcial (m³/s) o gasto que pasa a través de la franja considerada, se obtiene multiplicando las columnas 10 y 13.

Finalmente, el área de la sección transversal se obtiene sumando los valores de la columna 13 y el gasto total a través de esta sección, sumando la columna 14, en el ejemplo el área (A) es 131.931 m² y el gasto (Q) 157.775 m³/s (lámina 6).

1.1.4 Aforo con flotador

Los flotadores son cuerpos u objetos más ligeros que el agua y que conducidos en suspensión por la corriente, adquieren una velocidad similar a la superficial. Pueden ser: un trozo de madera, una pelota de esponja, etc; estos cuerpos no deben ser muy ligeros, pues la velocidad del viento afecta su recorrido, esto ocurre principalmente en los flotadores superficiales, por lo que es preferible el uso de los flotadores semisumergidos, que son los que van ligeramente abajo de la superficie del agua.

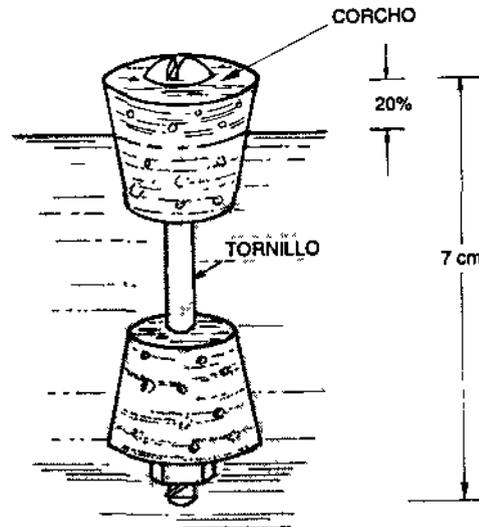
En este método se utiliza un flotador, reloj (cronómetro), cinta métrica y regla graduada para medir las distancias y áreas hidráulicas.

En algunos sistemas de riego, se han utilizado con éxito flotadores hechos con dos corchos lastrados con un tornillo (lámina 7). Se le agrega un peso para que no flote totalmente. El tamaño de este flotador varía de 7 a 10 cm y se lastra de manera que sólo

⁶Para mayor información, consultar Instructivo para Aforo de Corrientes SRH 1964.

sobresalga del orden de un 20%. Para hacerlos más visibles se les pinta de color naranja o amarillo, debido a la cintura que se forma entre los corchos, se rescatan con facilidad.

Lámina 7. Flotador semisumergido de corcho lastrado



Para estimar la velocidad, se elige un tramo del cauce, para el recorrido de los flotadores, instalando postes, balizas o escalas para limitar el tramo, referidas a un mismo punto de comparación, con el fin de que si se desea conocer la pendiente se haga con facilidad. Las marcas sirven para definir las secciones de inicio y final del tramo, cuya longitud conviene que sea un número cerrado: 5, 10, 15, 20, 30 metros, para facilidad de cálculo. Instaladas las marcas, se arroja el flotador, al menos tres metros, aguas arriba de la marca inicial, para que adquiera la velocidad de la corriente antes de llegar a ésta; en el momento de pasar por la marca inicial se comienza a contar el tiempo que tarda en llegar a la marca colocada al final del tramo.

La velocidad se estima dividiendo la distancia del tramo entre el tiempo que tarda el flotador en recorrerla. Este valor tiene que corregirse por un factor de reducción, ya que en observaciones realizadas se indica que la velocidad media fluctúa desde 85% hasta 95% de la velocidad superficial, aceptándose el promedio 90%. El área de la sección transversal de la corriente, se determina por sondeos, según lo descrito anteriormente.

Finalmente, el gasto se obtiene mediante:

$$Q = 0.9 A V \quad (1.3)$$

en la que: Q =Gasto (m^3/s)
 A =Area de sección transversal (m^2)
 V =Velocidad en el tramo (m/s)
 0.9 =Factor de reducción

Una ventaja de este método es la forma práctica y sencilla de su aplicación, además de que no requiere construcción de estructuras especiales, su costo es bajo y la aproximación de las mediciones es buena. En corrientes turbulentas no se obtienen buenos resultados debido a los cambios bruscos que ocurren en este tipo de escurrimiento.

Ejemplo: se tiene un canal de sección trapezoidal con las características geométricas indicadas. Determinar el gasto.

Plantilla	$b = 1.00 \text{ m}$
Espejo del agua	$B = 1.90 \text{ m}$
Tirante	$d = 0.65 \text{ m}$
Distancia	$L = 10 \text{ m}$
Tiempo	$T = 14.5 \text{ s}$

Procedimiento: se toma un tramo del canal lo más recto posible y se mide con una cinta métrica una distancia de 10 m, luego con un reloj o cronómetro se toma el tiempo que tarda el corcho o flotador en recorrer la distancia antes medida. El área se obtiene multiplicando el tirante (d) por el promedio de las bases $A=(B+b)/2$. La velocidad se obtiene dividiendo la longitud entre el tiempo ($V=L/T$). Sustituyendo A y V en ecuación 1.3 se encuentra el gasto (Q).

a) Area de la sección trapezoidal:

$$A = \left[\frac{B + b}{2} \right] d$$

$$A = \left[\frac{1.9 + 1.0}{2} \right] 0.65$$

$$A = [1.45] 0.65$$

$$A = 0.9425 \text{ m}^2$$

b) Velocidad del flujo:

$$V = \frac{d}{t} = \frac{10}{14.5}$$

$$V = 0.6897 \text{ m/s}$$

c) Gasto que pasa por el canal:

$$Q = 0.9 A V = 0.9 \times 0.9425 \times 0.6897$$

$$Q = 0.585 \text{ m}^3/\text{s} = 585 \text{ lps}$$

1.2 Método de relación escala-gasto

Este método consiste en seleccionar un tramo de río o canal en el cual permanecen constantes sus características hidráulicas; no debe cambiar el área transversal de la sección para un mismo gasto; ni variar los niveles por abrir y cerrar compuertas aguas abajo. Seleccionado el tramo se realizan aforos con molinete calibrado y personal especializado, determinando para cada aforo el tirante o profundidad del agua y el gasto total de la corriente. Los aforos deben realizarse en el rango de gastos de operación del río o del canal y en cantidad suficiente para minimizar el error del muestreo. En la práctica es difícil cambiar los gastos cuando se entrega agua a usuarios, por lo que deben efectuarse al iniciar el ciclo de riego y en el momento de llenar la red de canales.

Con los resultados de los aforos, se grafican los valores de elevación (eje vertical) Vs. gasto (eje horizontal) y mediante regresión puede obtenerse la curva ajustada, como la que se muestra⁷ posteriormente.

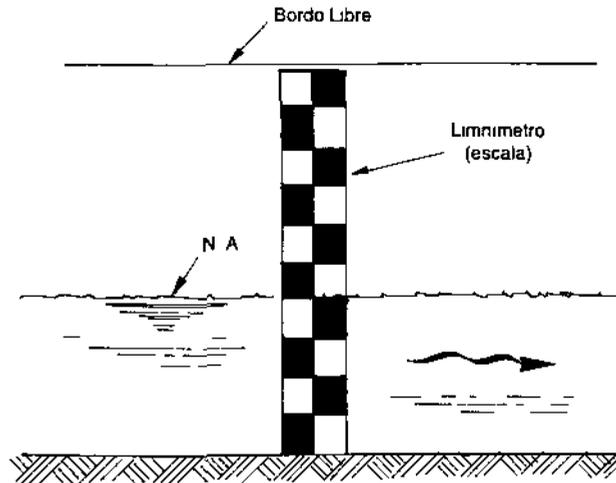
1.2.1 Aforo con limnómetro

El limnómetro (lámina 8) consiste de una escala graduada, pintada en madera, concreto o metal; se instala verticalmente en el fondo del río y se debe ubicar en un lugar bien visible, de manera que se obtienen las lecturas desde un puente u orilla; esta lectura proporciona la profundidad o tirante del agua. Este sistema permite obtener gasto instantáneo. Cuando se trata de canales revestidos, las escalas se pintan sobre las paredes de los taludes.

⁷Ver lámina 10 (inciso 1.2.3) donde se muestra la curva ajustada de una corriente.

Este método tiene problemas cuando hay efectos de oleaje y de variaciones del nivel del agua por turbulencias originadas por la rugosidad o la geometría del canal, entonces debe interpretarse una lectura media.

Lámina 8. Limnómetro

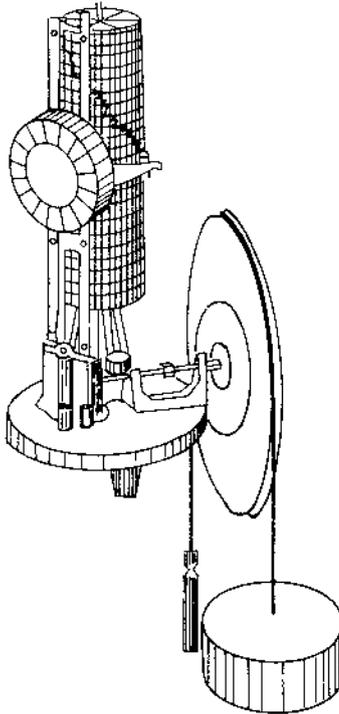


1.2.2 Aforo con limnógrafo

Los limnómetros automáticos o limnógrafos, tienen un flotador que se coloca sobre la superficie del agua, el cual está ligado a una aguja que marca sobre el papel de registro las variaciones de los niveles de agua que le transmite dicho flotador. El papel está montado sobre un cilindro, provisto de un sistema de relojería que le permite desplazarse de izquierda a derecha, obteniéndose registros de cambios de elevación de la superficie del agua contra el tiempo (lámina 9).

El limnógrafo se instala dentro de una caseta junto a la corriente para lo cual se construye un pozo con un tubo que se conecta con el canal o una zanja en la orilla del canal por aforar. Esto evita que el oleaje o la turbulencia del agua esté haciendo variar fuertemente el flotador del sistema y permita lecturas más estables.

Lámina 9. Limnigrafo



1.2.3 Obtención de la relación escala-gasto.

La relación escala-gasto, de la sección transversal de una corriente, se puede obtener cuando se tenga un canal con flujo uniforme, o bien, no exista efecto de remanso en dicho canal.

Para obtener ésta relación se selecciona un tramo más o menos recto y se hacen una serie de aforos, ya sea con molinete u otro método; para cada aforo se mide la escala o tirante en el canal. Con los pares de datos escala-gasto se obtiene una ecuación empírica del tipo:

$$Q = \beta_0 h^{\beta_1} \quad (1.4)$$

Donde los parámetros β_0 y β_1 pueden obtenerse mediante el método de regresión lineal, al considerar la siguiente transformación logarítmica, de la ecuación anterior:

$$\ln [Q] = \ln [\beta_0] + \beta_1 \ln [h] \quad (1.5)$$

En el cuadro 3 se presenta un ejemplo en el que se ilustra el método de regresión, mediante el cual se obtienen los parámetros de la ecuación empírica. Los aforos se realizaron en el río Suchiapa.

Cuadro 3. Ajuste de relación escala-gasto, mediante regresión

ESCALA h (m)	GASTO Q (m ³ /s)	Ln (h)	Ln (Q)
1,00	1,085	0,00000	0,08158
1,02	1,368	0,01980	0,31335
1,02	1,496	0,01980	0,40279
1,00	1,565	0,00000	0,44789
1,05	1,880	0,04879	0,63127
1,07	2,029	0,06766	0,70754
1,05	2,110	0,04879	0,74669
1,06	2,263	0,05827	0,81669
1,05	2,339	0,04879	0,84972
1,09	3,071	0,08618	1,12200
1,12	3,803	0,11333	1,33579
1,13	5,011	0,12222	1,61164
1,16	5,412	0,14842	1,68862
1,18	5,978	0,16551	1,78809
1,19	6,230	0,17395	1,82938
1,22	8,000	0,19885	2,07944
1,26	8,776	0,23111	2,17202
1,24	10,570	0,21511	2,35802
1,29	11,000	0,25464	2,39790
1,28	11,124	0,24686	2,40910
1,32	13,789	0,27763	2,62387
1,34	13,979	0,29267	2,63756
1,38	17,088	0,32208	2,83838
1,44	17,911	0,36464	2,88542
1,42	18,026	0,35066	2,89182
1,46	19,310	0,37844	2,96062
1,46	19,391	0,37844	2,96481

Resultado de la regresión:

Constante	Ln [β_0]=0,408629	$\beta_0=1.50475$
Desv. Est. error de Q est.		0,18517
R cuadrada		0,96377
No. de observaciones		27
Grados de libertad		25
Coefficiente de (h)		$\beta_1=7,459881$
Desv. Estándar del coef.		0,289272

Sustituyendo β_0 y β_1 , obtenidos mediante la regresión, en la ecuación 1.4; se obtiene la ecuación empírica, válida únicamente para la corriente y en sección de aforos considerada; en la que el gasto (Q) está en función del tirante (h).

$$Q = 1.50475 h^{7.459881} \quad (1.6)$$

Donde: $Q =$ Gasto (m^3/s)
 $h =$ Carga hidráulica o tirante (m)

Graficando esta ecuación, resulta la curva ajustada escala-gasto (lámina 10), para la sección de aforos del río; conocida esta curva, es suficiente con determinar la elevación o tirante (h), para conocer el gasto en cualquier momento.

Se debe tomar en cuenta que la curva ajustada (lámina 10) únicamente es válida para la sección y en el rango de aforos considerado; es decir, los gastos que se determinen mediante ésta curva son confiables para tirantes desde 1.0 m hasta 1.46 m; que corresponden a gastos desde 1.085 m^3/s hasta 19.391 m^3/s , respectivamente, fuera de estos rangos el gasto es erróneo.

Ejemplo: obtener el gasto para un tirante de 1.25m, en la sección de aforo.

Mediante la curva (lámina 10); con la carga de 1.25 m se ingresa en el eje vertical, desde este punto se traza una línea horizontal hasta la intersección con la curva y a partir de este punto se traza una vertical hasta la intersección con el eje horizontal que contiene los valores del gasto, obteniéndose un gasto de 8 m^3/s

Considerando la ecuación 1.6, se sustituye el mismo tirante en ésta y resulta:

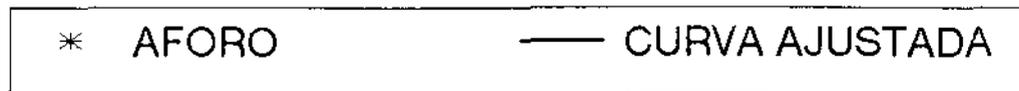
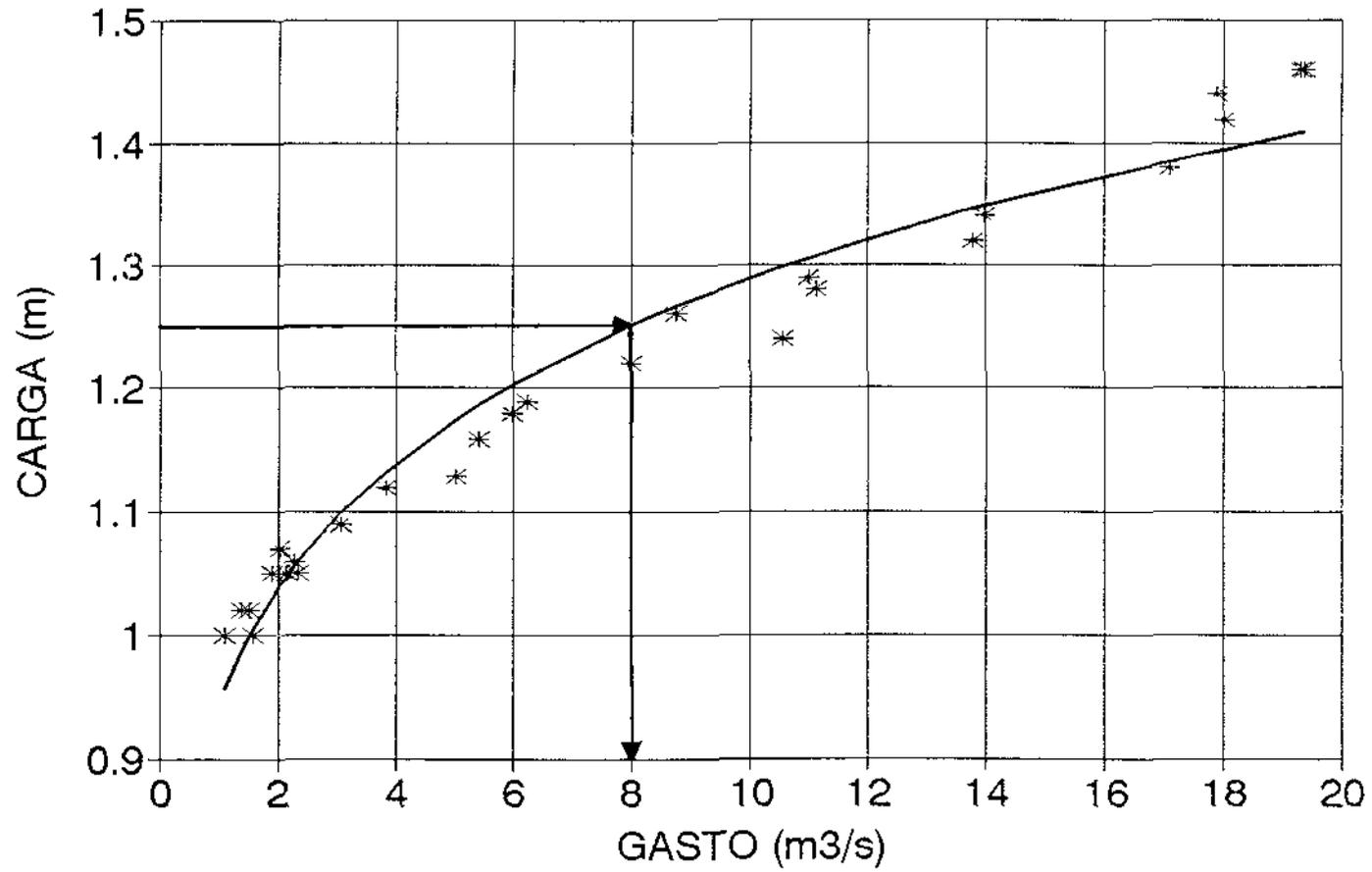
$$Q = 1.50475 (1.25)^{7.459881} = 7.951 m^3/s$$

1.3 Métodos de compuertas

En los Distritos de Riego se utilizan compuertas deslizantes, radiales y rectangulares para el manejo y control de los gastos en los canales principales. Las compuertas permiten el paso del agua al levantarse, funcionando como orificios que pueden operar con descarga libre en algunos casos y en otros con descarga ahogada.

Lamina 10. Curva escala-gasto ajustada

24



Para que una compuerta, radial o rectangular sea utilizada como estructura aforadora debe localizarse de preferencia antes de caídas o rápidas, con la finalidad de que descargue libremente; sin embargo, si hay remanso de manera constante, se puede calibrar funcionando como orificio ahogado.

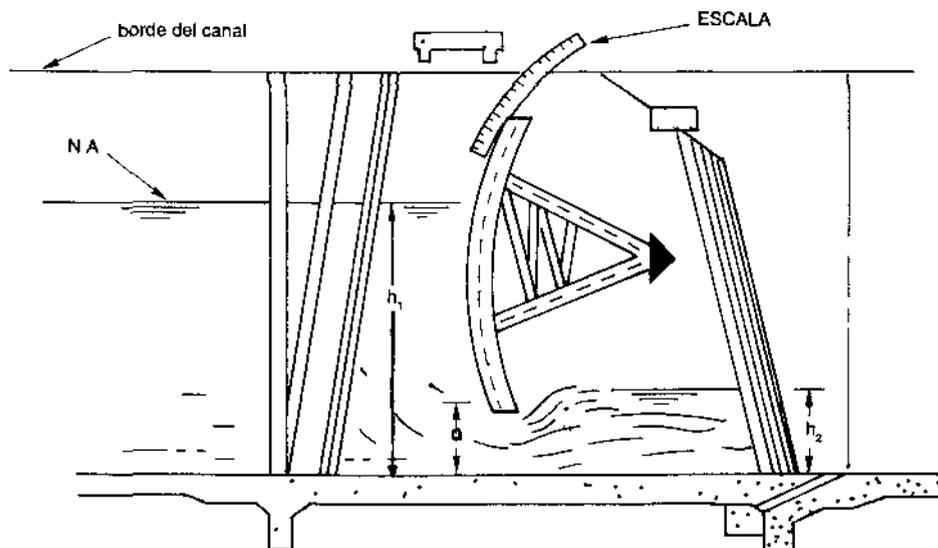
Debido a las diferencias en la construcción de las compuertas, es necesario realizar la calibración en campo de cada una, para que puedan funcionar como estructuras aforadoras y así obtener la curva, tabla y ecuación, que relacionan la carga con el gasto.

Cuando varias compuertas tienen condiciones similares de operación y características geométricas iguales, se puede calibrar una para obtener sus coeficientes de descarga. Con un trabajo detallado de aforos, para cada condición de trabajo de descarga libre o ahogada, se pueden obtener los coeficientes de descarga y verificar su uso en las otras compuertas mediante aforos. Cuando esto es posible, se reduce mucho el trabajo de calibración.

1.3.1 Compuertas radiales

Estas estructuras se utilizan para controlar el flujo de agua en canales principales y laterales. Su aforo se realiza con base en el principio de que todas las compuertas tienen la misma relación de altura del punto de apoyo de los brazos con respecto a su radio y trabajan en las mismas condiciones; por lo que se considera que pasa el mismo gasto por metro lineal de compuerta (lámina 11).

Lámina 11. Compuerta radial

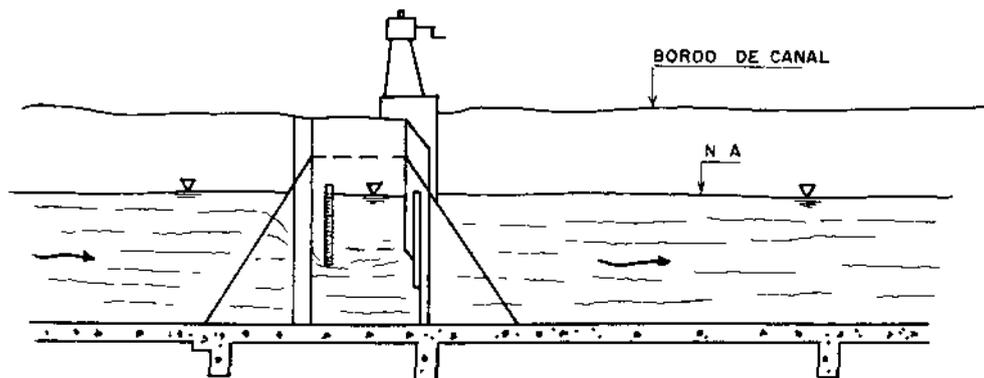


Cuando la carga hidráulica es grande, el empuje que genera en las compuertas rectangulares es difícil de vencer, entonces se requiere que el apoyo se realice en otros puntos. Por esto se utilizan las compuertas radiales, en las que los puntos de apoyo cargan con el empuje del agua y con el peso de la compuerta; la fuerza necesaria para abrir las compuertas debe ser equivalente a la componente del peso más la acción generada por el movimiento de abertura y un excedente para vencer el sistema de fuerzas.

1.3.2 Compuertas rectangulares

Estas compuertas se usan para controlar el flujo de agua en canales principales, laterales, sublaterales, ramales y subramales, donde los claros no son grandes y el tirante hidráulico es relativamente pequeño, de tal forma que la presión sobre la compuerta es aceptable para los mecanismos normales de apertura, tales como volantes con vastago roscado (lámina 12).

Lámina 12. Compuerta rectangular



1.3.3 Calibración de compuertas radiales y rectangulares.

La calibración de la compuerta la debe realizar, de preferencia, un experto y además se requiere:

- Conocer la operación mecánica de la compuerta.
- Manejar el método de aforo con molinete.
- Tener molinete verificado electromecánicamente y calibrado hidráulicamente (contar con la ecuación actual del molinete, es inaceptable usar ecuaciones de fábrica o de bibliografía).

- Tener la brigada de apoyo para realizar las aperturas y cierres necesarios en las compuertas.
- Contar con una sección apropiada para realizar los aforos con molinete.
- Contar con una cinta métrica, balizas, nivel fijo, estatal y materiales para registros de datos.

Con todo lo anterior, se procede a medir la compuerta para verificar las dimensiones que deben aparecer en los planos correspondientes. Luego se realizan aforos variando el gasto de menor a mayor cuando se están llenando los canales o de mayor a menor cuando se están vaciando y midiendo cuidadosamente la carga de operación; esta carga depende del tipo de descarga de la compuerta. Cuando descarga libre, la carga se considera aguas arriba de la compuerta; pero si descarga ahogada, se considera como la diferencia de tirantes aguas arriba y aguas abajo.

Con el nivel fijo y estatal, en el caso de que la corriente lo permita, se verifican las escalas existentes o se toman las cargas, definiendo el cero como el piso de la compuerta. Posteriormente se hace una tabla de aforos con las cargas, aberturas y gastos para analizarlos. Existen varios métodos para analizar la información de los aforos, entre los que destacan el gráfico y el matemático; además cuentan con la ayuda de programas y paquetes de cómputo.

a) Proceso matemático

La experiencia ha mostrado que la expresión⁸ que proporciona el gasto en orificios:

$$Q = C A \sqrt{2 g h} \quad (1.7)$$

En la que el gasto (Q) depende del coeficiente de descarga (C); área (A) y carga sobre el orificio (h); puede ser representada mediante la función empírica del tipo:

$$Q = \beta_0 a^{\beta_1} h^{\beta_2} \quad (1.8)$$

Que es más fácil de evaluar porque no se requiere el valor del coeficiente de descarga (C). En esta función el gasto (Q) depende de la carga hidráulica (h) aguas arriba y de la abertura (a) de la compuerta y además β_0 , β_1 y β_2 son sus parámetros.

⁸Ver Subcapítulo 2.2

Para obtener los parámetros se puede emplear, así como en el inciso 1.2.3, el método de regresión lineal; pero en este caso, mediante la siguiente transformación logarítmica:

$$\ln Q = \ln \beta_0 + \beta_1 \ln [a] + \beta_2 \ln [h] \quad (1.9)$$

a.1) Compuerta radial

El cuadro 4 muestra un ejemplo de calibración de una compuerta radial, mediante el método de regresión; con las características geométricas siguientes: ancho=6.00 m; radio=3.31 m; altura de apoyo=2.11 m.

Cuadro 4. Calibración de una compuerta radial, mediante regresión

ABERTURA (m)	CARGA h (m)	GASTO Q (m ³ /s)	Ln (a)	Ln (h)	Ln (Q)
0,14	2,00	3,730	-1,9661	0,6931	1,3164
0,15	2,12	4,557	-1,8971	0,7514	1,5167
0,19	2,51	5,490	-1,6607	0,9203	1,7029
0,32	2,18	8,529	-1,1394	0,7793	2,1435
0,33	2,50	9,094	-1,1087	0,9163	2,2076
0,38	2,52	10,799	-0,9676	0,9243	2,3795
0,72	1,15	11,090	-0,3285	0,1398	2,4060
0,39	2,49	11,343	-0,9416	0,9123	2,4286
0,48	2,49	12,369	-0,7340	0,9123	2,5152
0,52	2,27	13,915	-0,6539	0,8198	2,6330
0,55	2,45	14,580	-0,5978	0,8961	2,6797
0,69	2,26	15,711	-0,3711	0,8154	2,7544
0,70	2,55	18,756	-0,3567	0,9361	2,9315
0,71	2,54	19,015	-0,3425	0,9322	2,9452
0,87	2,18	19,930	-0,1393	0,7793	2,9922
0,88	2,21	20,831	-0,1278	0,7930	3,0364
1,02	2,24	22,924	0,0198	0,8065	3,1322
1,04	2,36	24,239	0,0392	0,8587	3,1880
1,17	2,17	25,296	0,1570	0,7747	3,2306
1,28	2,22	27,214	0,2469	0,7975	3,3037

Resultado de la regresión:

Constante: $\ln [\beta_0]=2,599589$ $\beta_0=13.4582$
 Desv. Est. del error de (Q) est: 0,039702
 R cuadrada: 0,995694
 Número de Observaciones: 20
 Grados de libertad: 17
 Coeficientes de (a) y (h): $\beta_1=0,8634$ $\beta_2=0,6538$
 Desv. Est. error de coeficientes 0,013879 0,052826

Sustituyendo estos valores de β_0 , β_1 y β_2 , en la ecuación (1.8), se obtiene la ecuación válida únicamente para la compuerta radial considerada:

$$Q = 13.4582 a^{0.8634} h^{0.6538} \quad (1.10)$$

Donde: Q =Gasto (m^3/s)
 a =abertura (m)
 h =carga aguas arriba (m)

Con la ecuación anterior, se puede obtener una curva carga-gasto, considerando una abertura (a_1) de la compuerta; para una segunda abertura (a_2) resulta otra curva carga-gasto. Entonces, para cada abertura (a) de la compuerta, se tiene una curva carga-gasto; es decir, mediante la ecuación 1.10 se puede⁹ generar una familia de curvas carga-gasto, en la que el número de curvas depende de la cantidad de aberturas consideradas.

En la lámina 13 se tiene una familia de curvas carga-gasto, obtenidas mediante la ecuación 1.10, considerando diferentes aberturas de la compuerta radial, estas curvas son válidas únicamente para la compuerta considerada y en el rango de aforos considerado.

Para obtener el gasto (Q), en condiciones diferentes de abertura (a) y carga (h) a las del ejemplo anterior, se debe realizar otra serie de aforos para el rango requerido y obtener así la función correspondiente. No se debe prolongar alguna curva con el fin de ampliar su rango de funcionamiento, ya que los gastos así obtenidos no son confiables.

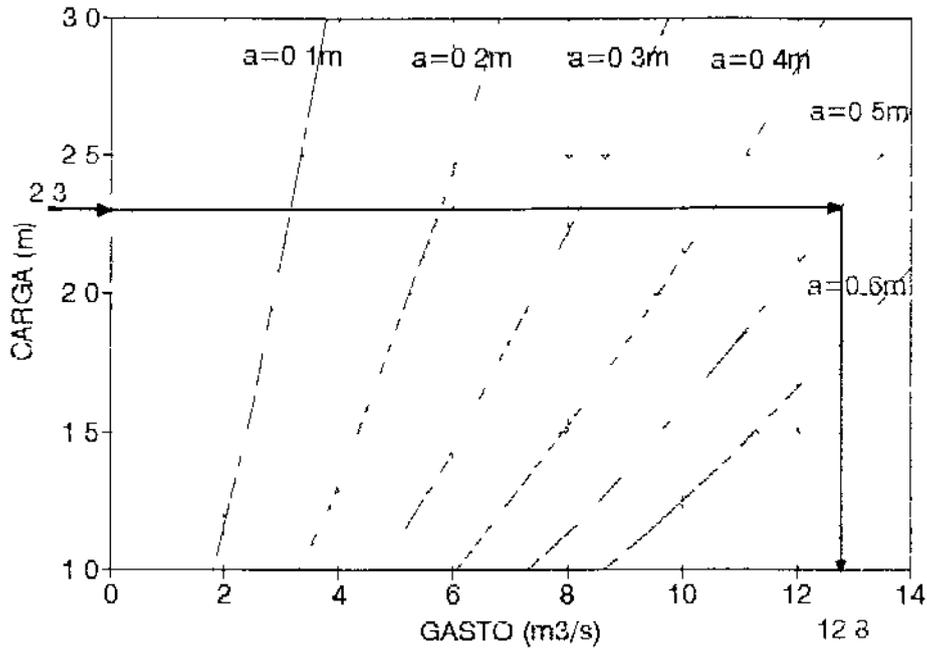
Ejemplo: obtener el gasto que pasa a través de la compuerta radial descrita; si la carga es de 2.3 m y la abertura 0.5 m.

Considerando la abertura de la compuerta, se selecciona la gráfica correspondiente en la lámina 13 (por ser abertura menor de 0.7 m, 13a). En la gráfica seleccionada se ingresa con la carga de 2.3 m, desde este punto se traza una línea horizontal hasta la intersección con la curva (para $a=0.5m$) y a partir de este punto se traza una vertical hasta la intersección con el eje horizontal que contiene los valores del gasto, obteniéndose un gasto de $12.8 m^3/s$.

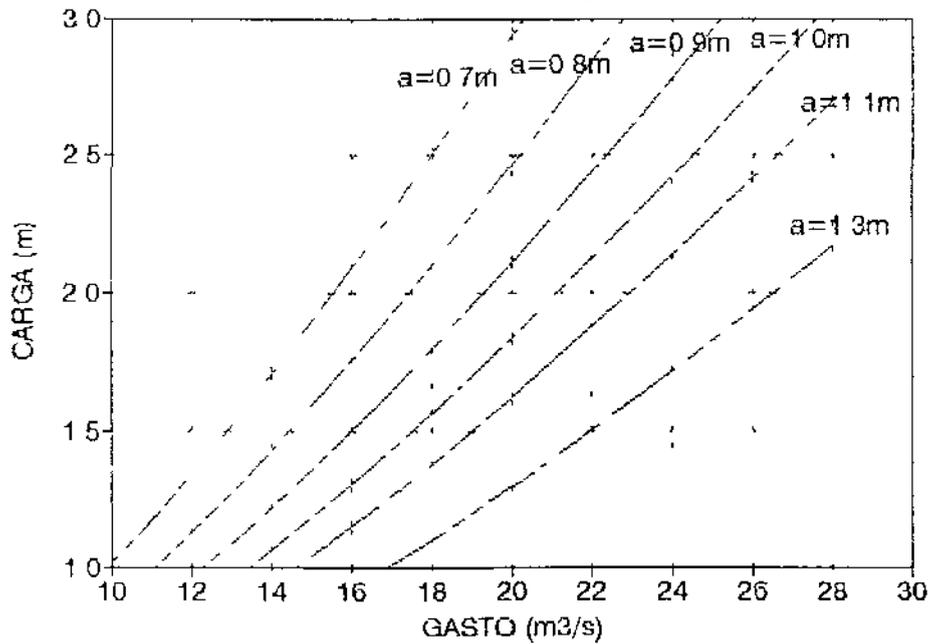
⁹Mediante la misma ecuación, también se puede generar una familia de curvas abertura-gasto, para diferentes cargas (h).

Lamina 13. Curvas carga-gasto para diferentes aberturas

13a. Aberturas menores de 0.7m



13b. Aberturas mayores de 0.6m



Sustituyendo la carga de 2.3 m y la abertura de 0.5 m en la ecuación 1.10 resulta el gasto:

$$Q = 13.4582 (0.5)^{0.8634} (2.3)^{0.6538} = 12.752 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para obtener la variación del gasto estimado respecto al aforado se tiene la siguiente expresión:

$$\%_{var} = \left[\frac{Q_e - Q_a}{Q_a} \right] 100$$

Donde: $\%_{var}$ = porcentaje de variación.
 Q_e = Gasto estimado (mediante ecuación empírica)
 Q_a = Gasto aforo (experimental)

El cuadro 5 muestra el porcentaje de variación obtenido mediante esta última ecuación; el gasto estimado mediante la función empírica (Ec. 1.10) se aproxima bastante bien al aforado.

Cuadro 5. Porcentaje de variación del gasto estimado respecto al de aforo

GASTO (m3/s)		% RESPECTO
Qa	Qe	Qa
3,730	3,877	4,0
4,557	4,275	-6,2
5,490	5,855	6,7
8,529	8,375	-1,8
9,094	9,406	3,4
10,799	10,680	-1,1
11,090	11,104	0,1
11,343	10,837	-4,5
12,369	12,965	4,8
13,915	13,078	-6,0
14,580	14,429	-1,0
15,711	16,648	6,0
18,756	18,240	-2,8
19,015	18,417	-3,1
19,930	19,863	-0,3
20,831	20,240	-2,8
22,924	23,195	1,2
24,239	24,406	0,7
25,296	25,576	1,1
27,214	28,054	3,1

a.2) Compuerta rectangular

Para calibrar una compuerta de este tipo, se puede emplear el método descrito para la compuerta radial, considerando de igual forma los valores de abertura, carga y gasto.

b) Proceso gráfico

Este proceso se puede aplicar a ambos tipos de compuertas y se describe ampliamente en el capítulo 2.

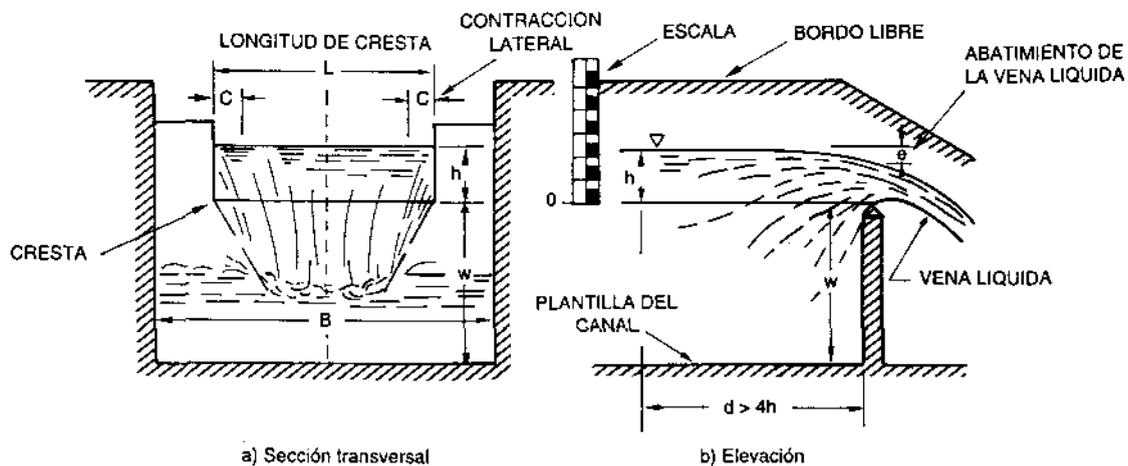
2 METODOS DE AFORO PARA CANALES Y TOMAS PARCELARIAS

Al entregar agua de la red mayor a la red menor, los gastos hidráulicos que se conducen son cada vez menores, hasta llegar a gastos pequeños que permiten el uso de estructuras especiales como vertedores, orificios y otros medidores de gasto. Estas estructuras aforadoras se basan en el funcionamiento de una sección hidráulica conocida y calibrada, de manera que con sólo conocer la carga hidráulica de operación se conoce el gasto que pasa por la sección.

2.1 Aforo con vertedores

Los vertedores son aberturas (escotaduras) practicadas en la pared de un recipiente o en una pantalla, colocada de tal forma que se interpone al paso de una corriente de agua. Por su forma, los vertedores más comunes son: rectangular, triangular, trapezoidal y parabólico (lámina 14).

Lámina 14. Descripción del escurrimiento y partes que integran un vertedor



Se tienen dos tipos de vertedores, de cresta delgada y de cresta ancha. Si los taludes y el fondo de la corriente o canal se encuentran bastante lejos del perímetro de la abertura del vertedor, las partículas de agua se aproximan a la abertura en trayectorias convergentes y desde todas direcciones, continúan su recorrido hasta cierta distancia en trayectorias curvilíneas después de cruzar la abertura, provocando la contracción de la corriente.

Para asegurarse de que las contracciones en los extremos sean completas, las distancias entre los extremos de la abertura y las paredes laterales del canal no deben ser menores del doble de la carga de operación del vertedor. Asimismo, para lograr la contracción completa en la cresta vertedora, debe instalarse ésta a una altura (W) del triple ($3h$) de la carga hidráulica del vertedor, medida desde el fondo o lecho del canal. Cuando la superficie del agua, aguas abajo del vertedor, permite que el aire circule libremente bajo la lámina vertida, se dice que el vertedor descarga libremente.

Los vertedores comunes de cresta delgada son: rectangular, trapezoidal y triangular. Para el funcionamiento adecuado de estos vertedores es necesario tomar en cuenta:

- a) La variación de la carga hidráulica debe ser desde 0.061 m hasta 0.61 m, para el gasto medio.
- b) Para vertedores rectangulares o trapezoidales, la carga no debe ser mayor de un tercio de longitud de la cresta ($L/3$).
- c) Los vertedores deben colocarse perpendicularmente a la dirección del flujo en el canal.
- d) El canal de acceso debe ser recto antes de llegar al vertedor al menos diez veces la longitud de su cresta ($10L$).
- e) La cresta y los laterales del vertedor deben ser rectos y afilados. La cresta en los vertedores rectangulares y trapezoidales deben quedar a nivel en sus extremos.
- f) Aguas abajo del canal no debe haber obstáculos que provoquen ahogamiento o inmersión de la descarga del vertedor.

Sus limitaciones:

- a) Se pierde mucha carga (para evitar que se ahogue) y cuando hay poca pendiente en el canal no funcionan.
- b) No se pueden combinar con estructuras de distribución o derivación.
- c) Cuando hay sedimentos que se depositan en el fondo, se azolvan y nulifican las condiciones del aforo. Necesitan mantenimiento (desazolve).
- d) Incrementan los tirantes aguas arriba del vertedor, aumentando las filtraciones, por generar mayor carga

hidráulica y mayor perímetro mojado o área de filtración del agua.

Para aforar con vertedores se deben cumplir las siguientes condiciones:

- a) La carga (h) de la corriente, se debe medir en una zona de régimen tranquilo, colocando la escala medidora a una longitud mínima de cuatro veces la carga (4h) aguas arriba de la cresta vertedora.
- b) Es conveniente que la corriente llegue a la estructura sin velocidad, aceptando como máximo $V=0.40$ m/s, en caso contrario se realizarán los ajustes necesarios.
- c) La profundidad de la pantalla debe ser mayor a tres veces la carga máxima (3h) sobre el vertedor.

2.1.1 Vertedor rectangular

Estos vertedores son las estructuras más usuales para el aforo de canales y la precisión con que se obtiene el gasto, se considera que es buena para fines prácticos.

Para aforar con estos vertedores es necesario conocer: la longitud de la cresta (L) y la carga hidráulica sobre la cresta del vertedor (h); para determinar dicha carga, generalmente se mide con una escala graduada aguas arriba del vertedor a una distancia (d) que puede variar desde 4 hasta 10 veces la carga (lámina 15). El cero de la escala debe quedar al nivel de la cresta del vertedor para evitar que la medición en ésta se vea afectada por el abatimiento (e) de la vena líquida del agua sobre la cresta. Las expresiones propuestas por Francis para vertedores son:

Sin contracción lateral.

$$Q = 1.84 L h^{1.5} \quad (2.1)$$

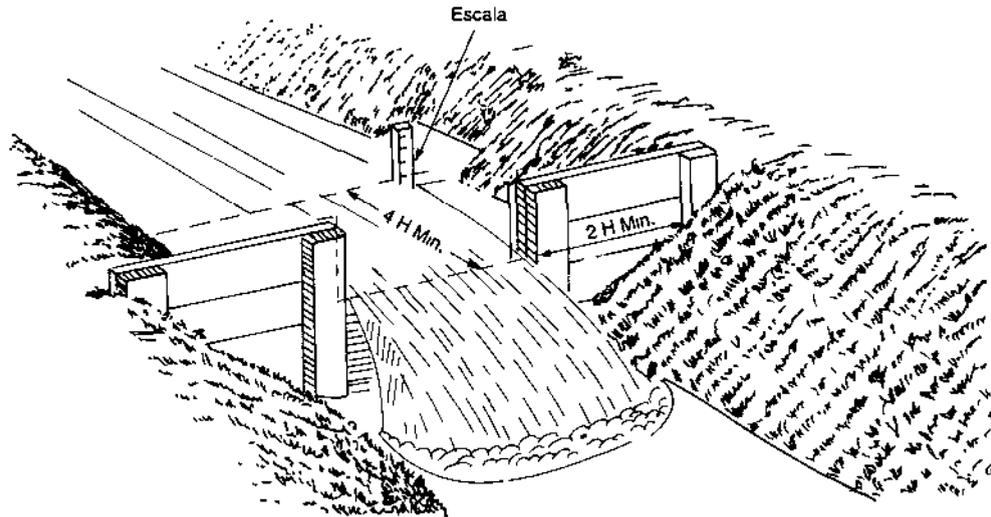
Con contracción lateral.

$$Q = 1.84 (L - 0.2 h) h^{1.5} \quad (2.2)$$

En las que la longitud de cresta (L) y carga (h) deben darse en metros para obtener el gasto (Q) en m^3/s .

Estas ecuaciones se han tabulado y graficado para diferentes longitudes de cresta; la ecuación 2.1, en el cuadro 6 y lámina 16, mientras que la ecuación 2.2, en el cuadro 7 y lámina 17.

Lámina 15. Vertedor rectangular con escala graduada aguas arriba



Ejemplo: se ha instalado un vertedor rectangular con contracciones con 0.8 m de longitud de cresta en un canal rectangular de 1.2 m de ancho. ¿Cuál es el gasto que pasa por el vertedor para una carga aguas arriba de 0.37 m?

Como la longitud de cresta es menor que el ancho del canal se tiene un vertedor con contracciones laterales.

Se considera la tabla de gastos para vertedores con contracción (cuadro 7), se ingresa en la primer columna con la carga de 0.37 m, para desplazarse horizontalmente hasta la columna correspondiente a la longitud de cresta de 0.8 m, resultando un gasto de $0.301 \text{ m}^3/\text{s}$

Por medio de la curva (lámina 17b) se localiza la carga de 0.37 m en el eje horizontal. A partir de este punto se traza una línea vertical hasta la intersección con la curva correspondiente a 0.8 m, de longitud de cresta y desde este punto se traza una línea horizontal, hasta el eje vertical resultando un gasto de $0.300 \text{ m}^3/\text{s}$

Cuadro 6. Gasto para vertedor rectangular, sin contracción (m³/s)

CARGA h (m)	LONGITUD CRESTA (m)									
	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80
0.06	0,011	0,014	0,016	0,019	0,022	0,027	0,032	0,038	0,043	0,049
0.07	0,014	0,017	0,020	0,024	0,027	0,034	0,041	0,048	0,055	0,061
0.08	0,017	0,021	0,025	0,029	0,033	0,042	0,050	0,058	0,067	0,075
0.09	0,020	0,025	0,030	0,035	0,040	0,050	0,060	0,070	0,079	0,089
0.10	0,023	0,029	0,035	0,041	0,047	0,058	0,070	0,081	0,093	0,105
0.11	0,027	0,034	0,040	0,047	0,054	0,067	0,081	0,094	0,107	0,121
0.12	0,031	0,038	0,046	0,054	0,061	0,076	0,092	0,107	0,122	0,138
0.13	0,034	0,043	0,052	0,060	0,069	0,086	0,103	0,121	0,138	0,155
0.14	0,039	0,048	0,058	0,067	0,077	0,096	0,116	0,135	0,154	0,173
0.15	0,043	0,053	0,064	0,075	0,086	0,107	0,128	0,150	0,171	0,192
0.16	0,047	0,059	0,071	0,082	0,094	0,118	0,141	0,165	0,188	0,212
0.17	0,052	0,064	0,077	0,090	0,103	0,129	0,155	0,181	0,206	0,232
0.18	0,056	0,070	0,084	0,098	0,112	0,141	0,169	0,197	0,225	0,253
0.19	0,061	0,076	0,091	0,107	0,122	0,152	0,183	0,213	0,244	0,274
0.20	0,066	0,082	0,099	0,115	0,132	0,165	0,197	0,230	0,263	0,296
0.21	0,071	0,089	0,106	0,124	0,142	0,177	0,212	0,248	0,283	0,319
0.22	0,076	0,095	0,114	0,133	0,152	0,190	0,228	0,266	0,304	0,342
0.23	0,081	0,101	0,122	0,142	0,162	0,203	0,244	0,284	0,325	0,365
0.24	0,087	0,108	0,130	0,151	0,173	0,216	0,260	0,303	0,346	0,389
0.25	0,092	0,115	0,138	0,161	0,184	0,230	0,276	0,322	0,368	0,414
0.26	0,098	0,122	0,146	0,171	0,195	0,244	0,293	0,342	0,390	0,439
0.27	0,103	0,129	0,155	0,181	0,207	0,258	0,310	0,361	0,413	0,465
0.28	0,109	0,136	0,164	0,191	0,218	0,273	0,327	0,382	0,436	0,491
0.29	0,115	0,144	0,172	0,201	0,230	0,287	0,345	0,402	0,460	0,517
0.30	0,121	0,151	0,181	0,212	0,242	0,302	0,363	0,423	0,484	0,544
0.31	0,127	0,159	0,191	0,222	0,254	0,318	0,381	0,445	0,508	0,572
0.32	0,133	0,167	0,200	0,233	0,266	0,333	0,400	0,466	0,533	0,600
0.33	0,140	0,174	0,209	0,244	0,279	0,349	0,419	0,488	0,558	0,628
0.34	0,146	0,182	0,219	0,255	0,292	0,365	0,438	0,511	0,584	0,657
0.35	0,152	0,190	0,229	0,267	0,305	0,381	0,457	0,533	0,610	0,686
0.36	0,159	0,199	0,238	0,278	0,318	0,397	0,477	0,556	0,636	0,715
0.37	0,166	0,207	0,248	0,290	0,331	0,414	0,497	0,580	0,663	0,745
0.38	0,172	0,216	0,259	0,302	0,345	0,431	0,517	0,603	0,690	0,776
0.39	0,179	0,224	0,269	0,314	0,359	0,448	0,538	0,627	0,717	0,807
0.40	0,186	0,233	0,279	0,326	0,372	0,465	0,559	0,652	0,745	0,838
0.41	0,193	0,242	0,290	0,338	0,386	0,483	0,580	0,676	0,773	0,869
0.42	0,200	0,250	0,300	0,351	0,401	0,501	0,601	0,701	0,801	0,901
0.43	0,208	0,259	0,311	0,363	0,415	0,519	0,623	0,726	0,830	0,934
0.44	0,215	0,269	0,322	0,376	0,430	0,537	0,644	0,752	0,859	0,967
0.45	0,222	0,278	0,333	0,389	0,444	0,555	0,667	0,778	0,889	1,000
0.46	0,230	0,287	0,344	0,402	0,459	0,574	0,689	0,804	0,918	1,033
0.47	0,237	0,296	0,356	0,415	0,474	0,593	0,711	0,830	0,949	1,067
0.48	0,245	0,306	0,367	0,428	0,490	0,612	0,734	0,857	0,979	1,101
0.49	0,252	0,316	0,379	0,442	0,505	0,631	0,757	0,884	1,010	1,136
0.50	0,260	0,325	0,390	0,455	0,520	0,651	0,781	0,911	1,041	1,171
0.51	0,268	0,335	0,402	0,469	0,536	0,670	0,804	0,938	1,072	1,206
0.52	0,276	0,345	0,414	0,483	0,552	0,690	0,828	0,966	1,104	1,242
0.53	0,284	0,355	0,426	0,497	0,568	0,710	0,852	0,994	1,136	1,278
0.54	0,292	0,365	0,438	0,511	0,584	0,730	0,876	1,022	1,168	1,314
0.55	0,300	0,375	0,450	0,525	0,600	0,751	0,901	1,051	1,201	1,351
0.56	0,308	0,386	0,463	0,540	0,617	0,771	0,925	1,080	1,234	1,388
0.57	0,317	0,396	0,475	0,554	0,633	0,792	0,950	1,109	1,267	1,425
0.58	0,325	0,406	0,488	0,569	0,650	0,813	0,975	1,138	1,300	1,463
0.59	0,334	0,417	0,500	0,584	0,667	0,834	1,001	1,167	1,334	1,501
0.60	0,342	0,428	0,513	0,599	0,684	0,855	1,026	1,197	1,368	1,539

Cuadro 7. Gasto para vertedor rectangular, con contracción (m³/s)

CARGA h (m)	LONGITUD CRESTA (m)									
	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80
0.06	0,010	0,013	0,016	0,019	0,021	0,027	0,032	0,038	0,043	0,048
0.07	0,013	0,017	0,020	0,023	0,027	0,034	0,040	0,047	0,054	0,061
0.08	0,016	0,020	0,024	0,028	0,033	0,041	0,049	0,058	0,066	0,074
0.09	0,019	0,024	0,029	0,034	0,039	0,049	0,059	0,069	0,079	0,089
0.10	0,022	0,028	0,034	0,040	0,045	0,057	0,069	0,080	0,092	0,104
0.11	0,025	0,032	0,039	0,046	0,052	0,066	0,079	0,093	0,106	0,119
0.12	0,029	0,036	0,044	0,052	0,059	0,075	0,090	0,105	0,121	0,136
0.13	0,032	0,041	0,050	0,058	0,067	0,084	0,101	0,119	0,136	0,153
0.14	0,036	0,045	0,055	0,065	0,074	0,094	0,113	0,132	0,152	0,171
0.15	0,040	0,050	0,061	0,072	0,082	0,104	0,125	0,146	0,168	0,189
0.16	0,043	0,055	0,067	0,079	0,090	0,114	0,138	0,161	0,185	0,208
0.17	0,047	0,060	0,073	0,086	0,099	0,125	0,150	0,176	0,202	0,228
0.18	0,051	0,065	0,079	0,093	0,107	0,135	0,164	0,192	0,220	0,248
0.19	0,055	0,070	0,086	0,101	0,116	0,147	0,177	0,208	0,238	0,269
0.20	0,059	0,076	0,092	0,109	0,125	0,158	0,191	0,224	0,257	0,290
0.21	0,063	0,081	0,099	0,117	0,134	0,170	0,205	0,240	0,276	0,311
0.22	0,068	0,087	0,106	0,125	0,144	0,182	0,219	0,257	0,295	0,333
0.23	0,072	0,092	0,112	0,133	0,153	0,194	0,234	0,275	0,315	0,356
0.24	0,076	0,098	0,119	0,141	0,163	0,206	0,249	0,292	0,336	0,379
0.25	0,081	0,104	0,127	0,150	0,173	0,219	0,265	0,311	0,357	0,403
0.26	0,085	0,109	0,134	0,158	0,182	0,231	0,280	0,329	0,378	0,426
0.27	0,089	0,115	0,141	0,167	0,193	0,244	0,296	0,347	0,399	0,451
0.28	0,094	0,121	0,148	0,176	0,203	0,257	0,312	0,366	0,421	0,475
0.29	0,098	0,127	0,156	0,184	0,213	0,271	0,328	0,386	0,443	0,501
0.30	0,103	0,133	0,163	0,193	0,224	0,284	0,345	0,405	0,466	0,526
0.31	0,107	0,139	0,171	0,203	0,234	0,298	0,361	0,425	0,488	0,552
0.32	0,112	0,145	0,179	0,212	0,245	0,312	0,378	0,445	0,512	0,578
0.33	0,117	0,151	0,186	0,221	0,256	0,326	0,396	0,465	0,535	0,605
0.34	0,121	0,158	0,194	0,231	0,267	0,340	0,413	0,486	0,559	0,632
0.35	0,126	0,164	0,202	0,240	0,278	0,354	0,431	0,507	0,583	0,659
0.36	0,130	0,170	0,210	0,250	0,289	0,369	0,448	0,528	0,607	0,687
0.37	0,135	0,176	0,218	0,259	0,301	0,383	0,466	0,549	0,632	0,715
0.38	0,140	0,183	0,226	0,269	0,312	0,398	0,484	0,571	0,657	0,743
0.39	0,144	0,189	0,234	0,279	0,324	0,413	0,503	0,592	0,682	0,772
0.40	0,149	0,196	0,242	0,289	0,335	0,428	0,521	0,614	0,708	0,801
0.41	0,154	0,202	0,250	0,299	0,347	0,443	0,540	0,637	0,733	0,830
0.42	0,158	0,208	0,258	0,309	0,359	0,459	0,559	0,659	0,759	0,859
0.43	0,163	0,215	0,267	0,319	0,370	0,474	0,578	0,682	0,786	0,889
0.44	0,168	0,221	0,275	0,329	0,382	0,490	0,597	0,705	0,812	0,919
0.45	0,172	0,228	0,283	0,339	0,394	0,505	0,617	0,728	0,839	0,950
0.46	0,177	0,234	0,292	0,349	0,406	0,521	0,636	0,751	0,866	0,980
0.47	0,181	0,241	0,300	0,359	0,419	0,537	0,656	0,774	0,893	1,011
0.48	0,186	0,247	0,308	0,370	0,431	0,553	0,676	0,798	0,920	1,043
0.49	0,191	0,254	0,317	0,380	0,443	0,569	0,695	0,822	0,948	1,074
0.50	0,195	0,260	0,325	0,390	0,455	0,585	0,716	0,846	0,976	1,106
0.51	0,200	0,267	0,334	0,401	0,468	0,602	0,736	0,870	1,004	1,138
0.52	0,204	0,273	0,342	0,411	0,480	0,618	0,756	0,894	1,032	1,170
0.53	0,209	0,280	0,351	0,422	0,493	0,635	0,777	0,919	1,061	1,203
0.54	0,213	0,286	0,359	0,432	0,505	0,651	0,797	0,943	1,089	1,235
0.55	0,218	0,293	0,368	0,443	0,518	0,668	0,818	0,968	1,118	1,268
0.56	0,222	0,299	0,376	0,453	0,531	0,685	0,839	0,993	1,147	1,302
0.57	0,226	0,306	0,385	0,464	0,543	0,702	0,860	1,018	1,177	1,335
0.58	0,231	0,312	0,393	0,475	0,556	0,718	0,881	1,044	1,206	1,369
0.59	0,235	0,319	0,402	0,485	0,569	0,735	0,902	1,069	1,236	1,403
0.60	0,239	0,325	0,410	0,496	0,582	0,753	0,924	1,095	1,266	1,437

Lamina 16. Curvas carga-gasto para vertedores rectangulares sin contraccion lateral

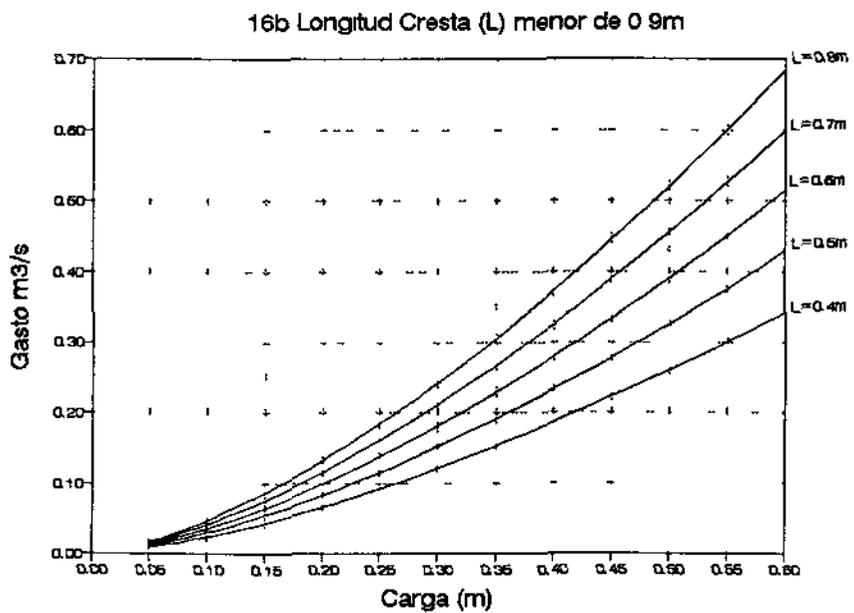
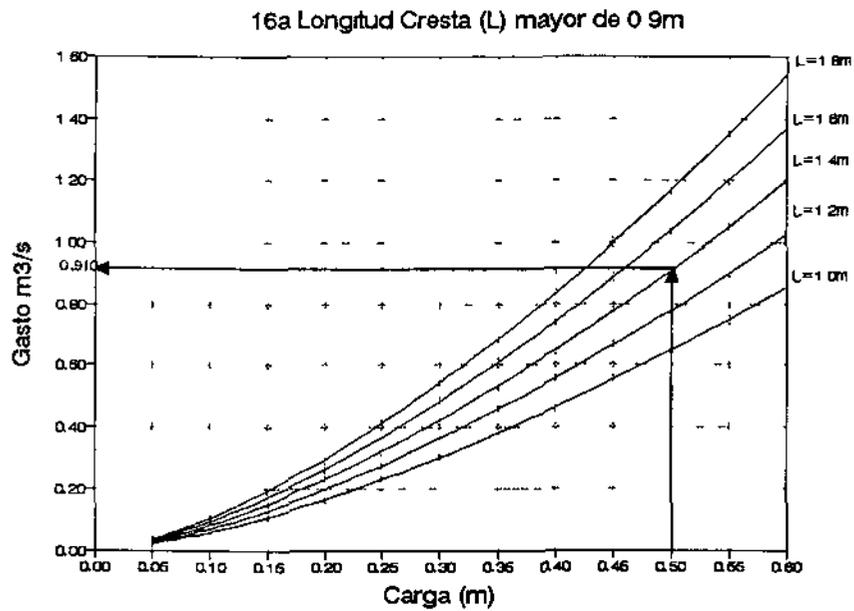
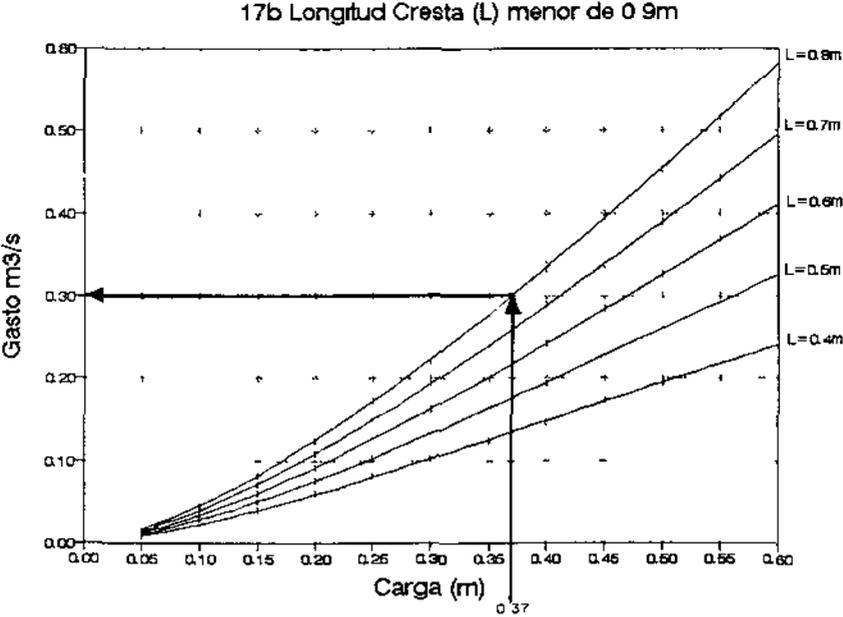
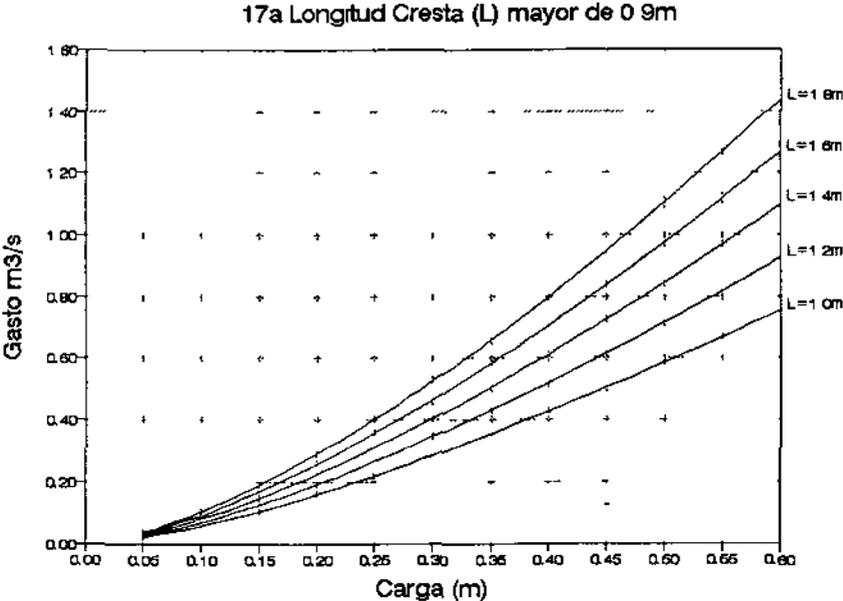


Lámina 17. Curvas carga-gasto para vertedores rectangulares con contracción lateral



En la lámina 18 se muestra el Nomograma de Francis, que sirve únicamente para encontrar el gasto en vertedores con contracción lateral.

Considerando el ejemplo anterior, se puede obtener el gasto mediante el Nomograma de Francis (lámina 18) y se procede de la siguiente manera:

Se localiza el valor de la longitud de cresta de 0.8 m en el eje derecho, y el valor de la carga de 0.37 m en la línea curva, se unen los dos puntos mediante una línea recta, la cual se prolonga hasta la intersección con el eje izquierdo, en el que se encuentran los valores de gasto, resultando $0.305 \text{ m}^3/\text{s}$.

Este resultado es bastante aproximado a los obtenidos mediante el cuadro 7 y lámina 17b

2.1.2 Vertedor rectangular Guamúchil

El vertedor rectangular Guamúchil es de cresta delgada y se instala a la salida de las tomas granja, con una pantalla antes de la cresta vertedora, la cual obliga a reducir la velocidad de llegada del agua y reduce las variaciones de nivel por las turbulencias y oleajes que se forman a la salida de las tomas. Las dimensiones y forma de instalar la estructura a la salida de las tomas se indica en la lámina 19.

El gasto depende del tipo de vertedor; si no tiene contracciones laterales, se emplea la ecuación 2.1; si las tiene, la ecuación 2.2

Ejemplo: se ha instalado un vertedor rectangular Guamúchil (sin contracción) en un canal rectangular de 1.4 m de ancho. ¿Qué gasto pasa por el vertedor, para una carga aguas arriba de 0.50 m?

Se considera la tabla de gastos para vertedores sin contracción (cuadro 6), se ingresa en la primer columna con la carga de 0.50 m, para desplazarse horizontalmente hasta la columna correspondiente a la longitud de cresta de 1.4 m, resultando un gasto de $0.911 \text{ m}^3/\text{s}$

Por medio de la curva (lámina 16a) se localiza la carga de 0.50 m en el eje horizontal, a partir de este punto se traza una línea vertical hasta la intersección con la curva correspondiente a 1.4 m de longitud de cresta, y desde este punto se traza una línea horizontal hasta el eje vertical resultando un gasto de $0.910 \text{ m}^3/\text{s}$

Lámina 18. Nomograma de Francis para vertedores rectangulares con contracción lateral

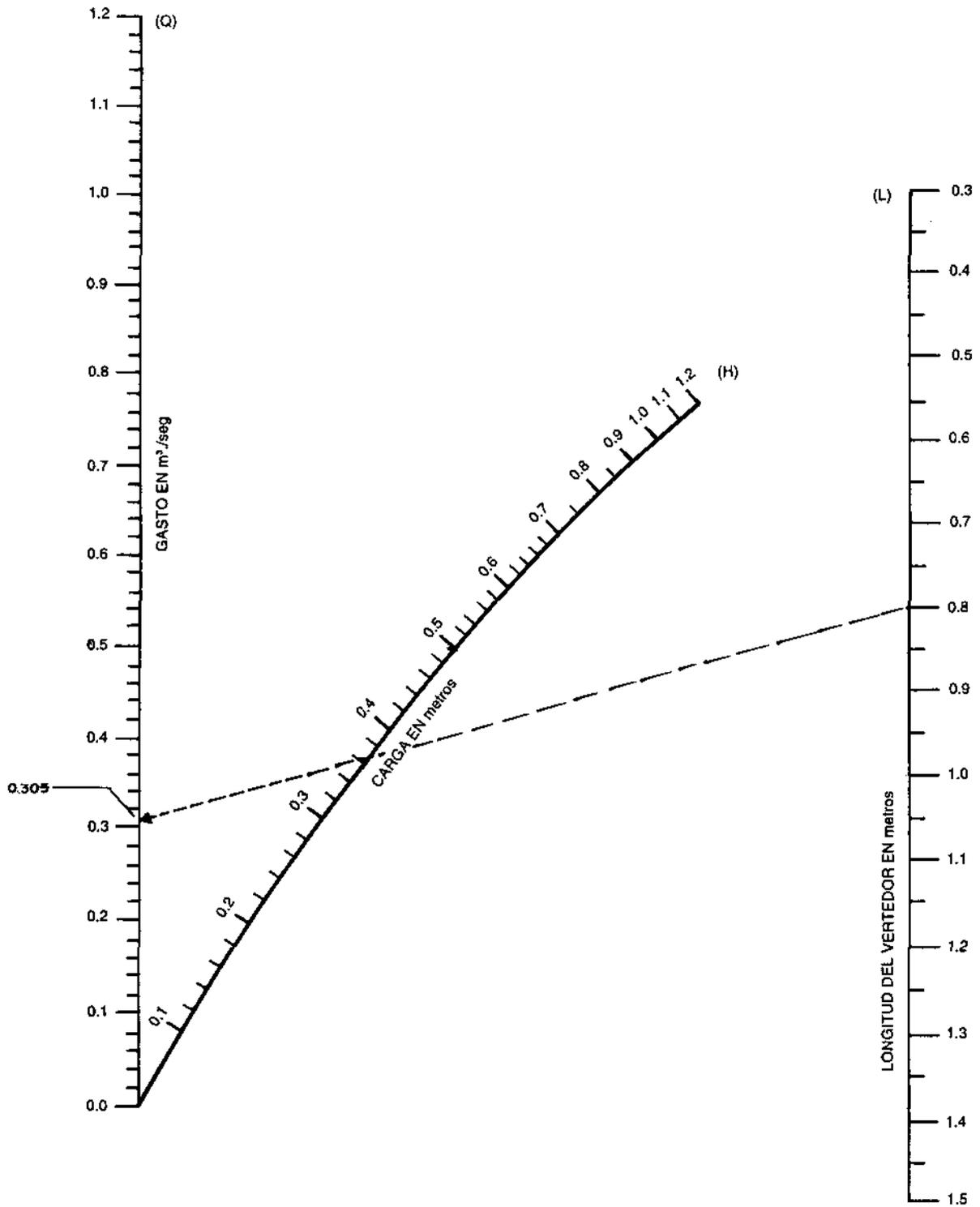
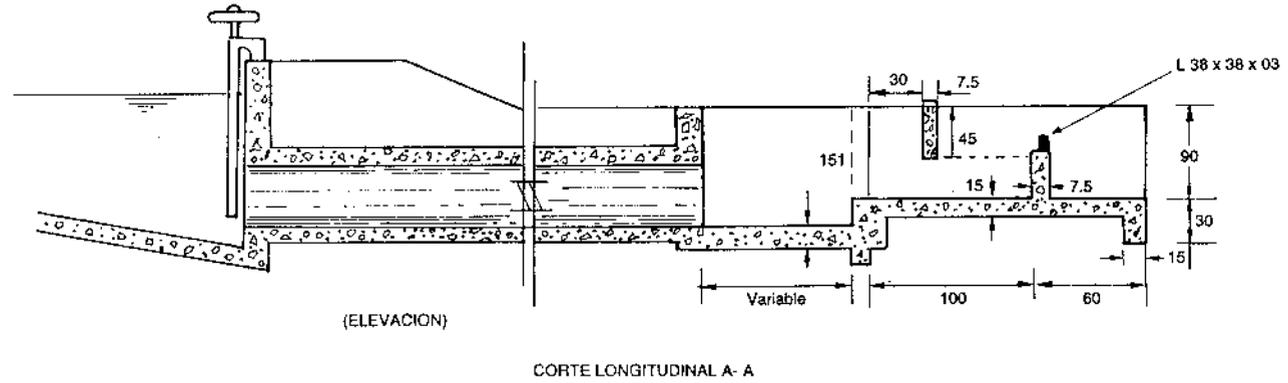
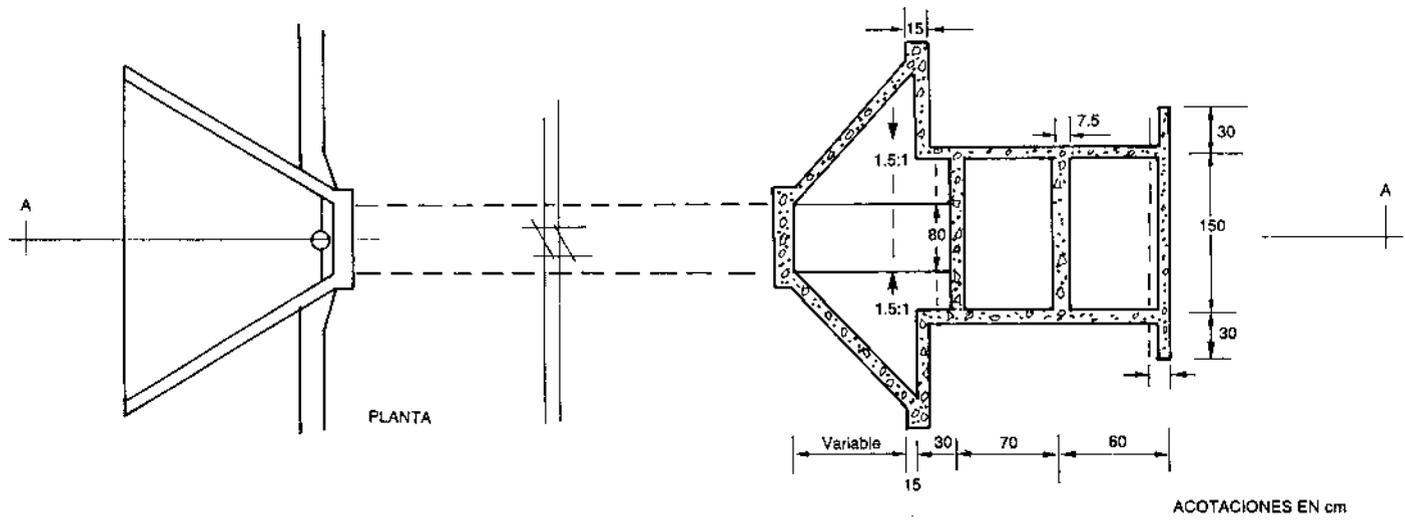


Lámina 19. Aforador tipo Guamúchil



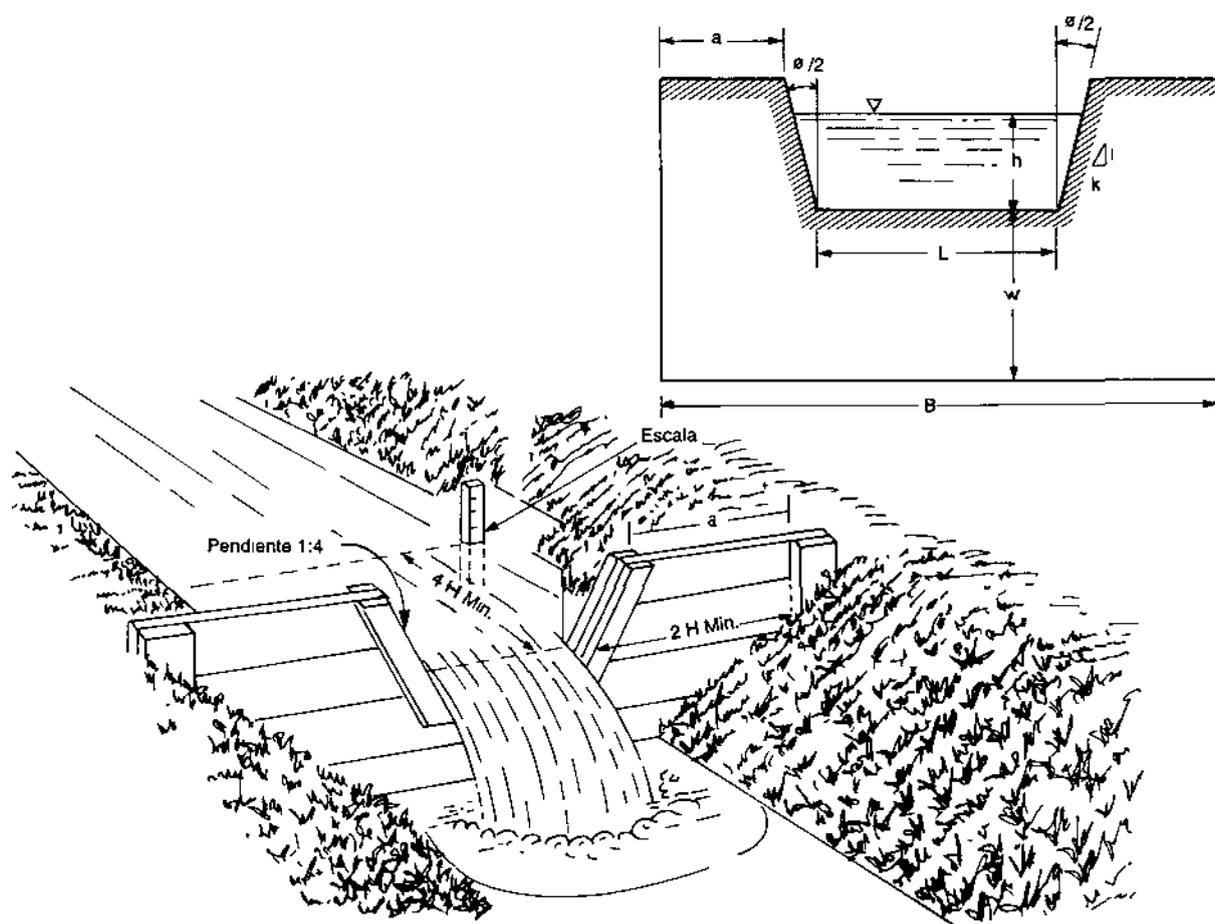
43



2.1.3 Vertedor trapezoidal Cipolletti

Este vertedor (lámina 20) fue desarrollado por Cipolletti al tratar de compensar las contracciones laterales con una ampliación progresiva del nivel de la vena líquida; consiste en una sección transversal trapezoidal de talud 1 horizontal a 4 vertical. Se considera como una combinación de los vertedores rectangular y triangular, por lo que la expresión del gasto se obtiene de la combinación de las fórmulas de estos.

Lámina 20. Vertedor trapezoidal Cipolletti



Mediante este vertedor se mide el mismo rango de gastos que con los rectangulares, para las mismas longitudes de cresta, pero con mayor dificultad de construcción; si no se requieren mediciones muy precisas no es recomendable su construcción.

Las fórmulas para obtener el gasto son las siguientes:

Sin velocidad de llegada :

$$Q = 1.86 L h^{1.5} \quad (2.3)$$

esta fórmula es válida si se cumple:

$$\begin{aligned} 0.08 \text{ m} &\leq h \leq 0.60 \text{ m} \\ 30 h &\geq B \geq 60 h \\ a &\geq 2 h \\ L &\geq 3h \\ W &\geq 3h \end{aligned}$$

Con velocidad de llegada.

$$Q = 1.86 L \left(h + \frac{V_0^2}{2g} \right)^{1.5} \quad (2.4)$$

La velocidad de llegada se mide aguas arriba del vertedor con la expresión:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2.5)$$

Para facilitar los cálculos, en el cuadro 8 y lámina 21 se presentan los gastos para varias longitudes de cresta.

Ejemplo: Se tiene un canal rectangular en el que se ha instalado un vertedor trapezoidal con una longitud de cresta de 0.80 m. Encontrar el gasto para una carga de 0.37 m

Considerando el cuadro 8 y procediendo de igual forma que en los ejemplos anteriores se obtiene un gasto de 0.335 m³/s.

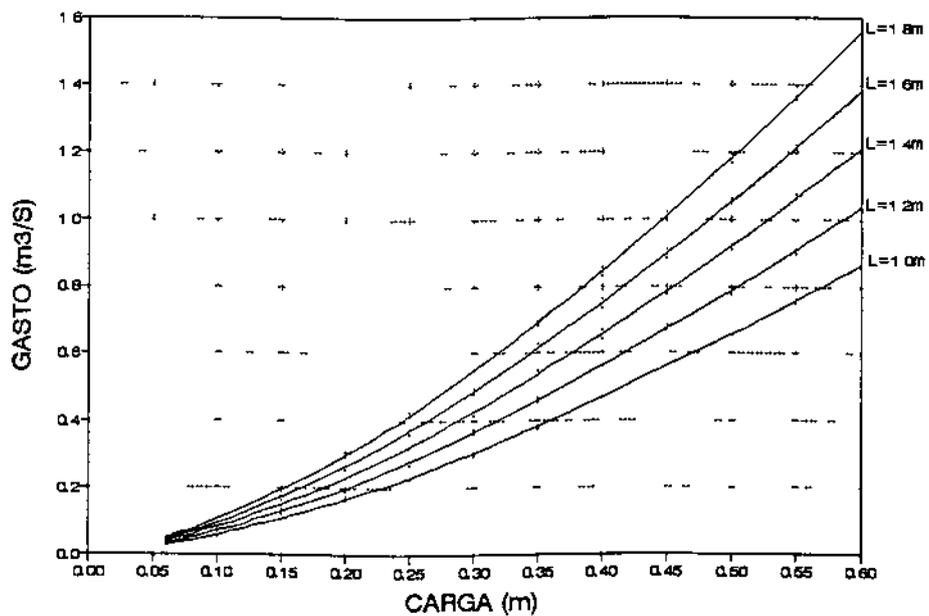
Mediante la curva (lámina 21b), procediendo de forma análoga, resulta un gasto de 0.330 m³/s.

Cuadro 8. Gasto para vertedores Cipolletti (m³/s)

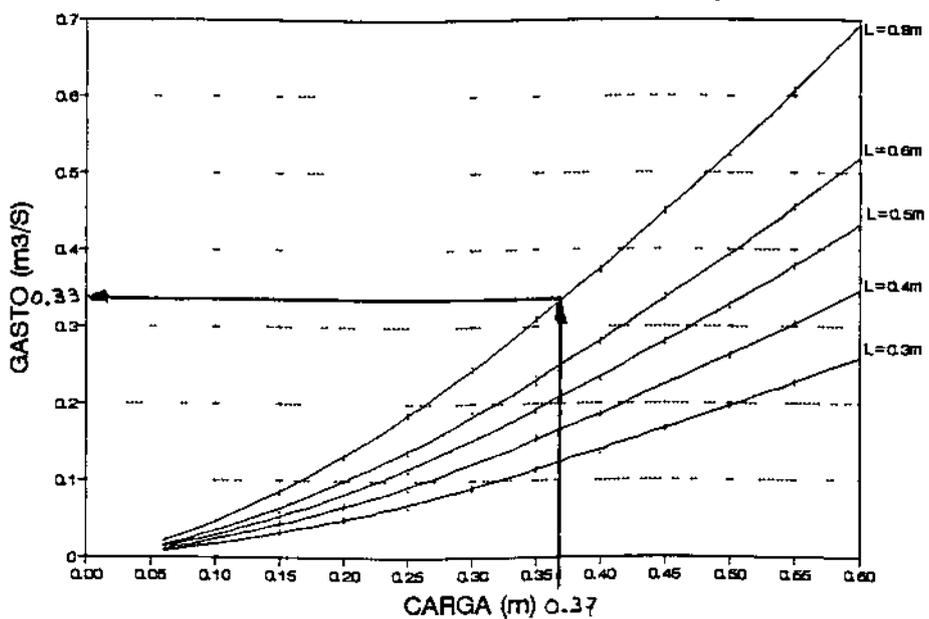
CARGA h (m)	LONGITUD CRESTA (m)									
	0,30	0,40	0,50	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
0.06	0,008	0,011	0,014	0,016	0,022	0,027	0,033	0,038	0,044	0,049
0.07	0,010	0,014	0,017	0,021	0,028	0,034	0,041	0,048	0,055	0,062
0.08	0,013	0,017	0,021	0,025	0,034	0,042	0,051	0,059	0,067	0,076
0.09	0,015	0,020	0,025	0,030	0,040	0,050	0,060	0,070	0,080	0,090
0.10	0,018	0,024	0,029	0,035	0,047	0,059	0,071	0,082	0,094	0,106
0.11	0,020	0,027	0,034	0,041	0,054	0,068	0,081	0,095	0,109	0,122
0.12	0,023	0,031	0,039	0,046	0,062	0,077	0,093	0,108	0,124	0,139
0.13	0,026	0,035	0,044	0,052	0,070	0,087	0,105	0,122	0,139	0,157
0.14	0,029	0,039	0,049	0,058	0,078	0,097	0,117	0,136	0,156	0,175
0.15	0,032	0,043	0,054	0,065	0,086	0,108	0,130	0,151	0,173	0,195
0.16	0,036	0,048	0,060	0,071	0,095	0,119	0,143	0,167	0,190	0,214
0.17	0,039	0,052	0,065	0,078	0,104	0,130	0,156	0,183	0,209	0,235
0.18	0,043	0,057	0,071	0,085	0,114	0,142	0,170	0,199	0,227	0,256
0.19	0,046	0,062	0,077	0,092	0,123	0,154	0,185	0,216	0,246	0,277
0.20	0,050	0,067	0,083	0,100	0,133	0,166	0,200	0,233	0,266	0,299
0.21	0,054	0,072	0,089	0,107	0,143	0,179	0,215	0,251	0,286	0,322
0.22	0,058	0,077	0,096	0,115	0,154	0,192	0,230	0,269	0,307	0,345
0.23	0,062	0,082	0,103	0,123	0,164	0,205	0,246	0,287	0,328	0,369
0.24	0,066	0,087	0,109	0,131	0,175	0,219	0,262	0,306	0,350	0,394
0.25	0,070	0,093	0,116	0,140	0,186	0,233	0,279	0,326	0,372	0,419
0.26	0,074	0,099	0,123	0,148	0,197	0,247	0,296	0,345	0,395	0,444
0.27	0,078	0,104	0,130	0,157	0,209	0,261	0,313	0,365	0,418	0,470
0.28	0,083	0,110	0,138	0,165	0,220	0,276	0,331	0,386	0,441	0,496
0.29	0,087	0,116	0,145	0,174	0,232	0,290	0,349	0,407	0,465	0,523
0.30	0,092	0,122	0,153	0,183	0,245	0,306	0,367	0,428	0,489	0,550
0.31	0,096	0,128	0,161	0,193	0,257	0,321	0,385	0,449	0,514	0,578
0.32	0,101	0,135	0,168	0,202	0,269	0,337	0,404	0,471	0,539	0,606
0.33	0,106	0,141	0,176	0,212	0,282	0,353	0,423	0,494	0,564	0,635
0.34	0,111	0,147	0,184	0,221	0,295	0,369	0,442	0,516	0,590	0,664
0.35	0,116	0,154	0,193	0,231	0,308	0,385	0,462	0,539	0,616	0,693
0.36	0,121	0,161	0,201	0,241	0,321	0,402	0,482	0,562	0,643	0,723
0.37	0,126	0,167	0,209	0,251	0,335	0,419	0,502	0,586	0,670	0,754
0.38	0,131	0,174	0,218	0,261	0,349	0,436	0,523	0,610	0,697	0,784
0.39	0,136	0,181	0,227	0,272	0,362	0,453	0,544	0,634	0,725	0,815
0.40	0,141	0,188	0,235	0,282	0,376	0,471	0,565	0,659	0,753	0,847
0.41	0,146	0,195	0,244	0,293	0,391	0,488	0,586	0,684	0,781	0,879
0.42	0,152	0,203	0,253	0,304	0,405	0,506	0,608	0,709	0,810	0,911
0.43	0,157	0,210	0,262	0,315	0,420	0,524	0,629	0,734	0,839	0,944
0.44	0,163	0,217	0,271	0,326	0,434	0,543	0,651	0,760	0,869	0,977
0.45	0,168	0,225	0,281	0,337	0,449	0,561	0,674	0,786	0,898	1,011
0.46	0,174	0,232	0,290	0,348	0,464	0,580	0,696	0,812	0,928	1,045
0.47	0,180	0,240	0,300	0,360	0,479	0,599	0,719	0,839	0,959	1,079
0.48	0,186	0,247	0,309	0,371	0,495	0,619	0,742	0,866	0,990	1,113
0.49	0,191	0,255	0,319	0,383	0,510	0,638	0,766	0,893	1,021	1,148
0.50	0,197	0,263	0,329	0,395	0,526	0,658	0,789	0,921	1,052	1,184
0.51	0,203	0,271	0,339	0,406	0,542	0,677	0,813	0,948	1,084	1,219
0.52	0,209	0,279	0,349	0,418	0,558	0,697	0,837	0,976	1,116	1,255
0.53	0,215	0,287	0,359	0,431	0,574	0,718	0,861	1,005	1,148	1,292
0.54	0,221	0,295	0,369	0,443	0,590	0,738	0,886	1,033	1,181	1,329
0.55	0,228	0,303	0,379	0,455	0,607	0,759	0,910	1,062	1,214	1,366
0.56	0,234	0,312	0,390	0,468	0,624	0,779	0,935	1,091	1,247	1,403
0.57	0,240	0,320	0,400	0,480	0,640	0,800	0,961	1,121	1,281	1,441
0.58	0,246	0,329	0,411	0,493	0,657	0,822	0,986	1,150	1,315	1,479
0.59	0,253	0,337	0,421	0,506	0,674	0,843	1,012	1,180	1,349	1,517
0.60	0,259	0,346	0,432	0,519	0,692	0,864	1,037	1,210	1,383	1,556

Lamina 21. Curvas carga-gasto para vertedores Cipolletti

21a Longitud Cresta (L) mayor de 0.9m



21b Longitud Cresta (L) menor de 0.9m

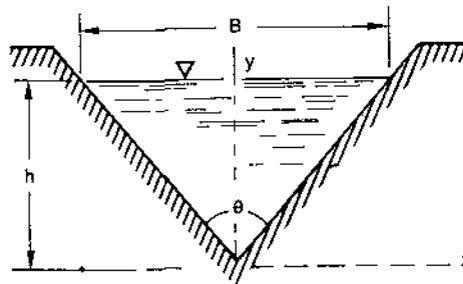
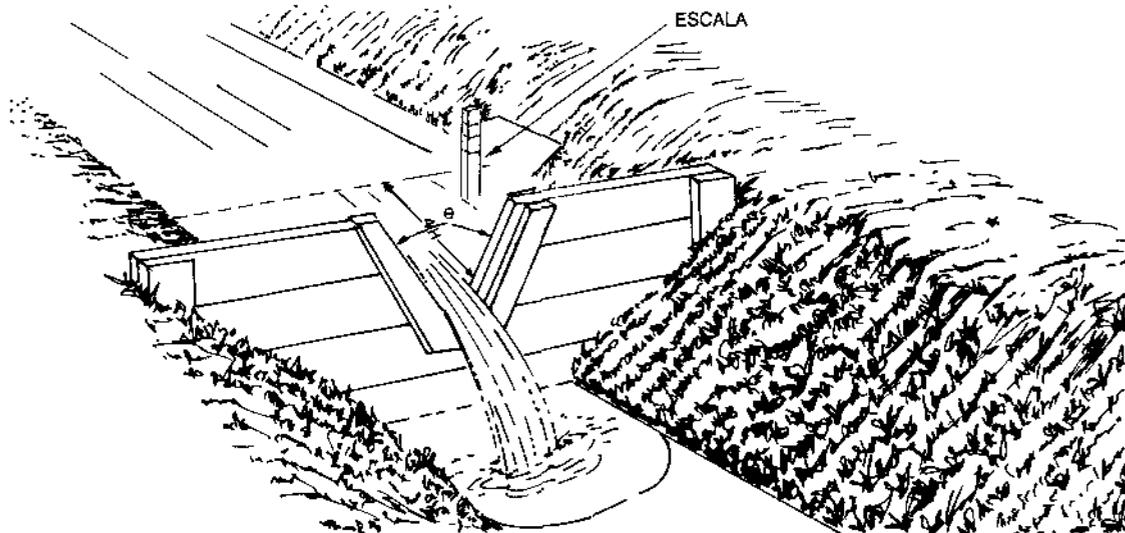


2.1.4 Vertedor triangular

Los vertedores triangulares son apropiados para medir gastos pequeños. En éstos se toma en cuenta solamente la carga hidráulica (h) y el ángulo de abertura del vertedor; por razones prácticas puede ser de 60° o 90° . Estos vertedores son fáciles de construir y pueden ser de diversos materiales: aluminio, fierro, concreto, o de una combinación de éstos.

Se puede construir un vertedor sencillo de la siguiente forma: en una tabla se hace una abertura triangular, con una lámina de metal montada con el ángulo deseado (60° o 90°), complementada con una escala graduada en centímetros, que se coloca verticalmente aguas arriba del vertedor (lámina 22).

Lámina 22. Vertedor triangular



La expresión para obtener el gasto en un vertedor triangular está dada por:

$$Q = C h^{5/2}$$

Donde: Q=Gasto (m^3/s)
h=Carga sobre el vértice (m)
C=Coeficiente de descarga (adimensional)

El coeficiente (C) depende, entre otros factores, del ángulo en el vértice del vertedor. Según BARR las ecuaciones para obtener el gasto son:

Para 60°

$$Q = 0.81 h^{2.5} \quad (2.6)$$

Para 90°

$$Q = 1.4 h^{2.5} \quad (2.7)$$

En el cuadro 9 se han tabulado las ecuaciones anteriores, para diferentes valores de carga y se han graficado en la lámina 23

Ejemplo: se ha instalado un vertedor triangular de 90° de abertura en el dren de una parcela. Obtener el gasto, si se tiene una carga de 15 cm sobre el vértice del vertedor.

Considerando el cuadro 9, se ingresa en la primer columna con la carga de 0.15 m hasta la columna correspondiente a 90° , el gasto que resulta es de $0.012 m^3/s$.

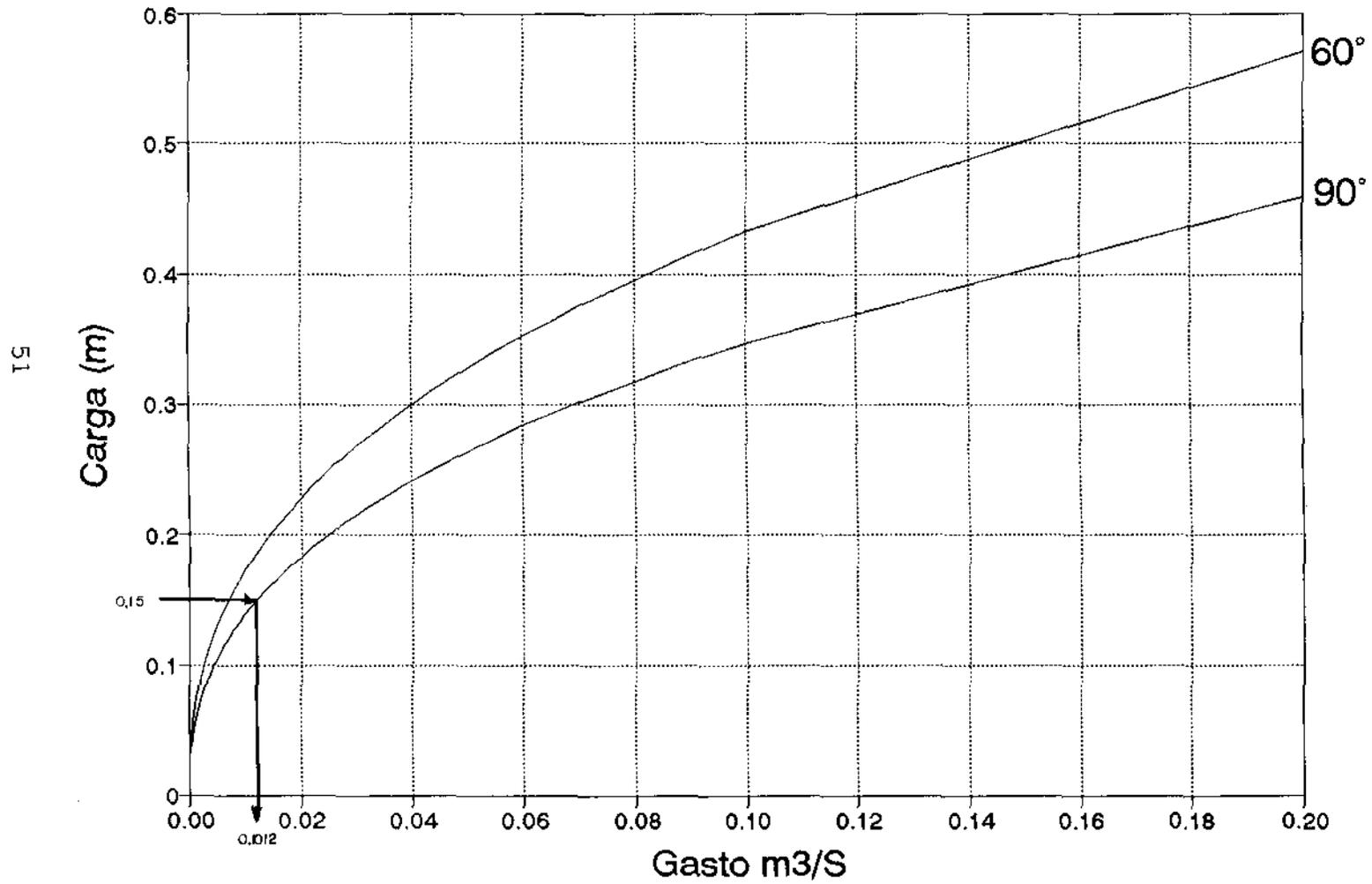
En la lámina 23 se ingresa en el eje vertical con la carga de 0.15 m; a partir de este punto se traza una línea horizontal hasta la intersección con la curva correspondiente a 90° y en este punto se traza una vertical hasta el eje horizontal, resultando un gasto de $0.012 m^3/s$

Cuadro 9. Gasto para vertedores triangulares, abertura 60° y 90°
(m³/s)

CARGA h (m)	ABERTURA	
	60°	90°
0.05	0,000	0,001
0.06	0,001	0,001
0.07	0,001	0,002
0.08	0,001	0,003
0.09	0,002	0,003
0.10	0,003	0,004
0.11	0,003	0,006
0.12	0,004	0,007
0.13	0,005	0,009
0.14	0,006	0,010
0.15	0,007	0,012
0.16	0,008	0,014
0.17	0,010	0,017
0.18	0,011	0,019
0.19	0,013	0,022
0.20	0,014	0,025
0.21	0,016	0,028
0.22	0,018	0,032
0.23	0,021	0,036
0.24	0,023	0,040
0.25	0,025	0,044
0.26	0,028	0,048
0.27	0,031	0,053
0.28	0,034	0,058
0.29	0,037	0,063
0.30	0,040	0,069
0.31	0,043	0,075
0.32	0,047	0,081
0.33	0,051	0,088
0.34	0,055	0,094
0.35	0,059	0,101
0.36	0,063	0,109
0.37	0,067	0,117
0.38	0,072	0,125
0.39	0,077	0,133
0.40	0,082	0,142
0.41	0,087	0,151
0.42	0,093	0,160
0.43	0,098	0,170
0.44	0,104	0,180
0.45	0,110	0,190
0.46	0,116	0,201
0.47	0,123	0,212
0.48	0,129	0,223
0.49	0,136	0,235
0.50	0,143	0,247
0.51	0,150	0,260
0.52	0,158	0,273
0.53	0,166	0,286
0.54	0,174	0,300
0.55	0,182	0,314
0.56	0,190	0,329
0.57	0,199	0,343
0.58	0,208	0,359
0.59	0,217	0,374
0.60	0,226	0,390

Lámina 23. Curvas carga-gasto para vertedores triangulares

Vertedor Triangular



2.2 Aforo con orificios y compuertas calibradas

Un orificio es una abertura en la pared de un deposito o pantalla de perimetro cerrado y forma circular, rectangular, cuadrada, etc., que da paso al flujo de agua. Para que funcione como tal, la superficie del agua siempre debe rebasar el borde superior de ésta, de lo contrario funcionara como si fuera un vertedor. Se consideran orificios: compuertas en general, valvulas de obras de toma, tomas granja, desagues, etcetera.

Las compuertas son orificios de area hidráulica regulable; la derivación del agua de los canales principales a las parcelas de los agricultores se realiza a traves de compuertas ubicadas en los canales laterales y sublaterales; la mayoría de estas son del tipo deslizante, simples y dobles, para facilitar la medicion del agua entregada en la regadera.

Los orificios normalmente utilizados en la medicion son de forma regular, colocados en un plano vertical perpendicular a la trayectoria del flujo. En todo tipo de aberturas se aplican los mismos principios fundamentales.

Al flujo que pasa por un orificio se le llama vena líquida y a la altura del manto del flujo que produce la descarga se le denomina carga (h). El plano donde se aloja el orificio generalmente es vertical. La descarga puede producirse libremente a la atmosfera o en forma sumergida hacia aguas abajo.

Se considera que los bordes que forman el perimetro del orificio son delgados y afilados. Las particulas del liquido en la cercania del orificio se mueven en direccion al centro del mismo por efecto de su inercia. En la seccion de flujo, a la salida del orificio, el chorro se contrae; a este efecto se le llama vena contraida. Considerando una distribucion uniforme de velocidades y que el plano de referencia coincida con el centro del orificio, la carga hidráulica (h) se expresa como:

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

donde V es la velocidad media en el orificio. Además se consideran despreciables la velocidad de llegada al canal aguas arriba y el desnivel entre el centro del orificio y el eje de la vena contraida.

De manera que la velocidad está dada por:

$$V = \sqrt{2 g h}$$

que es teórica porque no considera las pérdidas por fricción, de manera que la velocidad real es menor. Generalmente se considera un coeficiente menor a la unidad que ajusta la velocidad por la pérdida por fricción (Cf).

El área hidráulica del orificio es menor que la geométrica debido a la contracción de la vena líquida, por lo que se debe ajustar el área geométrica multiplicando por un coeficiente (Cv).

El gasto se estima mediante la fórmula:

$$Q = C_f C_v A \sqrt{2 g h}$$

El producto de los coeficientes se denomina coeficiente de descarga (C).

$$C = C_f C_v$$

Entonces el gasto resulta ser:

$$Q = CA \sqrt{2gh} \quad (2.8)$$

y además el producto de C y A:

$$CA = \frac{Q}{\sqrt{2gh}} \quad (2.9)$$

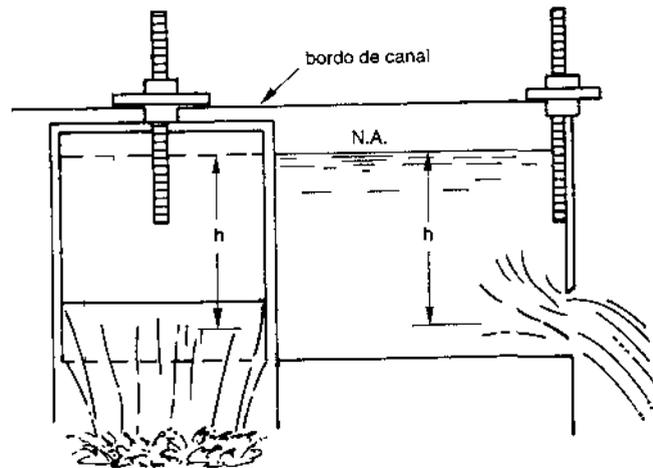
En los siguientes temas se describen métodos para evaluar el coeficiente de descarga (C), esto mediante el proceso de "calibración" de la compuerta.

2.2.1 Compuertas deslizantes

Las compuertas deslizantes se usan por lo general en los canales laterales y sublaterales. El gasto se calcula mediante la fórmula de continuidad que, como se indicó, está en función del área de la sección (A) y de la velocidad (V).

En las compuertas deslizantes a descarga libre (lámina 24) el gasto se calcula mediante la ecuación 2.8; en ésta la carga (h) se considera desde la superficie del agua hasta el centro de la abertura de la compuerta.

Lámina 24. Compuerta deslizante a descarga libre

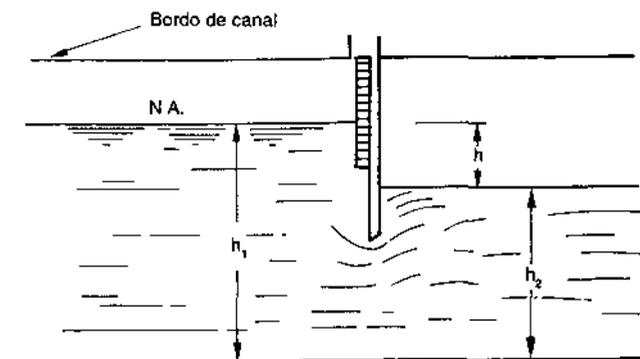


Si la compuerta descarga ahogada (lámina 25), se utiliza la siguiente expresión para obtener el gasto:

$$Q = C A \sqrt{2 g (h_1 - h_2)} \quad (2.10)$$

En la que h_1 y h_2 corresponden a la carga aguas arriba y aguas abajo de la compuerta respectivamente.

Lámina 25. Compuerta deslizante a descarga ahogada



2.2.2 Compuertas tipo Mayo

Este aforador se compone de una estructura que puede construirse de concreto armado o de tabique junteado con mortero de cal-cemento-arena y de una compuerta deslizante de madera de una pulgada de espesor, con perforaciones equidistantes cada cinco centímetros. Todas las dimensiones deben ser respetadas excepto los espesores de pisos y muros (lámina 26).

Su calibración se efectuó relacionando los valores de la abertura (a) con el gasto (Q) y la carga (h) estimándola como la diferencia de los niveles de agua a la entrada y salida de la estructura. Generalmente el valor supuesto es menor que la carga real, por lo que si la estructura trabaja como orificio ahogado el coeficiente de gasto en la fórmula de orificios es a veces mayor a la unidad cuando no hay contracción en la vena líquida y cambio de dirección en el flujo, como en este caso.

Cuadro 10. Fórmulas para obtener el gasto en una compuerta tipo Mayo con plantilla de 60 cm

RANGO DE ABERTURA (m)	FORMULA
desde 0.05 hasta 0.15	$Q = 3.01 a^{1.1} h^{0.5}$
desde 0.16 hasta 0.35	$Q = 3.98 a^{1.25} h^{0.5}$

Las fórmulas de la tabla anterior, que se han graficado en la lámina 27, son válidas únicamente para la compuerta calibrada.

Ejemplo: estimar el gasto que pasa a través de la compuerta anterior para una carga de 0.40 m y una abertura de 0.15 m

Considerando la curva (lámina 27a) se ingresa en el eje vertical con la carga de 0.40 m, trazando una línea horizontal hasta la intersección con la curva correspondiente a la abertura de 0.15 m y a partir de este punto se traza una vertical hasta el eje horizontal, obteniéndose un gasto de 0.237 m³/s

Sustituyendo la abertura de 0.15 m y carga de 0.40 m en la ecuación para aberturas de hasta 0.15 m resulta un gasto de 0.236 m³/s.

Lámina 26. Compuerta tipo Mayo

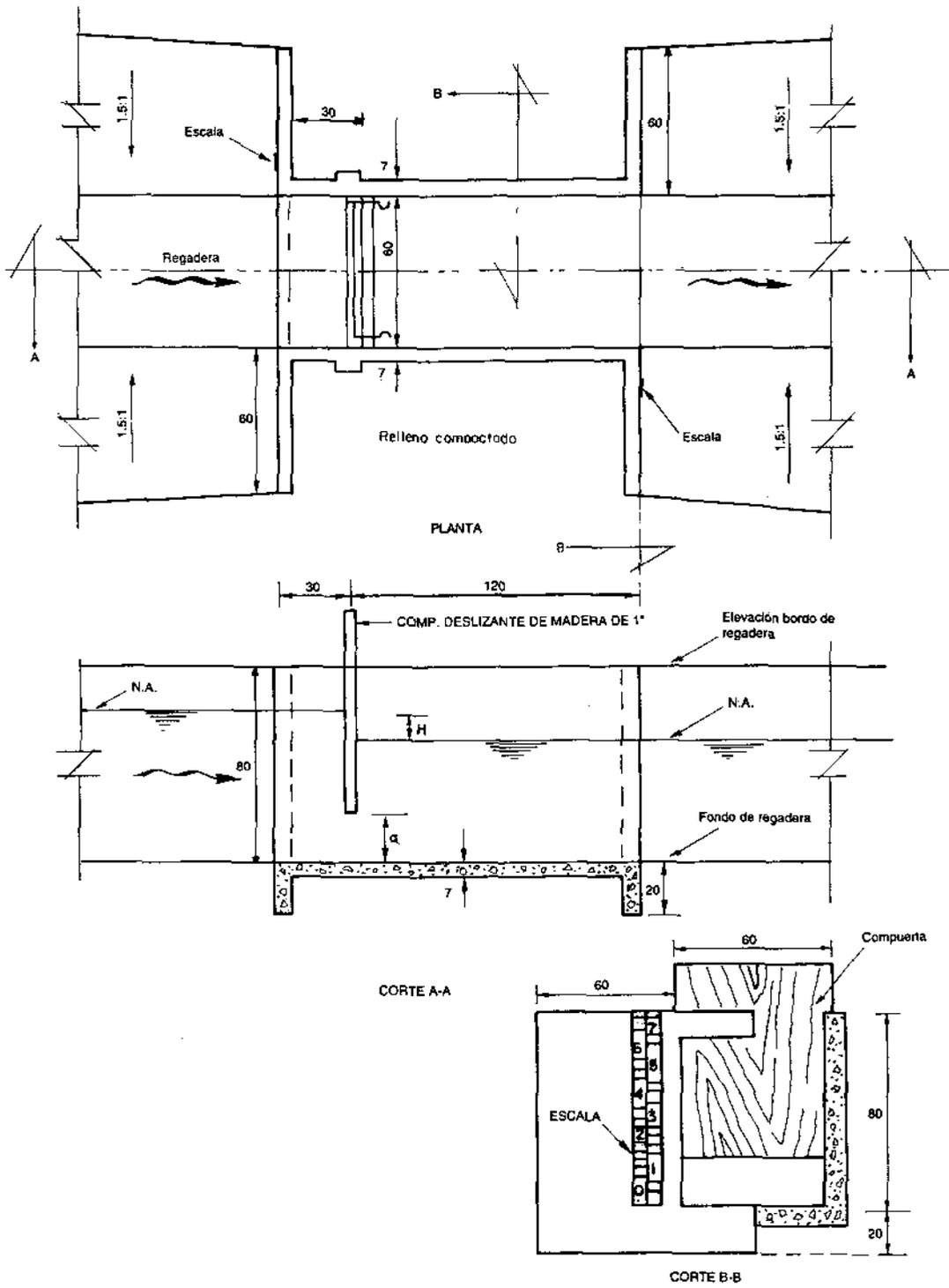
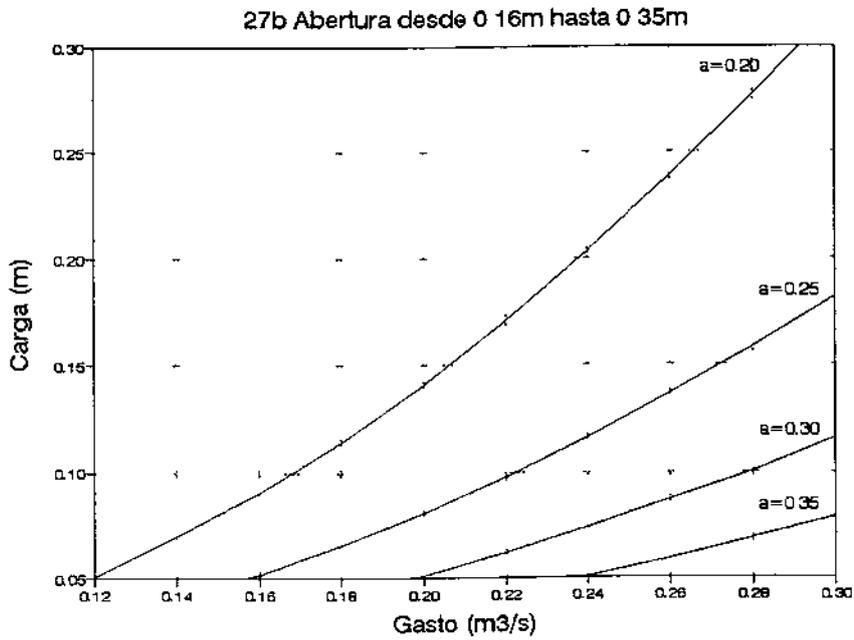
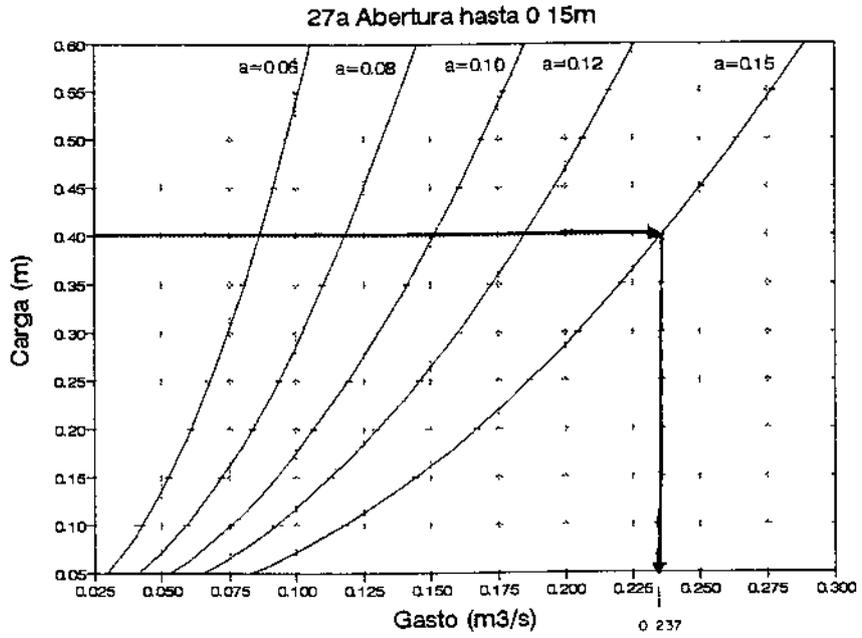


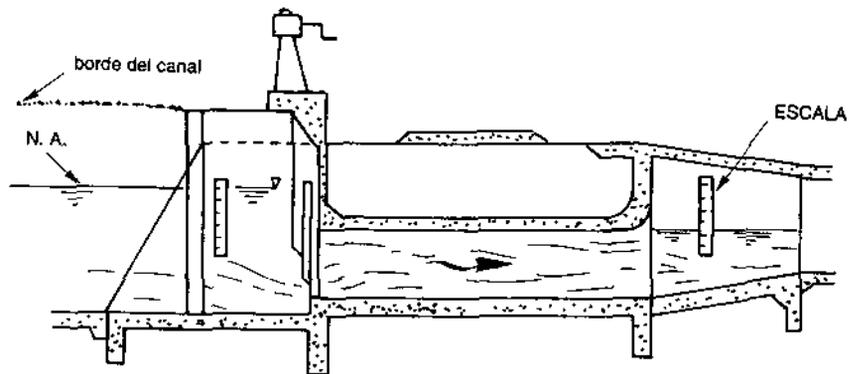
Lámina 27. Curvas carga-gasto para compuerta tipo Mayo



2.2.3 Compuertas rectangulares en bocatomas

Este tipo de estructura se instala generalmente en bocatomas laterales y desagües, normalmente trabaja ahogada. En ocasiones es difícil saber si descarga libre o ahogada ya que no se puede observar el agua a la salida del orificio (lámina 28). Se recomienda provocar ahogamiento. Las medidas más comunes en metros de estas estructuras son: 1.22 x 1.22, 1.067 x 1.067 y 0.915 x 0.915.

Lámina 28. Compuerta rectangular en bocatoma



El gasto en condiciones de descarga libre se calcula por medio de la ecuación (2.8), donde el coeficiente C puede tener valores desde 0.60 hasta 0.90, según las aberturas y cargas que se presenten.

En caso de descarga ahogada se aplica la ecuación (2.10), en la que se considera la carga como la diferencia de niveles de los tirantes aguas arriba (h_1) y aguas abajo (h_2).

Las compuertas de las bocatomas se emplean también como dispositivos de aforo. Para conseguirlo, se requiere "calibrar la compuerta". Como se recordará se tienen dos métodos para procesar la información: el matemático y el gráfico.

Para calibrar la compuerta rectangular se ha empleado el método matemático, el cual fue descrito en el capítulo anterior para el calibrado de una compuerta radial.

Se procede de igual manera, es decir, se toman lecturas de gasto (Q), carga (h) y abertura (a); para correr con estos valores una regresión múltiple, siendo el gasto la variable dependiente y la carga y abertura las variables independientes.

El cuadro 11 muestra un ejemplo de calibración de una compuerta rectangular de 0.60 m de ancho, mediante el método de regresión.

Cuadro 11. Método matemático, compuerta rectangular

Abertura	Carga	Gasto	LN[a]	LN[H]	LN[Q]
a (m)	h (m)	Q (m ³ /s)	β_1	β_2	Y
.05	.05	.01	-2.9957	-2.9957	-4.6052
.05	.15	.02	-2.9957	-1.8971	-3.9120
.05	.25	.03	-2.9957	-1.3863	-3.5066
.10	.05	.03	-2.3026	-2.9957	-3.5066
.10	.10	.05	-2.3026	-2.3026	-2.9957
.10	.15	.06	-2.3026	-1.8971	-2.8134
.15	.05	.06	-1.8971	-2.9957	-2.8134
.15	.10	.09	-1.8971	-2.3026	-2.4079
.15	.15	.11	-1.8971	-1.8971	-2.2073
.20	.05	.09	-1.6094	-2.9957	-2.4079
.20	.10	.13	-1.6094	-2.3026	-2.0402
.20	.12	.14	-1.6094	-2.1203	-1.966

Resultado de la regresión.

Constantes	1.8817	$\beta_0=6.5649$
Error estándar de Y =		0.0519
R cuadrada		0.9966
Número de observaciones		12
Grados de libertad		9
Coefficientes X	$\beta_1=1.5293$	$\beta_2=0.6183$
Error estándar de coef.	0.0098	0.0097

Sustituyendo las constantes β_0 , β_1 y β_2 , en la ecuación:

$$Q = \beta_0 a^{\beta_1} h^{\beta_2}$$

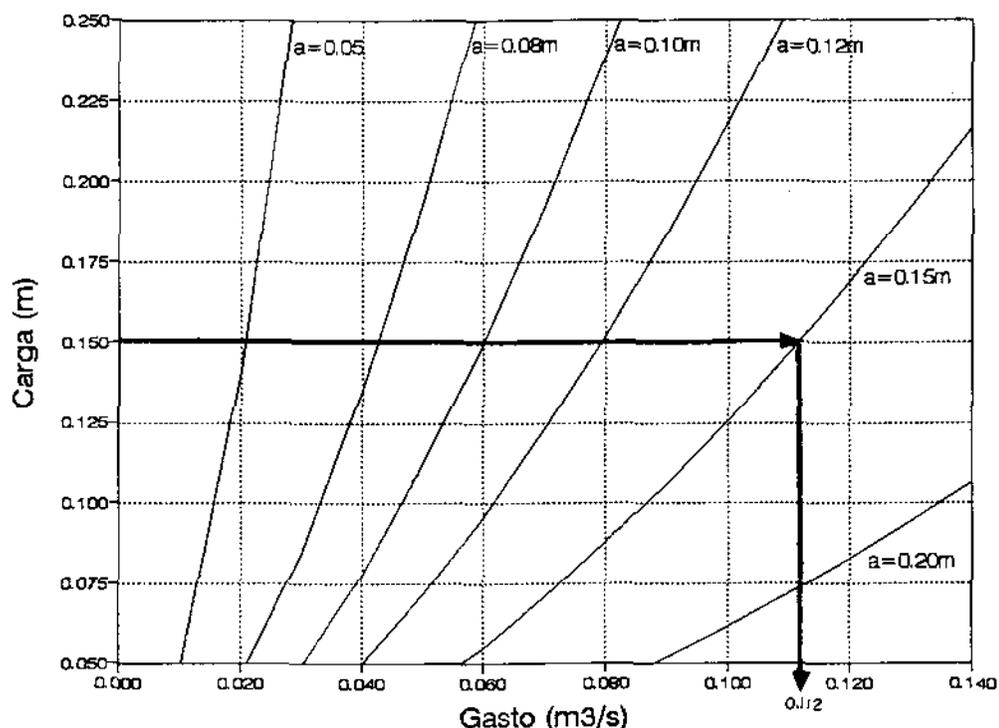
se obtiene la función empírica que proporciona el gasto en función de la carga (h) y abertura (a), para la compuerta rectangular.

$$Q = 6.5649 a^{1.5293} h^{0.6183} \quad (2.11)$$

Donde: Q = gasto (m^3/s)
 a = abertura compuerta (m)
 h = carga aguas arriba (m)

Esta ecuación se ha graficado para diferentes aberturas de compuerta en la lámina 29

Lámina 29. Curvas carga-gasto para compuerta rectangular



Ejemplo: encontrar el gasto que pasa a través de la compuerta rectangular, si se tiene una abertura y carga de 0.15 m cada una.

Considerando la curva (lámina 29), se ingresa en el eje vertical con la carga de 0.15 m trazando una línea horizontal hasta la intersección con la curva correspondiente a la abertura de 0.15 m y a partir de este punto se traza una vertical hasta el eje horizontal, obteniéndose un gasto de $0.112 m^3/s$

Sustituyendo la abertura y carga en la ecuación 2.11, resulta:

$$Q = 6.5649 (0.15)^{1.5293} (0.15)^{0.6183} = 0.112 \text{ m}^3/\text{s}$$

Otra forma gráfica de presentar la ecuación 2.11 es mediante un nomograma que relaciona el gasto (Q) con la carga (h) y abertura (a).

En el disco¹, anexo al presente trabajo, se encuentran los programas NOMO para gastos menores de 1 500 lps y NOMO2 para gastos menores de 15 m³/s; los cuales permiten generar el nomograma para la función empírica, dados sus parámetros β_0 , β_1 y β_2 .

El programa NOMO genera un nomograma con tres ejes horizontales (lámina 30); en el primero se tiene la abertura (a) en cm; en el segundo el gasto (Q) en lps; en el tercero la carga (h) en cm.

El programa NOMO2 genera un nomograma con tres ejes horizontales (lámina 31); en el primero se tiene la abertura (a) en roscas; en el segundo el gasto (Q) en m³/s; mientras que en el tercero la carga (h) en cm.

Para conocer el gasto mediante estos nomogramas se localiza el valor de la abertura (a) en el primer eje y el de la carga (h) en el tercer eje; se unen estos puntos mediante una línea recta y el punto de intersección de ésta con el segundo eje proporciona el gasto.

El nomograma de la lámina 30 se ha obtenido mediante los parámetros de la ecuación 2.11. Si se emplea este nomograma para obtener el gasto, para cierta abertura y carga, se debe obtener el mismo resultado que mediante la familia de curvas (lámina 29).

Ejemplo: obtener el gasto que pasa a través de la compuerta para la abertura y carga del ejemplo anterior, mediante el nomograma (lámina 30).

Se localiza la abertura (a) de 0.15 m en el primer eje y la carga (h) de 0.15 m en el tercer eje, uniendo estos puntos mediante una línea recta, el punto de intersección de ésta y el segundo eje, resulta un gasto de 112 lps.

¹También se encuentra un programa para realizar la regresión múltiple.

Lámina 30. Nomograma auxiliar generado por el programa NOMO

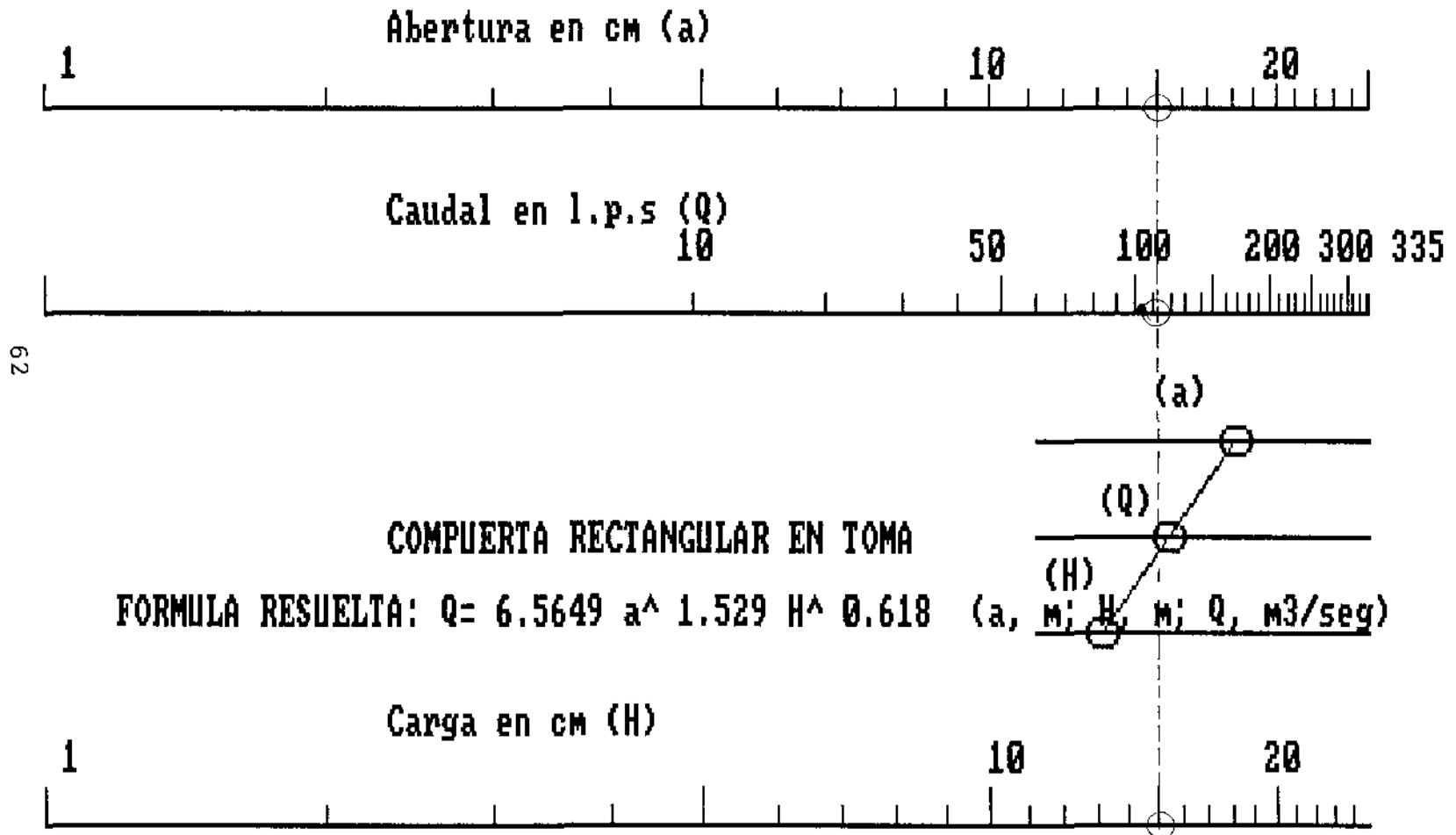
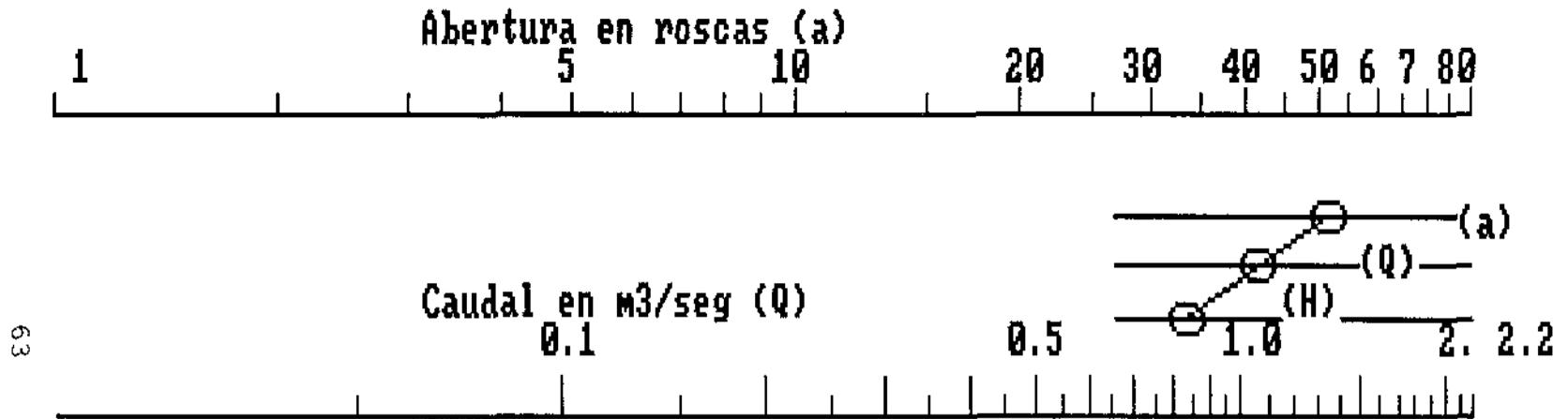
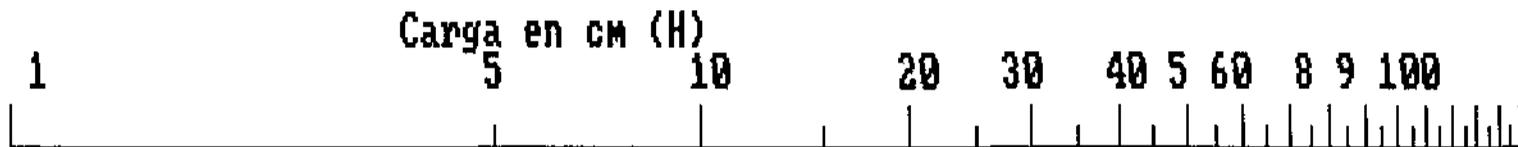


Lámina 31. Nomograma auxiliar generado por el programa NOMO2



COMPUERTA EN CANAL LATERAL

FORMULA RESUELTA: $Q = 0.1030 a^{0.662} H^{0.380}$ (a, roscas; H, m; Q, m3/seg)



2.2.4 Compuertas circulares en bocatomas

Estas compuertas también se instalan en bocatomas laterales y desagües, su funcionamiento es análogo al de las rectangulares descrito anteriormente. Se pueden calibrar mediante los métodos matemático y gráfico.

a) Método matemático

Se ha descrito ampliamente el procedimiento en los temas anteriores. Por ser el mismo para estas compuertas no se realiza ejemplo alguno.

b) Método gráfico

Este se puede emplear para calibrar cualquier tipo de compuerta rectangular o circular.

El nomograma empleado en este método (lámina 32), puede considerarse de uso general en un distrito de riego, abarca la mayor parte de posibilidades que se presentan en el aforo de una compuerta:

gastos	(Q)	desde .05	m ³ /S	hasta 43	m ³ /S
cargas	(h)	desde .01	m	hasta 10	m
abertura	(d)	desde .01	m	hasta 10	m

En este nomograma están ligados a la abertura de la compuerta todos los elementos de la ecuación 2.8, ya que en la misma hoja se están considerando dos nomogramas diferentes superpuestos: uno para compuertas pequeñas con abertura máxima de 1 m (compuertas menores de 1 m); otro para compuertas grandes con aberturas mayores de 1 m (compuertas mayores de 1 m).

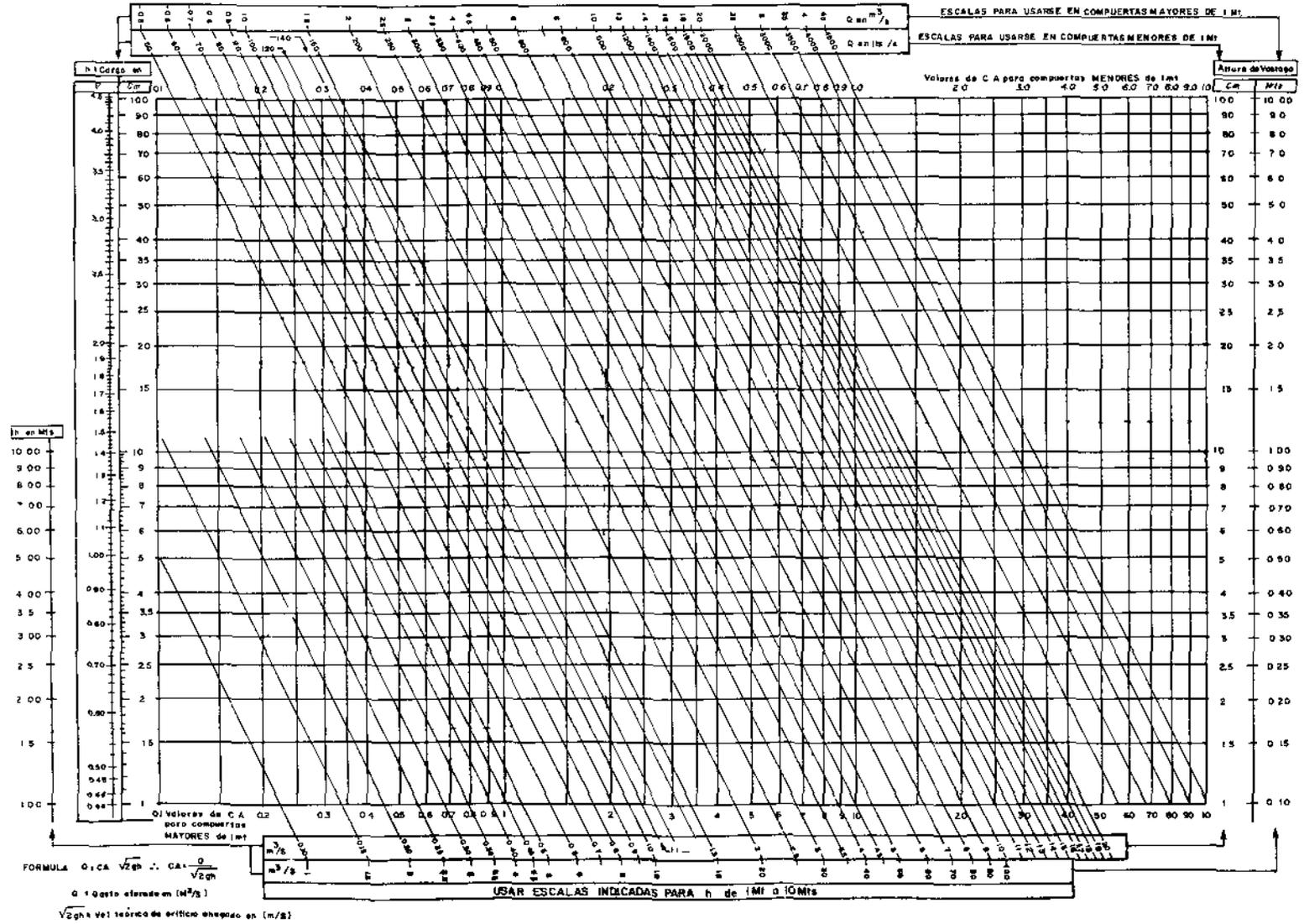
Las diferentes escalas empleadas en el nomograma:

a) Izquierda

Se tienen dos escalas que corresponden a la carga (h). La que está en centímetros representa (h) para "compuertas menores de 1 m". La que está en metros representa (h) para "compuertas mayores de 1 m". La escala que está entre las dos representa la velocidad teórica (V)

Lámina 32. Nomograma de uso general para calibrar una compuerta

DISTRITO DE RIEGO N° _____ UNIDAD _____ ZONA _____ SEC DE RIEGO _____ CANAL _____ KM _____ COMPUERTA TIPO _____



65

b) Superior

Las dos primeras escalas que representan el gasto (Q) se emplean únicamente para cargas (h) menores de 1 m. La primera representa el gasto en m³/s y únicamente es para "compuertas mayores de 1 m"; la segunda representa el gasto en lps y únicamente se usa en "compuertas menores de 1 m". La tercer escala representa los valores de CA que varían desde 0.01 hasta 10 y se utiliza únicamente en "compuertas menores de 1 m".

c) Derecha

Se tienen dos escalas, ambas representan la abertura (a) de la compuerta, medida mediante la "altura del vástago" u otro dispositivo con que se dote la compuerta; la escala que está en centímetros se emplea para "compuertas menores de 1 m", la que está en metros para "compuertas mayores de 1 m".

d) Inferior

La primer escala representa los valores de CA para "compuertas mayores de 1 m". Las dos últimas escalas representan el gasto (Q) en m³/s y se emplean únicamente para cargas mayores de 1 m, la segunda se utiliza sólo en "compuertas menores de 1 m", la tercera únicamente en "compuertas mayores de 1 m".

Como se recordará, en la fórmula:

$$Q = A C \sqrt{2 g h}$$

El gasto (Q) depende de tres variables: área (A), coeficiente de descarga (C) y carga (h); además de esto, el área (A) y coeficiente de descarga (C) dependen de la abertura y geometría de la compuerta, pudiendo obtenerse como producto para las diferentes aberturas, en lugar de hacerlo en forma aislada, evitándose cálculos. Los valores de CA se obtienen mediante la expresión 2.9, para las diferentes aberturas (a) de la compuerta, midiendo el gasto (Q) y la carga (h) como diferencia de niveles aguas arriba y abajo de la compuerta.

Con los valores obtenidos de (CA) se dibuja una curva que es característica únicamente para esa compuerta, siendo las abscisas los valores de (CA) y las ordenadas las aberturas (a), con esta gráfica se conocen los valores de CA en función de la abertura.

Los valores de CA pueden calcularse fácilmente llenando el cuadro 12. En éste, las dos últimas columnas corresponden al producto (CA) y abertura (a) respectivamente, que sirven para dibujar la curva

característica de la compuerta circular, la cual se puede construir de dos formas.

Cuadro 12. Determinación del producto CA, compuerta circular

Zona 2		Sección de riego: 3		Canal:sur km 30+000			
Compuerta tipo: Miller de $\phi = 91$ cm							
AFORO NUM.	h_1 (m)	h_2 (m)	h (m)	V m/s	Q m^3/s	CA m^2	a (cm)
1	2	3	4 = 2-3	5	6	7 = 6/5	8
1	0.28	0.68	0.60	3.431	0.072	0.021	3.0
2	1.21	0.69	0.52	3.194	0.099	0.031	5.0
3	1.18	0.71	0.47	3.037	0.175	0.058	10.0
4	1.12	0.73	0.39	2.766	0.387	0.140	20.0
5	1.09	0.75	0.34	2.582	0.671	0.260	30.0
6	1.00	0.76	0.24	2.170	0.720	0.345	40.0
7	0.97	0.78	0.19	1.956	0.802	0.410	50.0
8	0.96	0.80	0.16	1.772	0.879	0.500	60.0
9	0.96	0.81	0.15	1.715	0.958	0.560	70.0
10	0.92	0.83	0.09	1.327	1.004	0.750	80.0

b.1) Emplear la curva (CA) vs. (a)

Después de graficar (CA) en el eje de abscisas y la abertura (a) en el de ordenadas (lámina 33), con la abertura (a) se entra en la gráfica y se conoce el producto (CA); el gasto (Q) se calcula sustituyendo en la ecuación 2.8 este producto y la carga (h), medida durante el aforo como la diferencia de tirantes, aguas arriba (h_1) y aguas abajo (h_2).

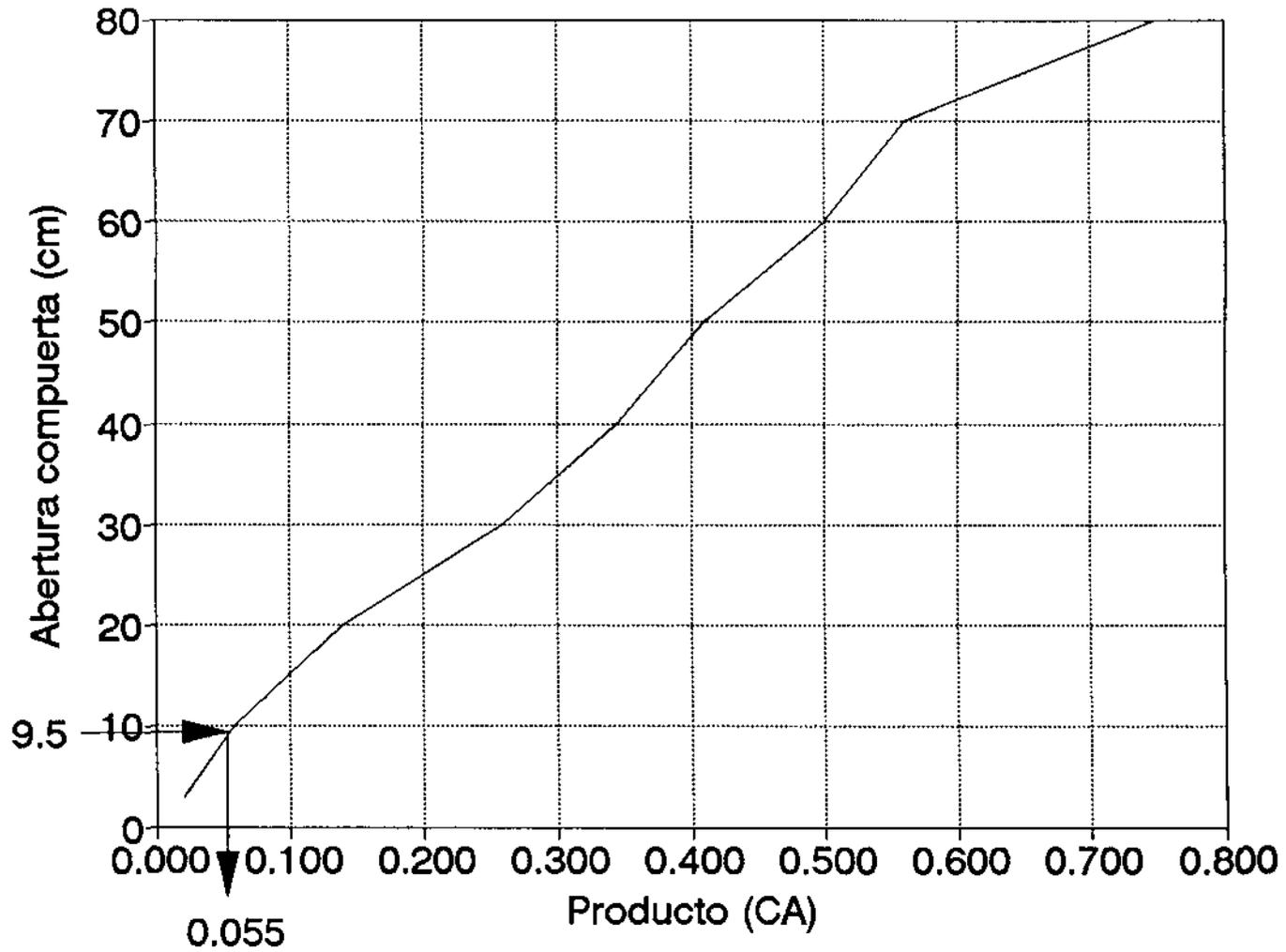
Ejemplo: Si en una compuerta Miller se tiene una abertura $a=9.5$ cm y una diferencia de tirantes $h=33$ cm, evaluar el gasto (Q); con esta abertura (a) se ingresa en la gráfica (lámina 33) obteniéndose el producto $CA= 0.055$. Sustituyendo h y CA en Ec.2.8, resulta:

$$Q = C A \sqrt{2gh} = 0.055 \sqrt{2 \times 9.81 \times 0.33}$$

$$Q=0.1399 \text{ m}^3/\text{s} = 139.9 \text{ lps}$$

Este ejemplo se discute más ampliamente en el siguiente inciso.

Lámina 33. Gráfica (CA) vs. (a) de la compuerta circular



b.2) Construir la curva (CA) vs. (a) en el nomograma.

Para evitar cálculos se construye la curva (CA) Vs (a) sobre el nomograma de la lámina 32, resultando un segundo nomograma (lámina 34) que es de uso exclusivo de la compuerta circular que se está calibrando. El cuadro 13 muestra la comparación entre el gasto estimado mediante el nomograma y el aforado.

Cuadro 13. Comparación del gasto obtenido gráficamente, respecto al aforado

Carga h(cm)	Altura vástago abertura (cm)	Gasto lps de gráfica	Gasto lps medido	diferencia (%)
18.0	12.1	140	145	(-) 3.45
165.0	25.0	1 100	1 173	(-) 6.22

Método a seguir por el aforador o canalero para obtener el gasto necesario en la compuerta Miller $\phi = 91$ cm, mediante el nomograma para uso exclusivo de esta compuerta (lámina 34). Características: compuerta menor de 1 m; gasto necesario 140 lps.

Partiendo de la suposición de tener la compuerta cerrada, se observa el tirante aguas arriba $h_1 = 73$ cm, se sabe que al abrir la compuerta, aguas abajo del canal se comienza a tener un tirante (h_2), por la experiencia anterior en el manejo del canal se supone de 40 cm. Teniendo en cuenta esto, se considera una carga $h = 33$ cm para iniciar un ler. tanteo en el nomograma.

ler. tanteo

1) En la escala para cargas menores de un metro se busca $h = 33$ cm (punto A).

2) Se traza por este punto una horizontal hasta encontrar la diagonal que representa el gasto necesario $Q = 140$ lps (punto B).

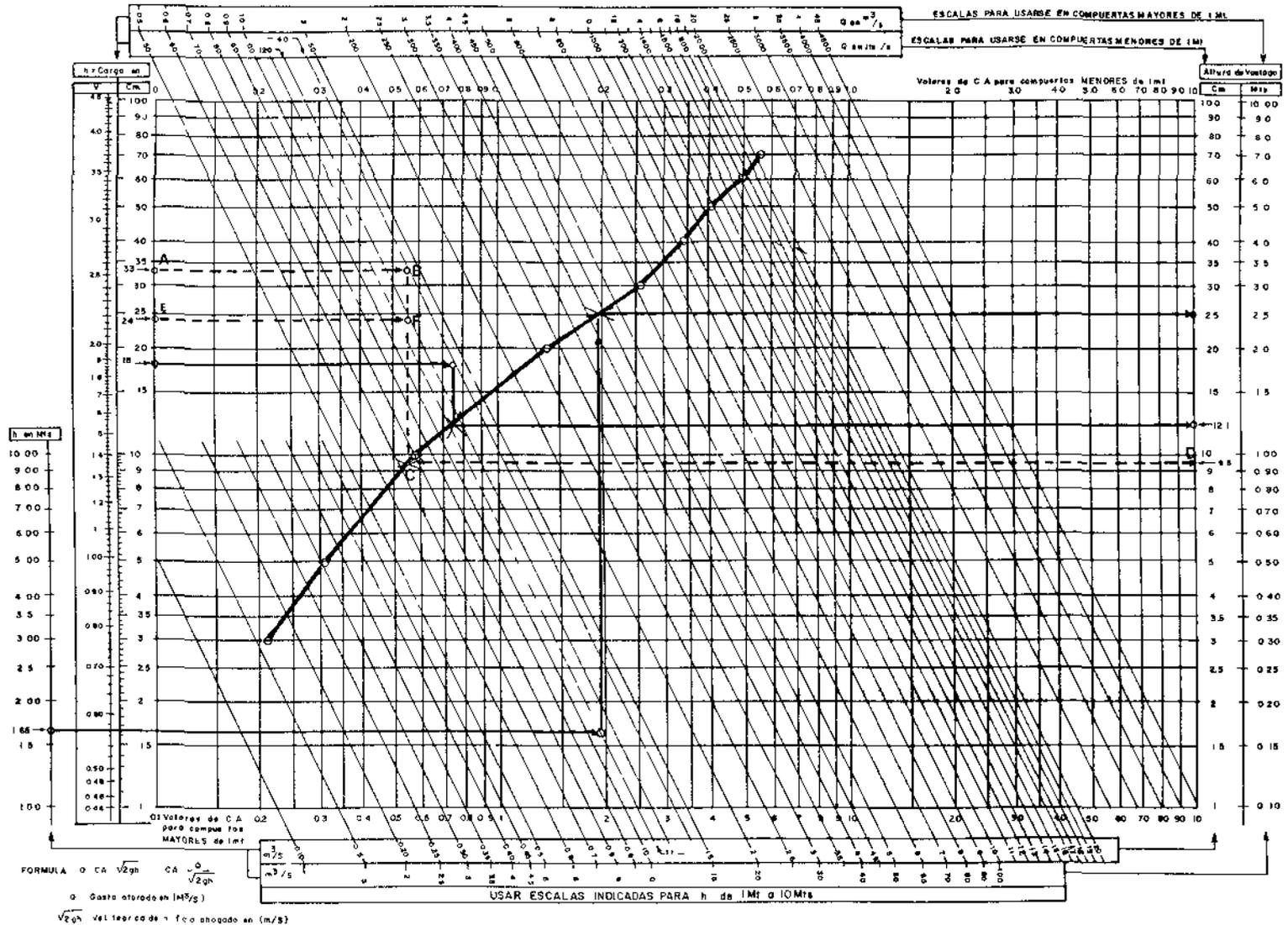
NOTA: Debe tomarse la escala de gasto apropiada que en este caso es la inferior del margen superior del nomograma, para "a" y "h" menor de un metro.

3) Sobre la diagonal del gasto, se traza una vertical por este punto hasta tocar la curva característica (punto C).

4) En este punto, se traza una horizontal hasta la intersección con la escala de altura vástago $a = 9.5$ cm (punto D).

Lámina 34. Nomograma para compuerta circular

DISTRITO DE RIEGO N° 03 (TULA, HGO) UNIDAD 1 ZONA 2 SEC DE RIEGO 3 CANAL SUR KM 30+000 COMPUERTA TIPO 91cm de Diam



- 5) Se abre la compuerta a los 9.5 cm obtenidos.
- 6) Esperar a que se establezca el régimen de la corriente.
- 7) Una vez establecido, checar si el dato supuesto ($h_1 - h_2 = h = 33$ cm) coincide con el dado por la compuerta. Si es así, la compuerta estará trabajando adecuadamente y no se hacen más tanteos.
- 8) De no ser así, se ejecuta otro tanteo.

Si los datos arrojados por el 1er. tanteo fueron: carga $h = 24$ cm (diferente de la supuesta $h = 33$ cm); vástago $a = 9.5$ cm (igual por ser el primer movimiento.)

El hecho de tener una carga (h) menor a la supuesta, indica que está pasando menor gasto que el requerido y puede comprobarse usando el nomograma. El procedimiento a seguir será en sentido inverso al ejecutado para el 1er. tanteo:

- i) Teniendo como origen la altura del vástago $a = 9.5$ cm (punto D), se traza una horizontal hasta la intersección con la curva característica (punto C).
- ii) En este punto trazar una vertical hasta la intersección con la horizontal que tenga como origen la carga $h = 24$ cm (punto E).
- iii) Esta última intersección al relacionarse con la escala de gastos, indica el gasto que pasa bajo las condiciones de $h = 24$ cm y $a = 9.5$ cm, que resulta ser $Q = 120$ lps.
- iv) El gasto obtenido $Q = 120$ lps es inferior al requerido $Q = 140$ lps, por lo que para igualarlo es necesario abrir más la compuerta. Si el gasto (Q) arrojado en el primer tanteo fuera mayor, deberá ejecutarse exactamente lo contrario, es decir, cerrar la compuerta.

Nótese que para determinar el gasto que escurre por la compuerta en un momento dado, sólo se deben seguir los pasos i), ii) y iii); naturalmente partiendo de la abertura (a) y carga (h) proporcionados por la compuerta.

2do. tanteo

Continuando el ejemplo, al abrir más la compuerta aumenta el tirante aguas abajo, por lo tanto la carga (h) resultante será menor que la del 1er. tanteo. Puede iniciarse este 2do. tanteo

haciendo una corrección a la carga (h) resultante del primero. Esta corrección se supone de -6 cm, por lo que la nueva carga resulta h=18 cm

9) Partiendo de h=18 cm, trazar una horizontal hasta la intersección con la diagonal del gasto necesario.

10) En este punto de intersección trazar una vertical hasta la curva característica.

11) De esta intersección trazar una horizontal hasta localizar la nueva altura del vástago a=12.1 cm.

12) Abrir la compuerta a esta altura y esperar que se establezca el régimen de la corriente.

13) Una vez establecido éste, si la carga supuesta (h=18 cm) coincide con la real, la compuerta funciona correctamente.

14) De no ser así, continuar los tanteos hasta que la carga supuesta sea igual a la dada por la compuerta.

El hecho de haber ajustado la compuerta para el gasto deseado, no implica que éste se conserve fijo, si no que estará sujeto a cambios que se pueden presentar tanto en el tirante aguas arriba (h_1), como en el tirante aguas abajo (h_2). Si esto ocurre, variará la carga (h) y por lo tanto el gasto (Q). Una variación de 1 o 2 cm en la carga establecida, no será motivo de nuevos ajustes en la compuerta.

Otro ejemplo, utilizando la misma curva característica pero con cargas superiores a un metro:

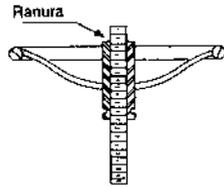
Obtener un gasto de $Q=1.100 \text{ m}^3/\text{s}$, iniciando los tanteos con h=1.55 m, se supone que se han hecho los tanteos indicados en el ejemplo anterior, este gasto podría haberse obtenido con un h=1.65 m y una altura de vástago a=25 cm., según se muestra en el nomograma.

Notese que el gasto se ha localizado tomando en cuenta la escala para carga (h) mayor de un metro y abertura (a) menor de un metro.

2.2.5 Compuertas dobles

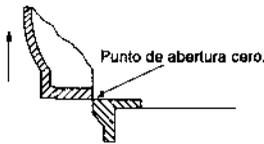
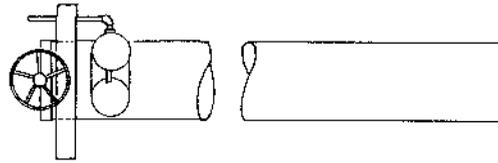
Uno de los dispositivos de aforo que tienen interés para los canales o sistemas que dan servicio de riego, es el de compuertas dobles (CALCO, ARMCO). Es una forma combinada de compuerta de toma y dispositivo de medición (lámina 35).

Lámina 35. Compuerta doble CALCO

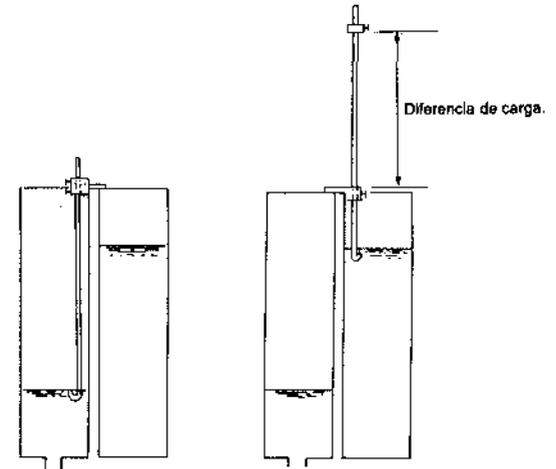


Ranura de vástago en la parte superior de la rueda cuando la compuerta está en el punto cero de la abertura.

DETALLE A



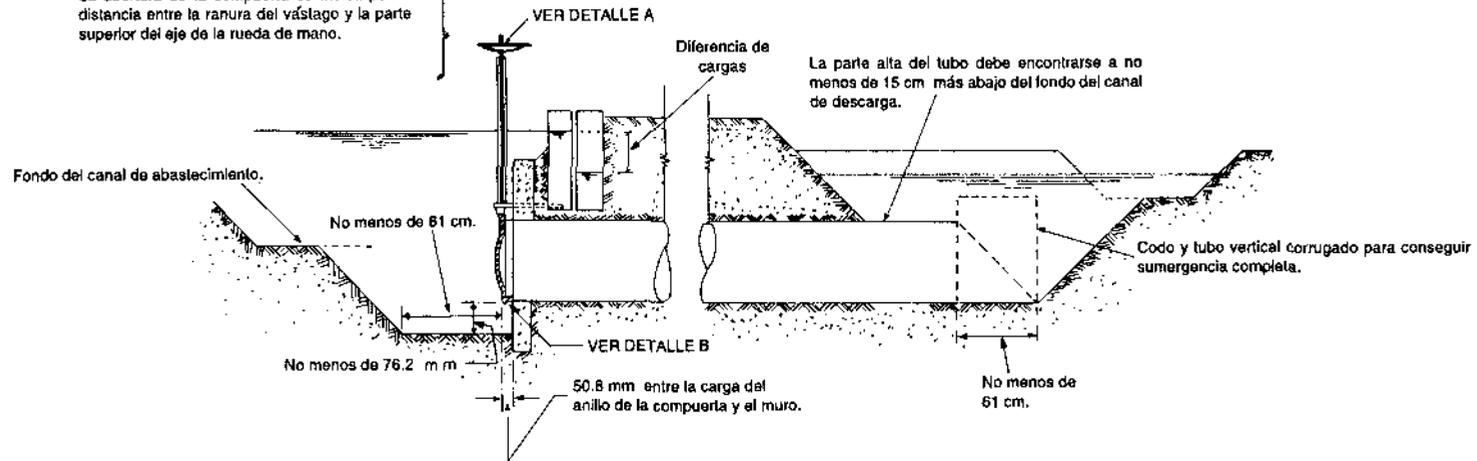
DETALLE B



Empleo del gancho medidor, para determinar la diferencia de niveles de agua.

73

La abertura de la compuerta se indica por la distancia entre la ranura del vástago y la parte superior del eje de la rueda de mano.



FUERA DE ESCALA

Esta estructura consta de una compuerta deslizante, equipada con pozos medidores que muestran la diferencia de una altura, entre el caudal del agua o depósito y la de tubo de descarga colocada a 30 cm de la cara de la compuerta, esta diferencia de carga es medida convenientemente por medio de un medidor de gancho y con ella se encuentra el valor del gasto, empleando tablas específicas (lámina 36).

La operación del medidor tipo compuerta, requiere que los orificios de salida de los tubos en las tomas siempre se encuentren sumergidos.

La exactitud de este método de medición depende de que los niveles en los canales o depósito se mantengan constantes. Este diseño de compuerta está hecho con diámetros que varían desde 20.32 hasta 182.88 cm (8 hasta 72 pulgs).

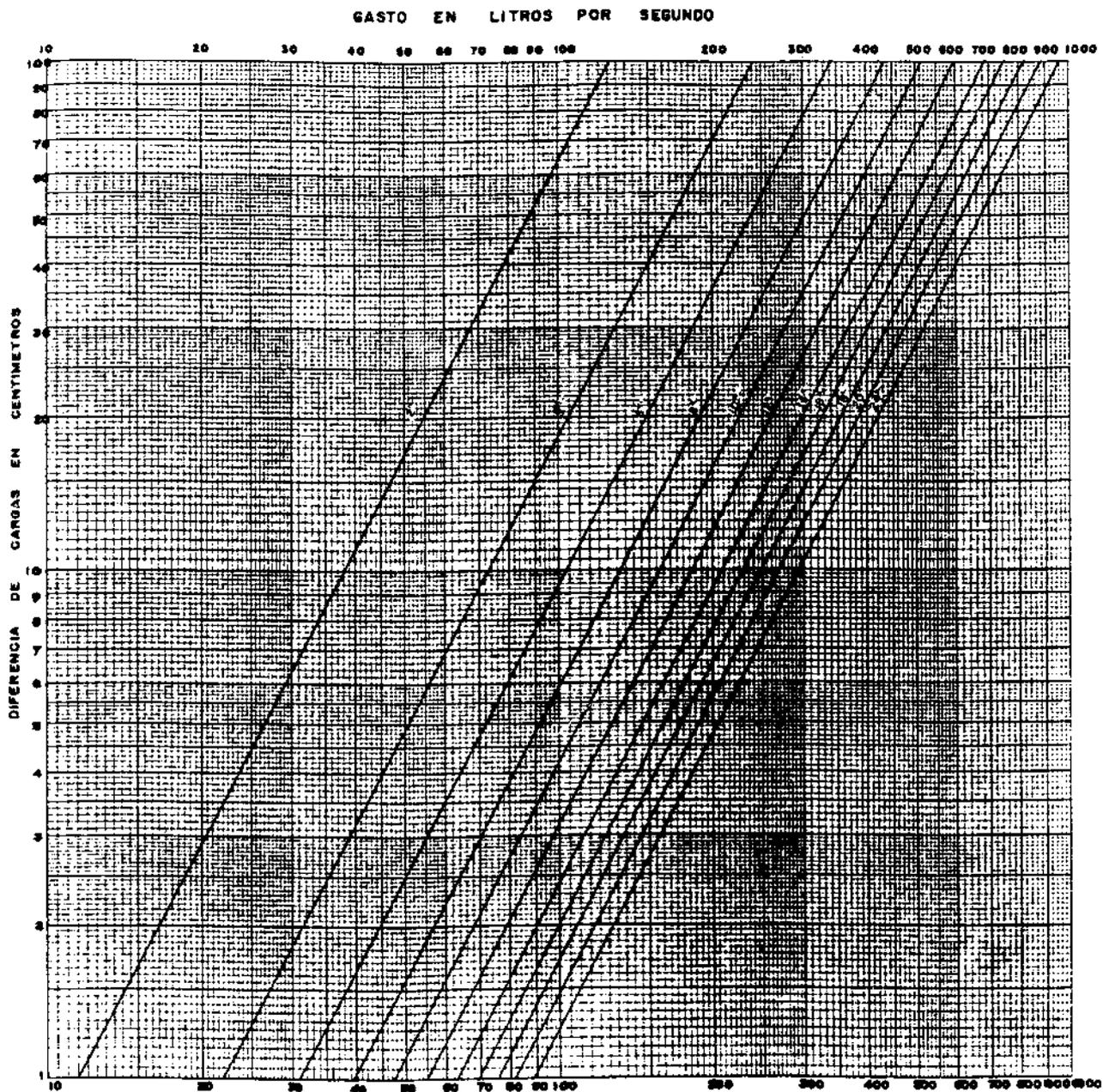
Ejemplo: Se tiene una diferencia de cargas de 21 cm y una abertura de 15.24 cm (6 pulgs); encontrar el gasto.

Se ingresa en el eje de ordenadas de la gráfica 36, que es la diferencia de cargas. Para este ejemplo (21 cm), este punto se desplaza horizontalmente hasta la línea inclinada correspondiente a las aberturas, buscando 15.24 cm (6") y luego se desplaza verticalmente hacia arriba o abajo para encontrar el gasto, $Q=150$ lps.

2.3 Aforadores de régimen crítico

Un aforador a régimen crítico consiste esencialmente de una contracción lateral en un canal a superficie libre. La contracción se forma por una elevación de la plantilla y el estrechamiento de la sección transversal. Entre las ventajas de este tipo de estructura, está la de transportar material en suspensión o flotación sin causar ningún efecto adverso en su funcionamiento; en otros tipos de estructuras el material se deposita aguas arriba, afectando la sección de entrada o la calibración, siendo por ello necesario mantener un cuidado constante de la estructura. Para diversas formas de geometría se puede calcular la relación carga-gasto sin necesidad de calibraciones en campo o laboratorio. Soportan límites de ahogamiento altos y en general son estructuras ideales de medición cuando la pérdida de carga permitida es reducida.

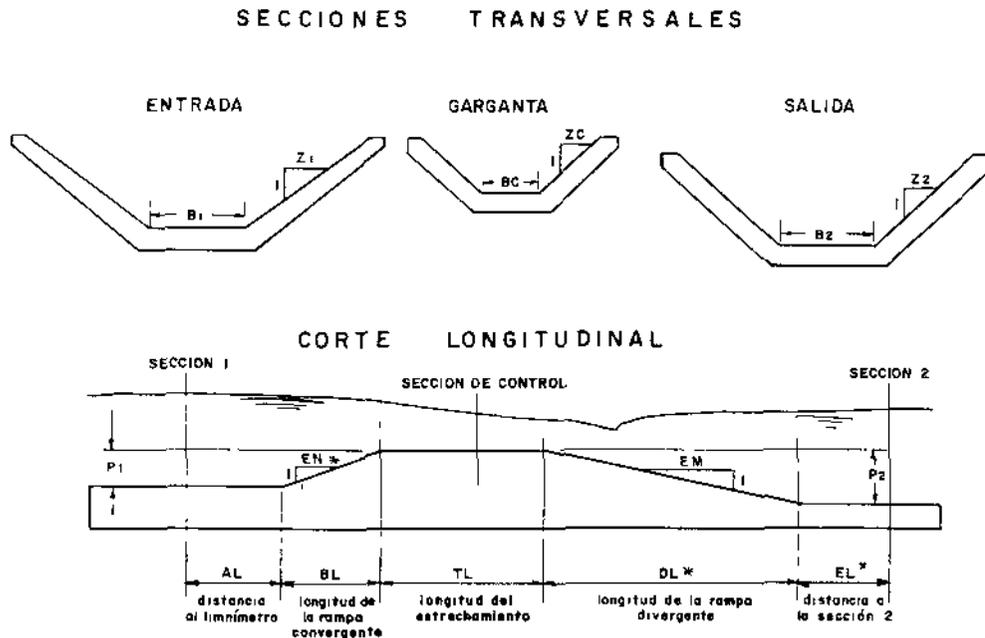
Lámina 36. Gastos para diversos grados de abertura. Compuerta CALCO



2.3.1 Aforadores de garganta larga

El aforador de garganta larga es básicamente una contracción construida dentro de un canal, donde se dan las condiciones hidráulicas para que se presente el flujo crítico que se encuentra en la garganta. La contracción puede ser en el fondo del canal, en las paredes, taludes o en ambos (según lámina 37). El vertedor de pared gruesa es un caso particular de aforador de garganta larga, en el que se tiene contracción sólo en el fondo del canal.

Lámina 37. Datos para el programa de cómputo del aforador de garganta larga



En este tipo de aforadores el flujo es virtualmente paralelo a la garganta. Esta condición, se puede tratar analíticamente y establecer las relaciones carga-gasto en forma directa, para que el proyectista pueda escoger libremente las dimensiones que satisfagan los requerimientos específicos de diseño.

El empleo exitoso de aforadores de garganta larga depende en buena medida del cuidado que se dé a su construcción. Por esta razón, es conveniente hacer diseños estándar que sean construidos en condiciones controladas, para lograr que sus dimensiones estén dentro de los rangos de tolerancia aceptados y que en general no excedan en más de 2 mm las medidas de las principales dimensiones (plantillas, longitud de garganta, taludes). Al no cumplirse este

requerimiento de precisión, se deberán medir las secciones transversales a intervalos cercanos y después tomar promedios para calcular los gastos.

Una característica muy importante en los aforadores de garganta larga es su insensibilidad a los tirantes aguas abajo. El aforador de garganta larga puede tolerar grandes tirantes sin que sean afectadas las condiciones de flujo en la sección crítica.

Cuenta con la ventaja de poderse calibrar analíticamente, por lo que no requiere de calibración en laboratorio o in-situ; da también la posibilidad de hacer correcciones posteriores a la construcción de la estructura, lo que es útil en caso de sufrir alguna modificación al ser instalado.

Algunas características importantes de este tipo de aforadores:

- a) Si el régimen crítico se presenta en la garganta, es posible calcular una tabla de calibración con un error no mayor de 2% para cualquier combinación de garganta y canal de llegada prismático.
- b) La sección de la garganta puede diseñarse de tal manera que permita medir con exactitud el rango completo de gastos esperados.
- c) La pérdida de energía es mínima y le corresponde una relación única entre la carga hidráulica aguas arriba, medida con respecto a la base de la garganta y el gasto.
- d) La pérdida de energía puede estimarse con gran exactitud sobre cualquier canal.
- e) Se tienen pocos problemas con materiales flotantes, debido a que la transición de entrada es gradual y convergente.
- f) Se ha observado en campo, que tales aforadores pueden diseñarse para que los sedimentos transportados pasen por un canal a régimen subcrítico.
- g) Resulta posible calcular una tabla de calibración una vez construida la estructura, para ajustar las dimensiones reales de la obra y, de ser necesario, se pueda variar la forma de la garganta.
- h) En condiciones hidráulicas y de entorno similares, estos aforadores resultan, para gastos grandes, los más baratos en construcción para aforos exactos.

Es importante que el aforador cuente con una transición del canal de aproximación a la garganta, de otro modo podrían provocarse fuertes pérdidas de carga, además de curvaturas en las líneas de corriente del flujo que impiden el análisis y dificultan el diseño.

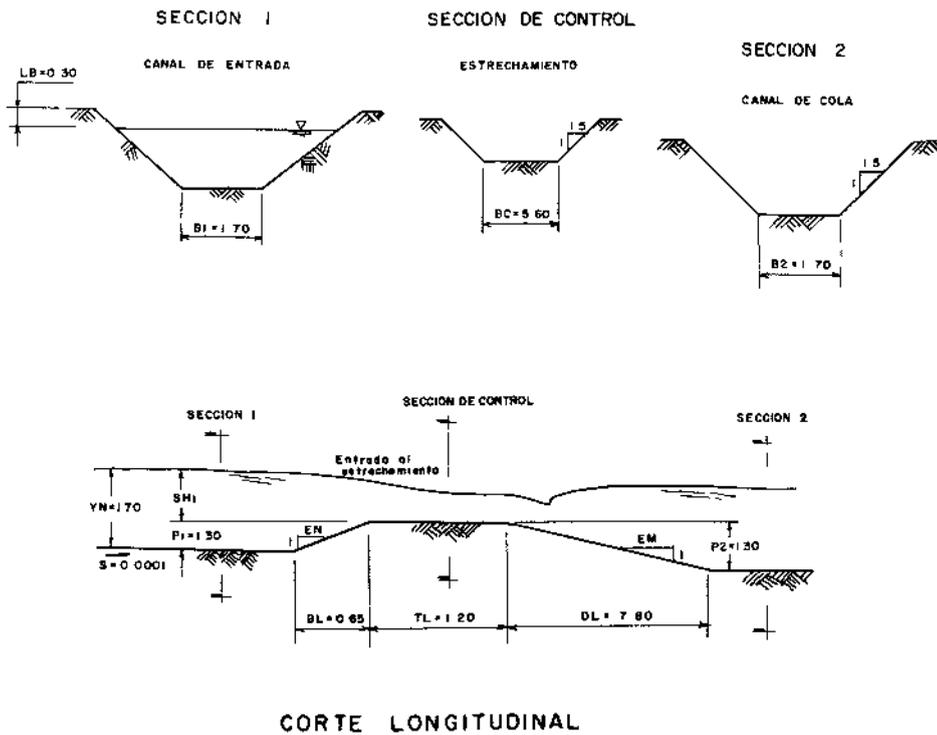
La transición de salida también juega un papel importante en el funcionamiento de las estructuras, por lo que es conveniente hacer un diseño cuidadoso de las mismas. Es en la salida donde se presentan las mayores pérdidas de carga; allí el flujo pasa de un estado crítico a subcrítico. De una transición de salida adecuada depende que la pérdida de energía sea mínima.

El IMTA ha desarrollado un sistema de cómputo que permite diseñar y calibrar un aforador de garganta larga, de acuerdo a las características hidráulicas del canal, lo cual facilita su diseño.

La lámina 38 muestra las características geométricas de un aforador de garganta larga, instalado en un canal trapezoidal.

Lámina 38. Geometría del aforador y canal

Gasto máx=5.0 m³/s n (Manning)=0.014



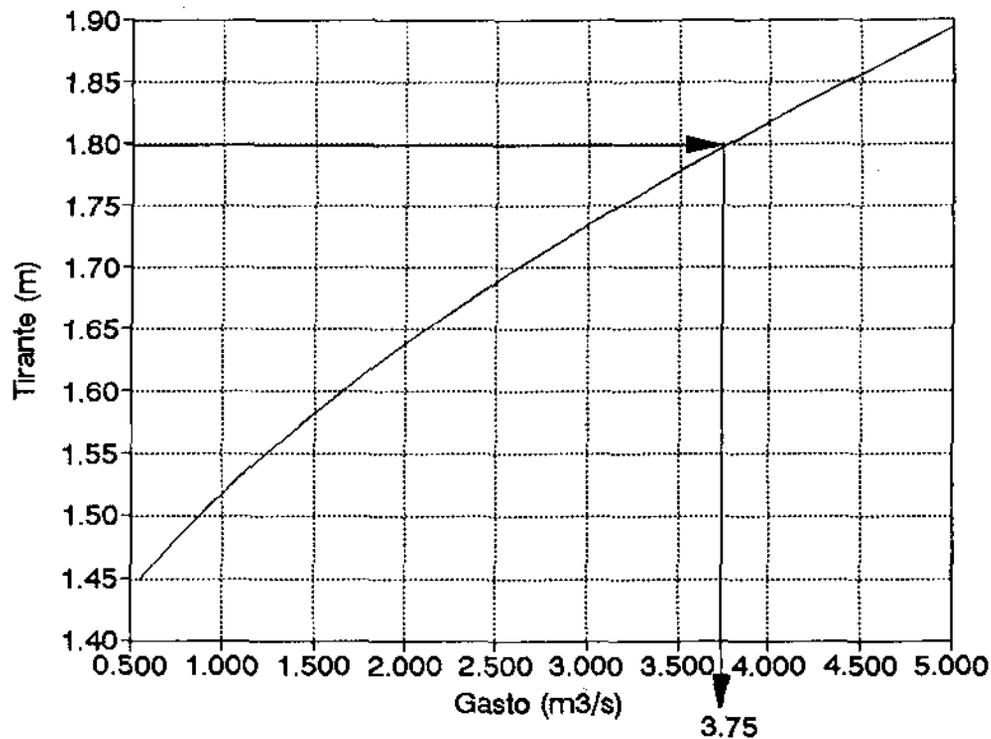
La ecuación que describe el comportamiento de este medidor en particular es la siguiente:

$$Q = 11.5586 - 21.0966 h + 9.3127 h^2 \quad (2.12)$$

Donde: h =Carga aguas arriba (m)
 Q =Gasto (m^3/s)

La ecuación 2.12 se ha graficado, obteniéndose la curva calibrada carga-gasto (lámina 39), la cual permite conocer el gasto dada la carga (h), aguas arriba de la estructura.

Lámina 39. Curva calibrada carga-gasto del aforador



Si en la escala se lee un tirante (h) de 1.8 m, el gasto obtenido mediante la curva (lámina 39) resulta de $3.75 m^3/s$.

Sustituyendo el tirante (h) en la ecuación 2.12 resulta:

$$Q = 11.5586 - 21.0966 (1.8) + 9.3127 (1.8)^2 = 3.758 m^3/s$$

Nótese la precisión que se obtiene con la ecuación, pero con fines prácticos es mejor emplear la curva.

2.3.2 Aforadores de garganta corta Parshall

En esta estructura la superficie del agua presenta una curvatura considerable y no es paralela a la garganta del aforador. Esto constituye una desventaja, ya que en contraposición con los de garganta larga, la relación carga-gasto no puede establecerse de antemano. Por esta razón se recurre a calibraciones de laboratorio y campo; esto a su vez, restringe la elección de dimensiones, por ello es conveniente sujetarse a medidas estándar.

Una ventaja de estos aforadores sobre los de garganta larga es su menor tamaño y bajo costo. El principio de funcionamiento es el mismo del aforador de garganta larga, es decir, se tiene la presencia de flujo crítico en la garganta del aforador. Sin embargo, en este caso no se presenta flujo recto, paralelo y las distribuciones de presión no son semejantes a la hidrostática. Otro trabajo laborioso se presenta en el cálculo de las pérdidas de energía, por estas razones se depende de la calibración directa ya sea en campo o en laboratorio. Para esto, lo más práctico es establecer diseños estándar, con dimensiones predeterminadas que eviten adecuarse a condiciones particulares de aplicación.

El aforador Parshall es una estructura de garganta corta, con las siguientes ventajas:

- a) El diseño de la estructura es simple y, por lo tanto, su construcción es sumamente económica.
- b) Puede estimarse el gasto con una buena precisión, ya que cuando trabaja ahogada, el error no pasa del 5%, y cuando trabaja libremente el error es menor del 3%.
- c) Los sedimentos que trae el agua no se depositan, ya que la transición de salida aumenta la velocidad, eliminando los azolves en la estructura.
- d) La velocidad de llegada no influye en el cálculo del gasto.
- e) La pérdida de carga es mucho menor que en otros medidores.

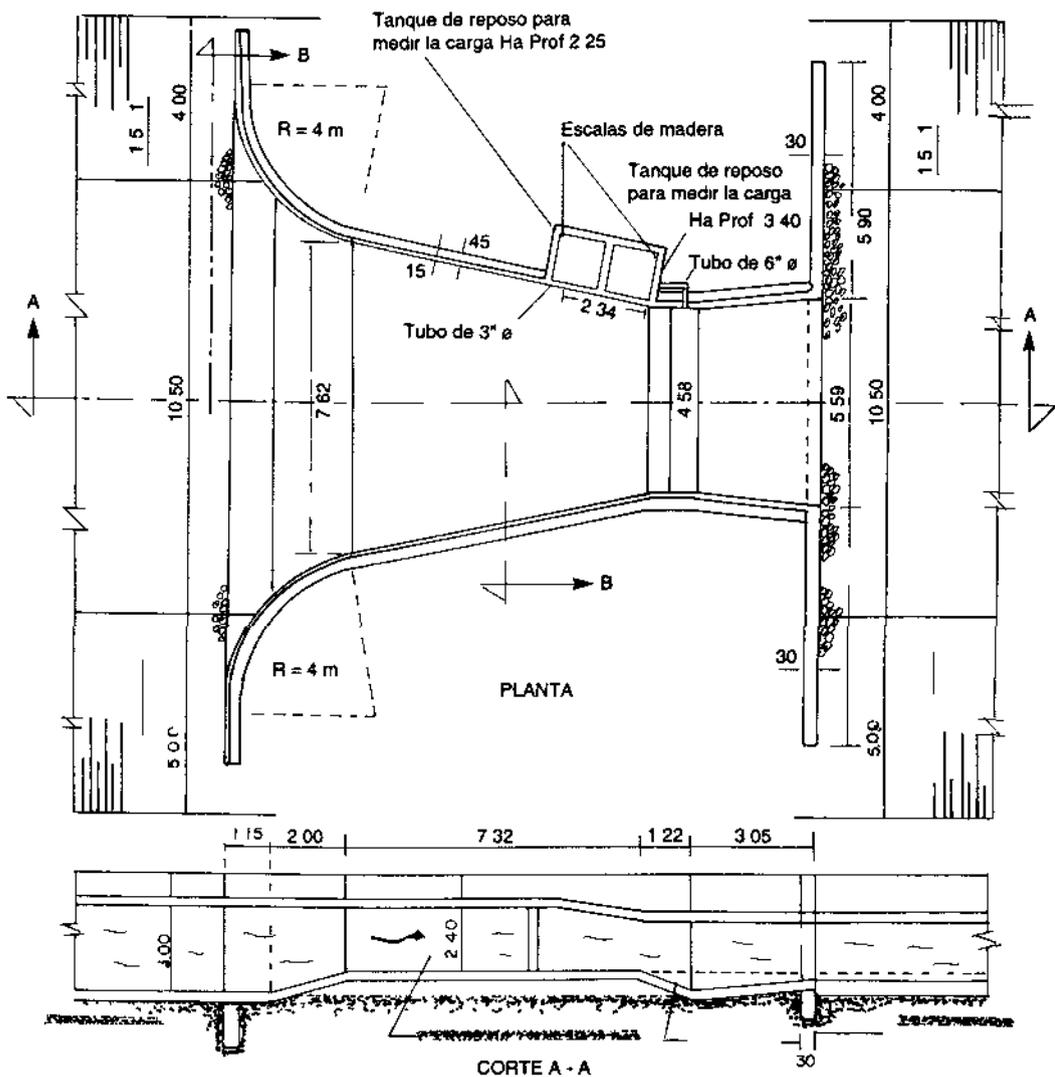
El medidor Parshall está constituido por tres partes fundamentales: entrada, garganta y salida (lámina 40). La estructura tiene dos tanques de reposo que sirven para medir la carga (H_a), a la entrada del medidor antes de la garganta y la carga (H_b), cerca del extremo inferior de la garganta y que están colocados a los lados de la estructura y comunicados a ella por tubería. En estas cámaras se alojan los flotadores de los limnigrafos o simplemente escalas graduadas.

Conviene aclarar que las cargas (H_a) y (H_b) se miden a partir de la cresta, por lo tanto el cero de las escalas está al nivel de piso de la entrada, pudiéndose colocar o dibujar directamente sobre

las paredes de la estructura cuando es pequeña (15 cm) y se desean suprimir las cámaras de reposo. Se debe tener cuidado al medir los valores de las cargas (H_a) y (H_b), ya que la relación existente entre ellas indica como trabaja en ese momento el aforador. Esta relación se conoce como grado de sumersión y está dado por:

$$S = \frac{H_b}{H_a} \quad (2.13)$$

Lámina 40. Planta y sección longitudinal de un medidor Parshall



El valor del grado de sumersión para descarga, libre y ahogada, varía en función del ancho de garganta (W), cuadro 14.

Cuadro 14. Tamaño del medidor y relación con el grado de sumersión

ANCHO DE GARGANTA	DESCARGA LIBRE	CON SUMERSION
W < 0.30 m	S < 0.60	0.60 < S < 0.95
0.30 < W < 2.5m	S < 0.70	0.70 < S < 0.95
2.50 < W < 15.0m	S < 0.80	0.80 < S < 0.95

Parshall indicó que cuando el grado de sumersión es mayor de 0.95, la determinación del gasto es incierta, por lo que debe adoptarse 0.95 como el valor máximo.

Cuando el vertedor trabaja a descarga libre, el gasto es función sólo de la carga (Ha). Si el medidor trabaja a descarga ahogada, el gasto es función de la carga (Ha) y del grado de sumersión (S).

Para descarga libre, el gasto esta dado por:

$$Q = m Ha^s \quad (2.14)$$

Las constantes (m) y (s) también varían en función del ancho de garganta, entonces las fórmulas para evaluar el gasto en función de éstas se dan en el cuadro 15.

Cuadro 15. Tamaño del medidor y fórmula de gasto

ANCHO DE GARGANTA	FORMULA
W < 0.15 m	$Q = 0.3812 Ha^{1.58}$
0.30 < W < 2.5 m	$Q = 0.3716 W (3.281 Ha)^{1.522} W^{0.026}$
2.50 < W < 15.0 m	$Q = (2.292 W + 0.474) Ha^{1.6}$

Para descarga ahogada las fórmulas anteriores generan un gasto mayor que el real. En consecuencia, cuando un medidor trabaja bajo

esta condición es necesario aplicar una corrección sustractiva (c) al gasto, que aumenta a medida que lo hace el grado de sumersión:

$$Q = m Ha^S - c \quad (2.15)$$

En condiciones de descarga sumergida, las fórmulas para obtener el gasto son difíciles de evaluar.

Para anchos de garganta menores de 0.30 m se ha graficado el gasto en función de la carga (H_a) y del porcentaje de sumersión (inmersión), para diferentes anchos de garganta. En las láminas 41 y 42 se muestra este tipo de curvas, para gargantas de 0.15 m (6") y 0.23 m (9").

Para anchos de garganta mayores, desde 0.30 m hasta 2.5 m, y desde 2.5 m hasta 15.0 m, el gasto se obtiene mediante otro tipo de gráficas ¹.

Ejemplo: se tiene un aforador Parshall con garganta de 0.15 m. Obtener el gasto, si las cargas aguas arriba (H_a) y aguas abajo (H_b) son respectivamente 0.30 m y 0.15 m.

El grado de sumersión: $S = \frac{0.15}{0.3} = 0.5 < 0.6$ (descarga libre)

Como se tiene descarga libre, se sustituye la carga (H_a) en la fórmula para ancho de garganta (W), menor de 0.15 m (cuadro 15).

$$Q = 0.3812 (0.30)^{1.58} = 0.057 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ejemplo: obtener el gasto para el mismo aforador Parshall, pero para las cargas, aguas arriba de 0.30 m y aguas abajo de 0.20 m.

El grado de sumersión: $S = \frac{0.2}{0.3} = 0.67 > 0.6$ (descarga ahogada)

Como se tiene descarga ahogada, se ingresa con el porcentaje de sumersión del 67% en el eje vertical (lámina 41), trazándose una línea horizontal hasta la intersección con la curva correspondiente a la carga aguas arriba (H_a) de 0.30 m (1 pie) y a partir de este punto, se traza una vertical hasta el eje horizontal, resultando un gasto de 1.94 pie³/s; transformando este gasto al sistema internacional resulta 0.055 m³/s.

¹ Para mayor referencia consultar Medición del agua de riego. Servicio de Conservación de Suelos, Departamento de Agricultura de Estados Unidos. Ed. Diana

Lámina 41. Gasto a través de un aforador Parshall de 0.15 m (6")

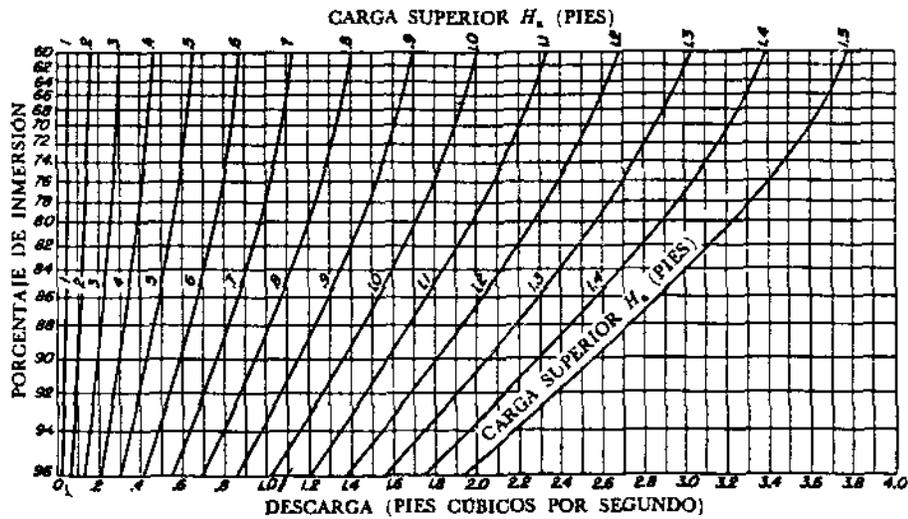
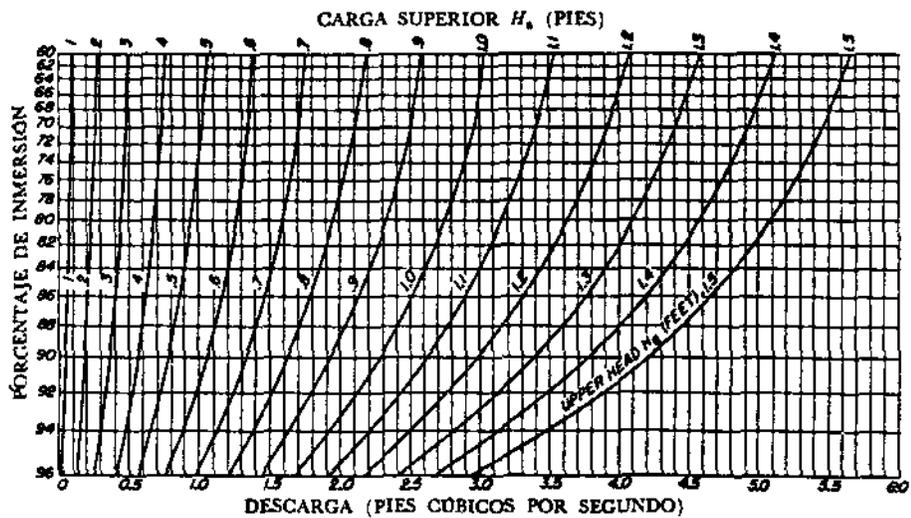


Lámina 42. Gasto a través de un aforador Parshall de 0.23 m (9")



2.3.3 Venturi tipo Tecamachalco

Cuando una corriente cambia de régimen lento o subcrítico a régimen rápido o supercrítico, se presenta una sección crítica donde se puede establecer la relación carga-gasto. El cambio de régimen se presenta al colocar un estrechamiento y después una ampliación. En laboratorio, se utilizó la condición anterior para proyectar la estructura Venturi Tecamachalco (lámina 43), resultando la siguiente ecuación general para la condición de descarga libre:

$$Q = K b h^N \quad (2.16)$$

La sección crítica se presenta cuando la relación de tirantes aguas abajo y aguas arriba es menor del 70%.

En caso de no existir esta condición, se puede colocar un escalón que no provoca el cambio de la relación carga-gasto, pero sí disminuye el tirante aguas abajo, ya que tanto éste como el de aguas arriba, se miden a partir de la plantilla. La longitud del medidor debe ser tres veces el ancho de la garganta:

- a) Debido a que el agua debe estar encauzada al llegar al medidor, se debe procurar establecer un tramo de canal recto con una longitud de cinco veces el ancho de garganta (5b), antes de la estructura medidora.
- b) La escala deberá localizarse a tres veces el ancho (3b) del principio del estrechamiento. En el laboratorio no se consideró velocidad de llegada, por lo que el límite superior aceptable es de 40 cm/s.
- c) Al pasar el agua por esta estructura sufre una pérdida de carga de aproximadamente 25 cm. En este principio se basa la operación del medidor Parshall.
- d) La estructura Venturi Tecamachalco puede ser utilizada también como orificio y su ecuación para el cálculo del gasto es la siguiente:

$$Q = 0.55 b \sqrt{2 g h} \quad (2.17)$$

esto se logra colocando una pantalla a una distancia de (0.5b) de la salida.

- e) La pérdida de carga en esta estructura es del orden de 10 cm.

Lámina 43. Aforador Venturi tipo Tecamachalco

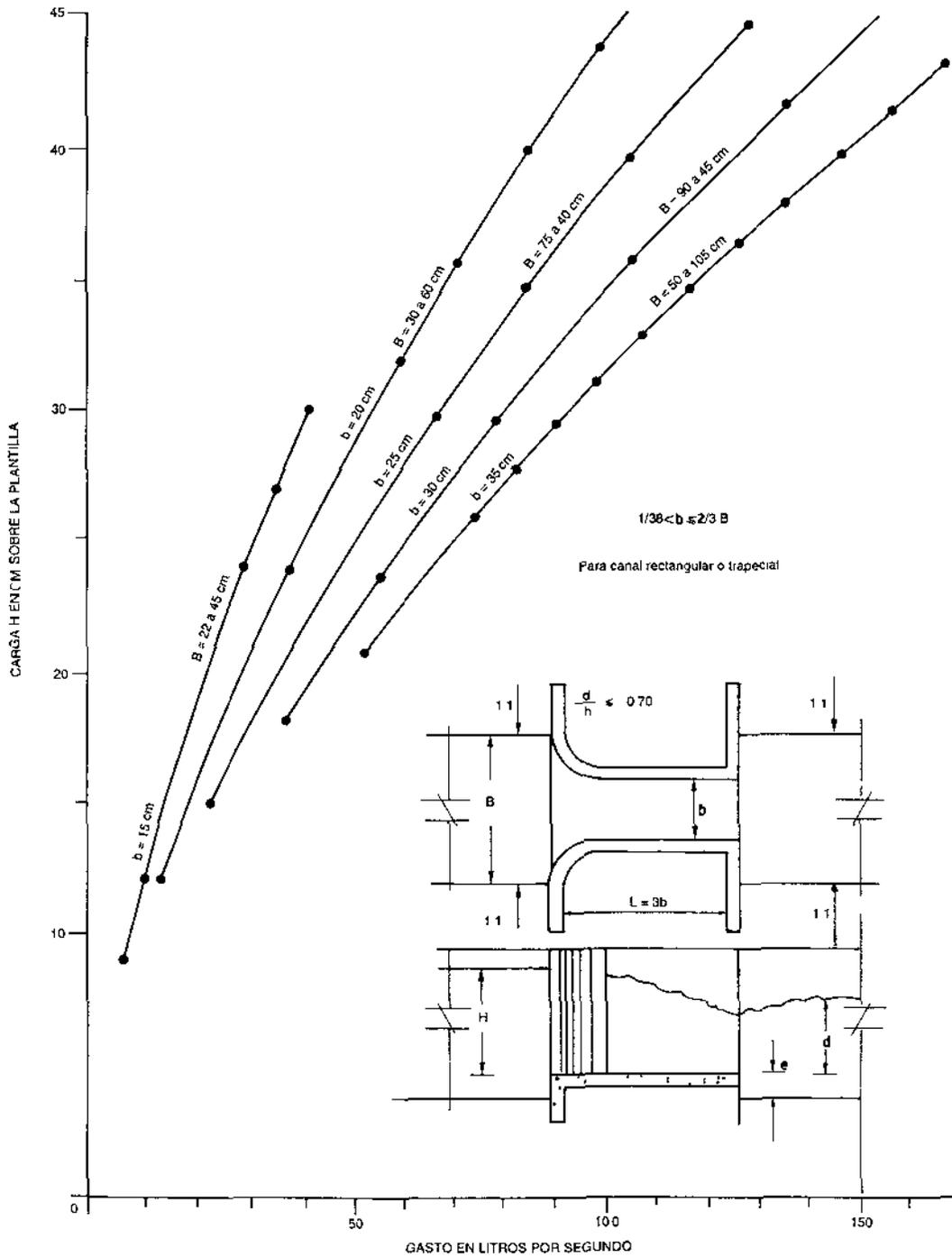
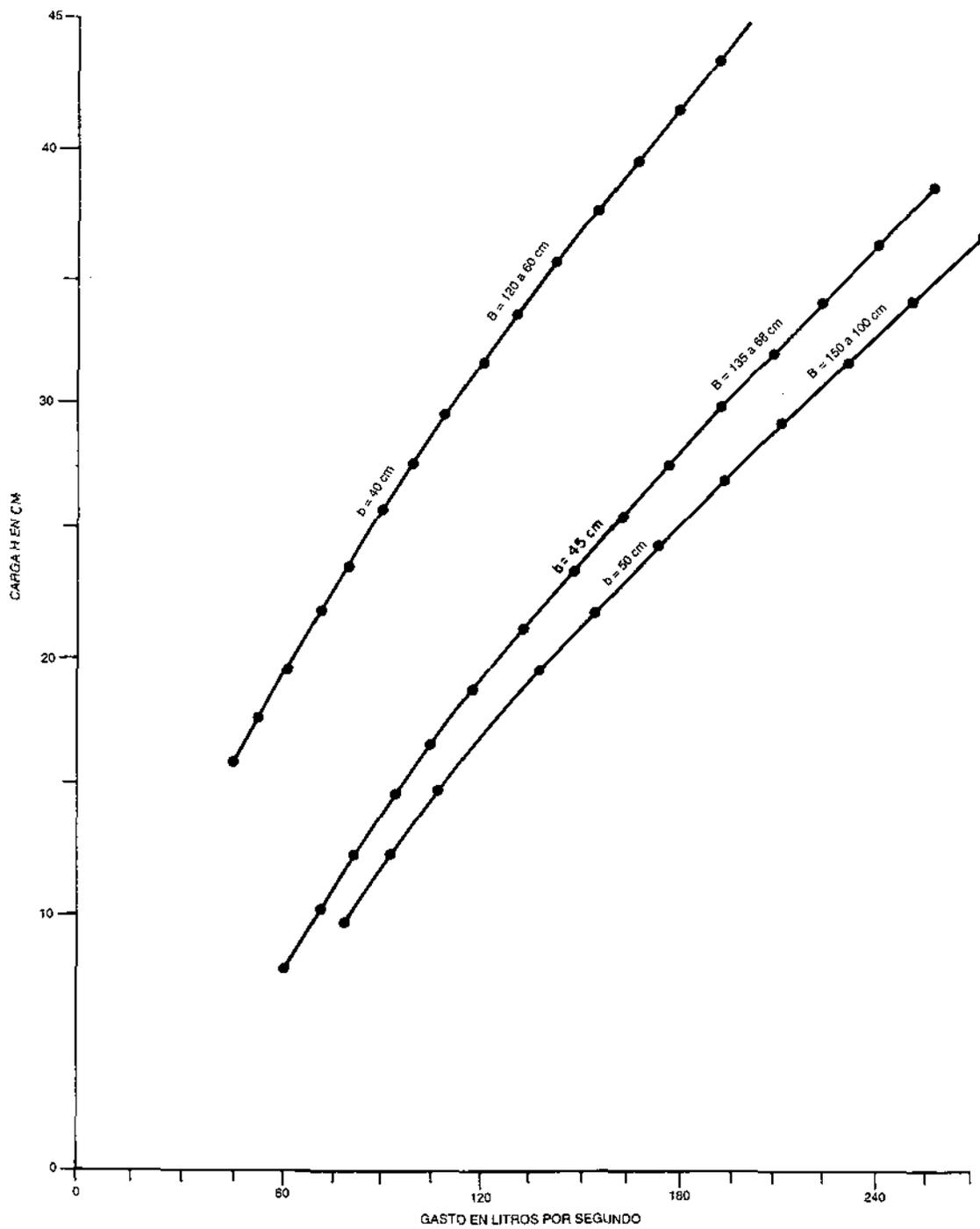


Lámina 43. Aforador Venturi tipo Tecamachalco (continuación)



2.4 Aforador tipo Neyrpic

Los modulos Aquacontrol son estructuras prefabricadas diseñadas para sustituir a las compuertas comunes en las tomas de agua y suministrar gastos constantes controlados tanto a las parcelas como a los canales, sin un mecanismo movil.

Se fabrican combinando partes de concreto y piezas de metal o poliester reforzado con fibra de vidrio. La mas sencilla de estas estructuras consiste de tres claros, contando cada uno con una cresta vertedora, uno o dos baffles reductores y una compuerta sujeta a un mecanismo de cierre manual protegido con candados (lamina 44).

Las compuertas estan arregladas en fila, colocadas las mas pequeñas del lado izquierdo de los distribuidores y a la derecha las mas grandes. Normalmente, cada compuerta permanece totalmente abierta o cerrada.

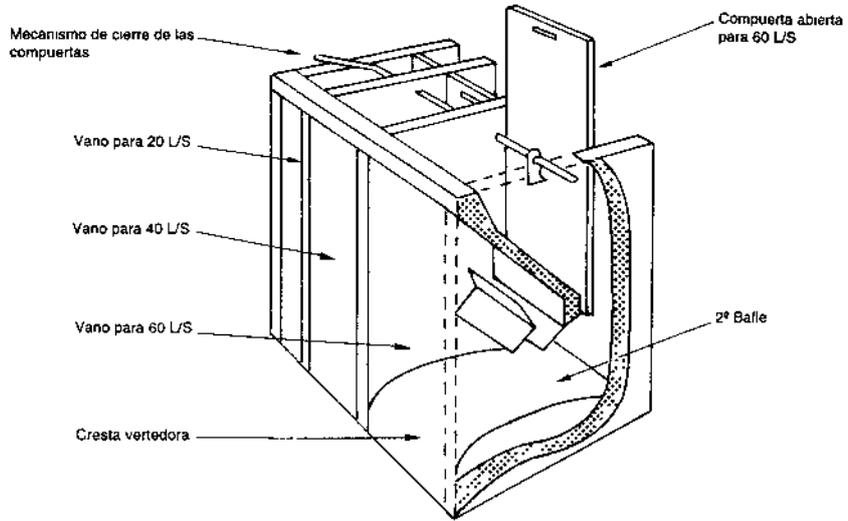
Para dar el gasto requerido se abre una compuerta o combinacion de compuertas de diferentes tamaños, de manera que todas quedan fijas en una de las dos posiciones por medio de una simple palanca a la que se pone un candado, una vez que se han abierto las compuertas seleccionadas, no requiriendo ajustes en la abertura. Este arreglo tan simple evita que los gastos suministrados sean modificados por personas no autorizadas, ademas, como resultado de las características hidraulicas del equipo, los usuarios no tienen posibilidades de afectar los gastos alterando deliberadamente el nivel del agua, ya que estos fueron fijados en el momento de su fabricacion, permaneciendo el gasto constante aunque los niveles del agua en el canal fluctuan cierta cantidad arriba o abajo de su nivel normal de operacion.

Con el simple hecho de abrir una compuerta, se afora el gasto necesario, lo cual facilita el calculo del volumen proporcionado al usuario, mediante el producto del gasto y tiempo utilizado.

2.4.1 Modulo para gastos pequeños

El gasto constante suministrado por estos modulos se obtiene sin un mecanismo movil (lamina 45). La combinacion de un cimacio, en forma muy especial, con dos reductores fijos planos a determinada altura sobre el y ligeramente aguas abajo de su cresta, corrige los efectos de un ascenso en el nivel del agua en el canal a niveles bajos de agua. El cimacio opera en condiciones de descarga libre, a medida que aumenta el nivel del agua sobre este, se reduce la abertura, hasta alcanzar el borde inferior de la placa del primer reductor.

Lámina 44. Módulos Aquacontrol tipo Neyrpic



MODULOS TIPO X₂ Y XX₂ PARA 120 L/S AJUSTABLES A GASTOS DE 20 L/S EN 20 L/S

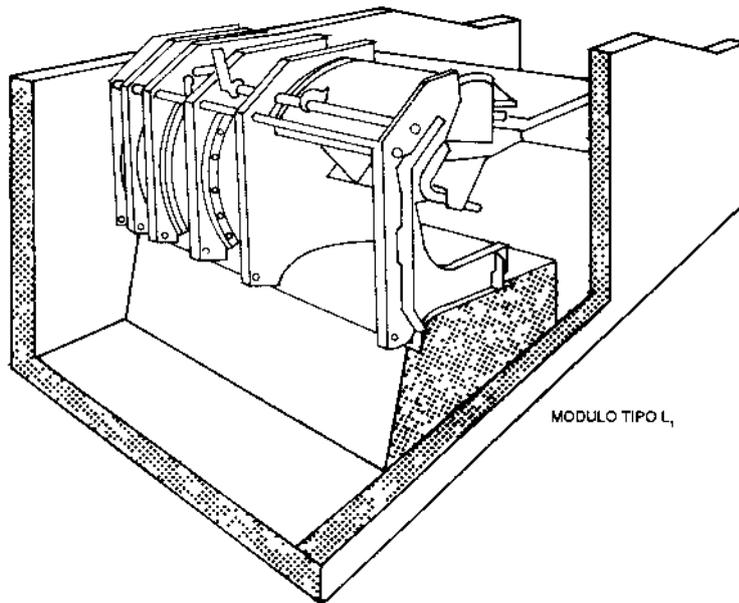
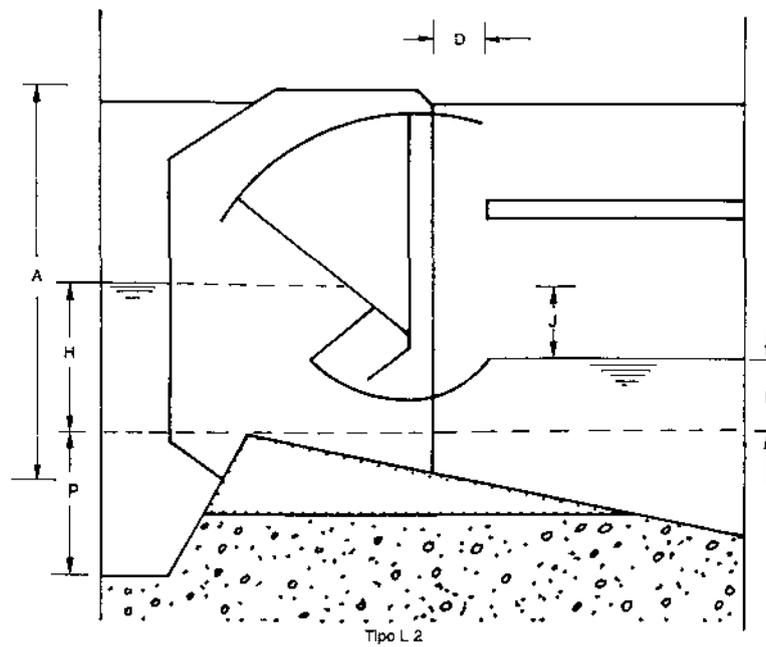
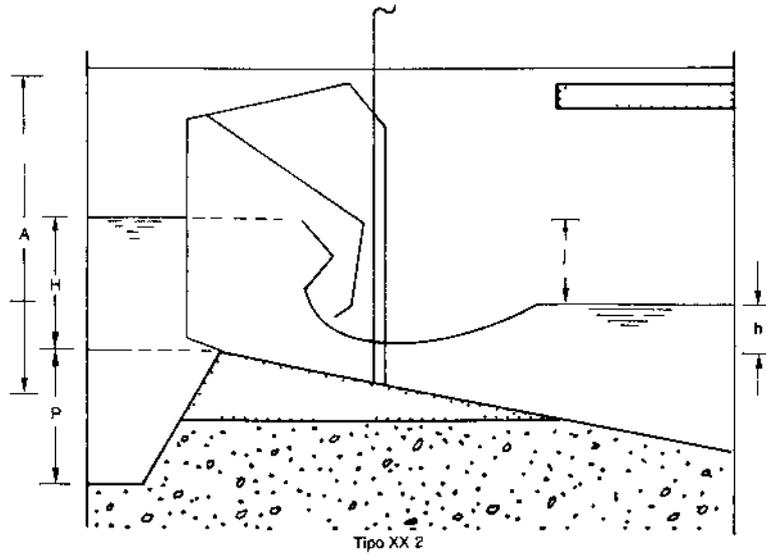


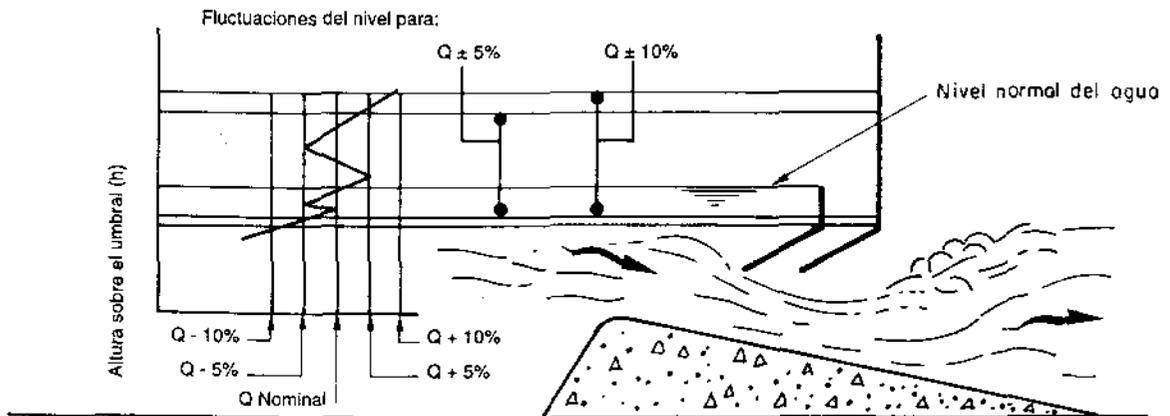
Lámina 45. Características hidráulicas de módulos con doble reductor



En este momento, el cimacio y el reductor actúan como un orificio ahogado calibrado con una fuerte reducción en el coeficiente de descarga, y la contracción del chorro tiende a ser más pronunciada a medida que aumenta la carga, reduciendo bastante el gasto de salida. El segundo reductor se encuentra instalado cercano al cimacio para formar un orificio muy pequeño, con el fin de incrementar la holgura en las fluctuaciones del nivel de operación del canal, por lo que a medida que sube el nivel del agua en la entrada del módulo, se llega a una altura en la que el primer reductor queda sumergido. Entonces, el segundo reductor entra en acción y la tendencia del gasto a incrementarse es retardada aún más, debido a que los diversos componentes del módulo fueron diseñados y arreglados para lograr un efecto corrector máximo.

La lámina 46 muestra que el gasto a través del módulo se mantiene muy cerca de su valor nominal, dentro de una amplia fluctuación del nivel de operación en el canal.

Lámina 46. Curva de operación de un módulo con dos reductores



Se fabrican dos tipos de módulo, en base a la dimensión de sus secciones longitudinales (cuadro 16), identificadas en términos de su gasto nominal por unidad de anchura:

Cuadro 16. Especificaciones de escalón de entrada, tirantes y pérdidas de carga para gastos con variación del $\pm 5\%$ y $\pm 10\%$

(Q) tipo unitario	h mín.	h mín.	h nom.	h máx.	h máx.	dh.	dh.	Jmín para	Jmín para	p
l/s/dm	Q-10%	Q-5%	Q	Q+5%	Q+10%	Q-10%	Q-5%	hnom.	hmin.	hmin.
XX-2 (20)	20	21	27	44	48	28	23	11	8	25
L-2 (50)	37	39	51	82	89	52	43	20	15	49

Serie XX: 20 l/s/dm con dos reductores, habilitado con compuertas de 20, 40 y 60 lps, en gastos de 20 en 20 lps.

Serie L: 50 l/s/dm con dos reductores, habilitado con compuertas de 60, 120, 180, 240 y 300 lps, en gastos de 60 en 60 lps.

2.4.2 Módulo para gastos grandes

Para seleccionar el equipo se considera la capacidad de gasto y tipo de sección longitudinal, XX o L, esto determina: ancho de la instalación, gastos a proporcionar, pérdida de carga y fluctuaciones admisibles en los niveles del canal.

Los cuadros 17 y 18 muestran el número de compuertas que deben abrirse para proporcionar el gasto nominal solicitado, en función de la capacidad de cada compuerta.

Cuadro 17. Tamaño y número de compuertas para módulos tipo XX-2

Gasto nominal (lps)	Número de compuertas		
	Gasto por compuerta (lps)		
	20	40	60
120	1	1	1
180	1	1	2
240	1	1	3
300	1	1	4
360	1	1	5

Cuadro 18. Tamaño y número de compuertas para módulos tipo L-2

Gasto nominal lps	Número de compuertas				
	Gasto por compuerta (lps)				
	60	120	180	240	300
360	1	1	1		
420	1	1		1	
480	1	2	1		
540	2		1	1	
600	1	1	1	1	
660	1	1		2	
720	1	1		1	1
780	2	1		1	1
840	1	2		1	1
900	1	1	1	1	1
960	1	1		2	1
1020	1	1		1	2
1080	2	1		1	2
1140	1	2		1	2
1200	1	1	1	1	2

Se observa que los módulos de la serie "XX" son más adecuados para tomas individuales, mientras que los de la serie "L", son para tomas de canales laterales y sublaterales.

Con los módulos seccionales se pueden hacer combinaciones de gastos, incrementando la capacidad total de gasto hasta los límites requeridos. Las curvas de la lámina 47 muestran la relación entre gasto y variaciones del nivel aguas arriba, para módulos de dos reductores o baffles. El nivel nominal absoluto se determina en función de las variaciones de nivel en el canal.

Existen tres alternativas básicas para instalar un módulo:

- a) Instalación del módulo a la entrada de la bocatoma, antes de la tubería.

Es aplicable a todos los casos y preferentemente donde la diferencia entre el nivel normal de operación y el terreno a regar sea mayor a 60 cm (canales grandes), requiriendo una caída a la salida de la toma para evitar la erosión (lámina 48). Sin embargo, la estructura de la toma invade parte del camino de operación y la entrada es de construcción más complicada y costosa que la siguiente alternativa (b).

Lámina 47. Esquema de variación del gasto en módulos de doble reductor

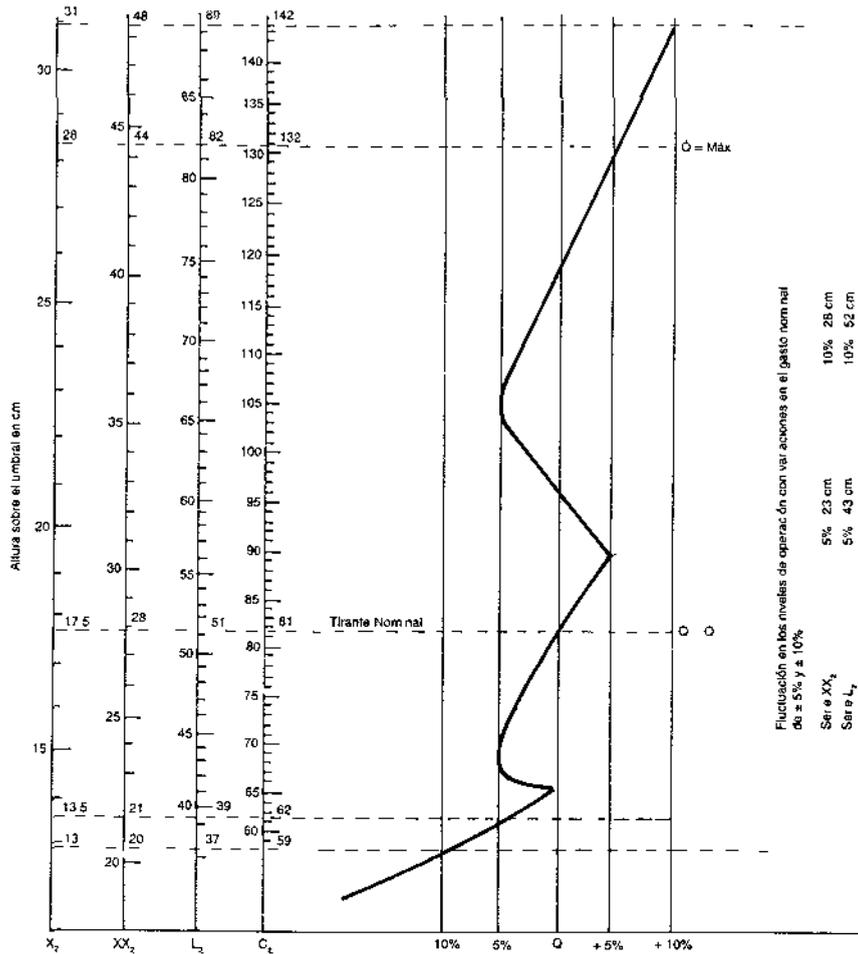
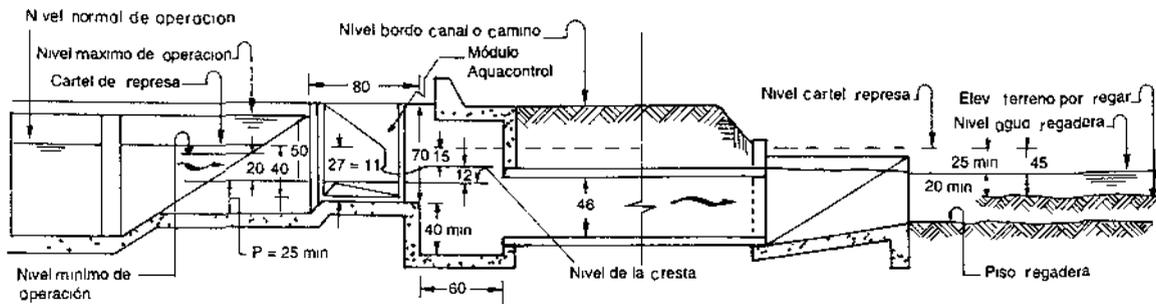


Lámina 48. Condiciones para la instalación de un módulo en la entrada de la bocatoma



b) Instalación del módulo a la salida de la bocatoma, después de la tubería.

Se recomienda, en caso de tener limitado al mínimo (45 a 60 cm) la diferencia entre el nivel normal de operación y el terreno a regar (lámina 49). En las tomas con salida doble o triple, se ubicará a la salida de la toma, después de la tubería. No invade el camino de operación, es más sencillo y económico que el anterior diseño, pudiendo sustituir a estructuras tipo Guamúchil (lámina 50).

Lámina 49. Condiciones para la instalación de un módulo a la salida de la bocatoma

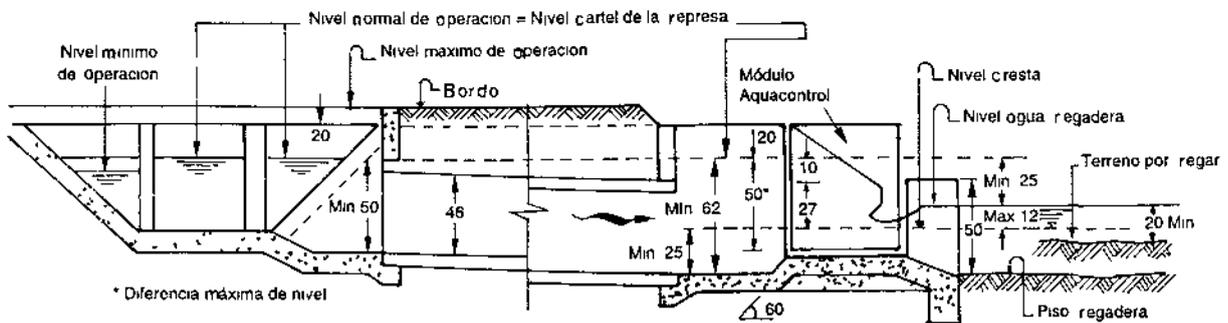
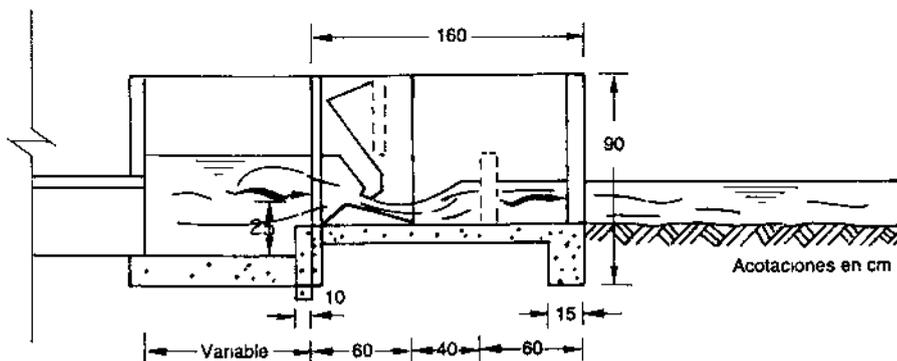


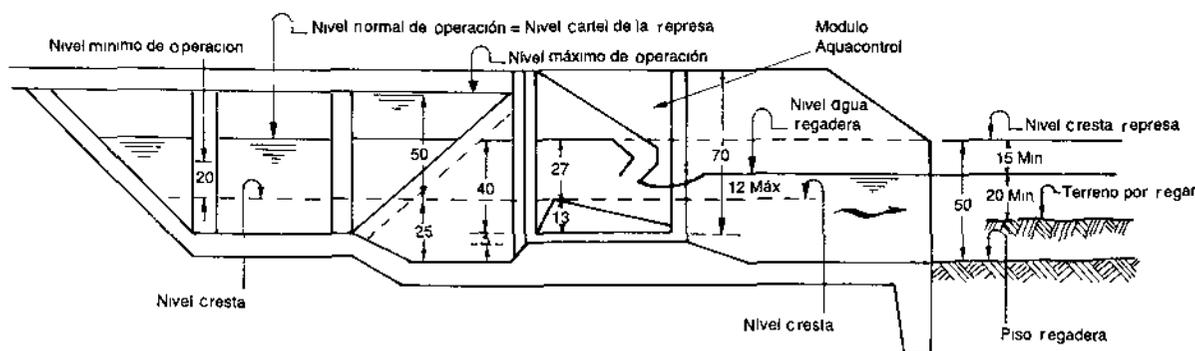
Lámina 50. Instalación de un módulo en sustitución de un aforador Guamúchil



c) Instalación del módulo, como toma directa sin tubería, para algunos casos en que no exista camino de operación.

Se recomienda en los canales donde el bordo es menor a 2 m, con gastos de 5 a 7 m³/s. Como no usa tubería, el desnivel requerido entre el terreno a regar y el nivel normal de operación se reduce a 35 cm (lámina 51), siendo una solución adecuada para terrenos altos.

Lámina 51. Condiciones para la instalación de un módulo en una bocatoma, sin tubería



2.5 Aforador de hélice para tomas

Los medidores de uso más común para el agua de riego son los de velocidad que se instalan en canales, cañerías o corrientes, así como los que se colocan en tuberías o ductos de hasta 182.9 cm (6 pies) de diámetro. Cuando los medidores se instalan en canales abiertos, el flujo debe ser conducido mediante un tubo o conducto de área seccional previamente conocida, comúnmente se le denomina tubo medidor. El dispositivo de aforo se coloca dentro del extremo de descarga del tubo.

Los medidores para riego consisten esencialmente de un propulsor cónico (molinete) conectado a un registrador de carga por medio de una serie de engranes. Operan mediante la energía cinética del agua que fluye. La hélice queda suspendida frente al centro del flujo, ya sea en el tubo, cañón o ducto y gira al impulso del agua.

La hélice giratoria impulsa al cabezal de registro a través del tren de engranes y el cabezal registra el flujo total mediante un reloj contador. El flujo total queda así registrado directamente en unidades volumétricas comunes, tales como galones/min, lps, m³/s.

Hay requisitos básicos para que el medidor funcione con exactitud, el tubo debe mantener su flujo completo permanentemente y el gasto medio debe ser superior al mínimo computable en cada caso. Los medidores son calibrados volumétricamente en fábrica, por lo cual normalmente no requieren ajustes o revisiones en los lugares donde se emplean.

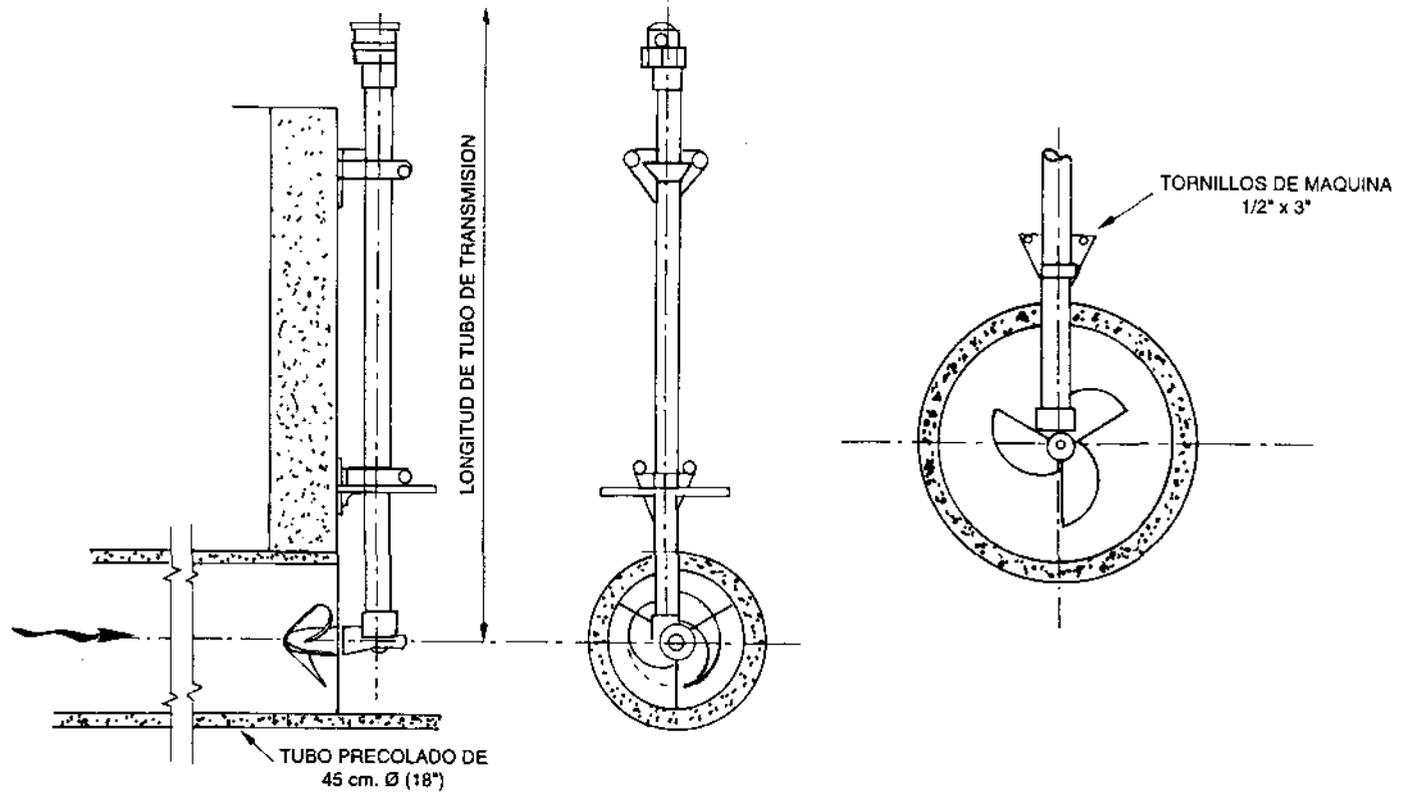
Los medidores de riego descritos tienen diversas ventajas sobre otros métodos para aforar el agua, ya que eliminan la necesidad de hacer lecturas frecuentes o rectificaciones. Como los medidores muestran directamente los totales de flujo, no hay necesidad de efectuar cálculos. Pueden obtenerse dispositivos automáticos para registros totales, utilizándolos en combinación de gráficas continuas, a fin de disponer de registros permanentes de consulta sobre el consumo de agua.

Un tipo especial de estos medidores es el de flujo abierto, que se emplea para determinar el flujo en canales abiertos o en sistemas de ducto cerrado con flujo por gravedad. El medidor está suspendido de una pared o de una estructura simple de soporte, en el centro del extremo de descarga de un tubo sumergido, alcantarilla o sifón, que hace las veces de tubo del medidor. La sección de aforo puede ser redonda o rectangular, pudiendo emplearse satisfactoriamente como dispositivos de medición: tubos de hormigón, metal corrugado o una estructura larga de madera en formas de caja. Los medidores de flujo abierto pueden instalarse permanentemente o transportarse de un sitio a otro.

Cuando el medidor integra el volumen se conoce como volumétrico totalizador, generalmente se adapta a las descargas de tuberías. Puede colocarse a la salida de alcantarillas o sifones, con la condición de que la sección del tubo esté ahogada, o sea, que la sección tenga un área hidráulica constante. La lámina 52 muestra un aforador volumétrico totalizador, el aparato consiste en un molinete helicoidal, que transmite el número de revoluciones a un tacómetro especial, en cuya carátula se lee el volumen.

Lámina 52. Medidor volumétrico totalizador

86



3 METODOS DE AFORO PARA APLICACION DEL AGUA EN LAS PARCELAS

En las bocatomas y regaderas de los distritos de riego se acostumbra la instalación de estructuras aforadoras, que permiten medir el gasto a nivel de grupos de parcelas o parcelas individuales, siendo necesario realizar aforos en las regaderas, a la entrada de la parcela, así como en melgas y surcos. Cuando hay sistemas de riego presurizados, es útil conocer la cantidad de agua que se aplica en tuberías con aspersores o línea de goteros. A continuación se describen los métodos que sirven para resolver esos casos.

3.1 Aforo para gastos en melgas y surcos

Para medir el suministro de agua en melgas y surcos, se utilizan: aforadores de carga hidráulica baja, como el Chapingo y el aforador de garganta corta con plantilla horizontal, también se puede emplear el método volumétrico, así como sifones calibrados y, por último, placas metálicas con orificios.

3.1.1 Aforador Chapingo

Está comprendido dentro de la amplia gama de variantes de la estructura Venturi que tan diversas formas y nombres lleva en la actualidad, siendo su más reciente antecedente la estructura medidora que ensayaron en la Universidad de Utah. La estructura aforadora Chapingo (lámina 53), es de garganta móvil y se emplea para la medición de gastos pequeños, siendo una alternativa que permite mejorar la eficiencia del uso del agua de riego a nivel parcelario; su rango de trabajo abarca desde 0.8 lps hasta 120 lps, con anchos de garganta desde 2 cm hasta 20 cm. Mediante este dispositivo, se puede aforar en algunas regaderas o pequeños canales, así como medir el gasto para pruebas de riego que hagan posible un buen diseño de longitud de surcos y melgas.

Bajo condiciones de descarga libre, el gasto que pasa por el aforador depende exclusivamente del tirante aguas arriba (ha). La relación carga-gasto, para diferentes anchos de garganta (2,4,6,...,20 cm), fue obtenida por los diseñadores de esta estructura en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo. En este trabajo se presentan las ecuaciones, únicamente para tres anchos de garganta:

2 cm de ancho de garganta.

$$Q = 0.04589 \text{ ha}^{1.5713} \quad (3.1)$$

6 cm de ancho de garganta.

$$Q = 0.09328 ha^{1.6546} \quad (3.2)$$

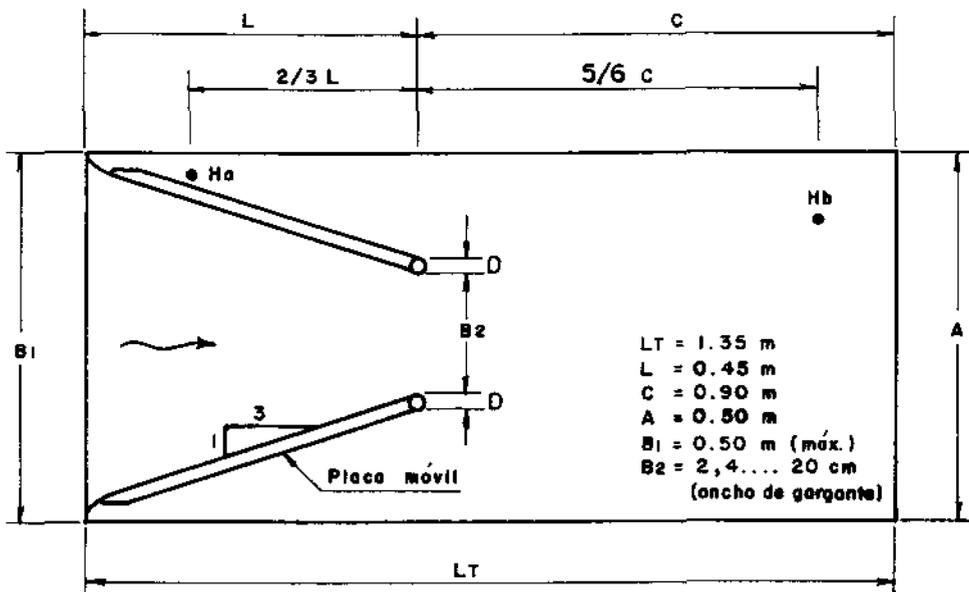
10 cm de ancho de garganta.

$$Q = 0.14305 ha^{1.6658} \quad (3.3)$$

En estas ecuaciones: Q =gasto (lps)
 ha =tirante aguas arriba (cm)

Además se han tabulado en el cuadro 19 y graficado en la lámina 54.

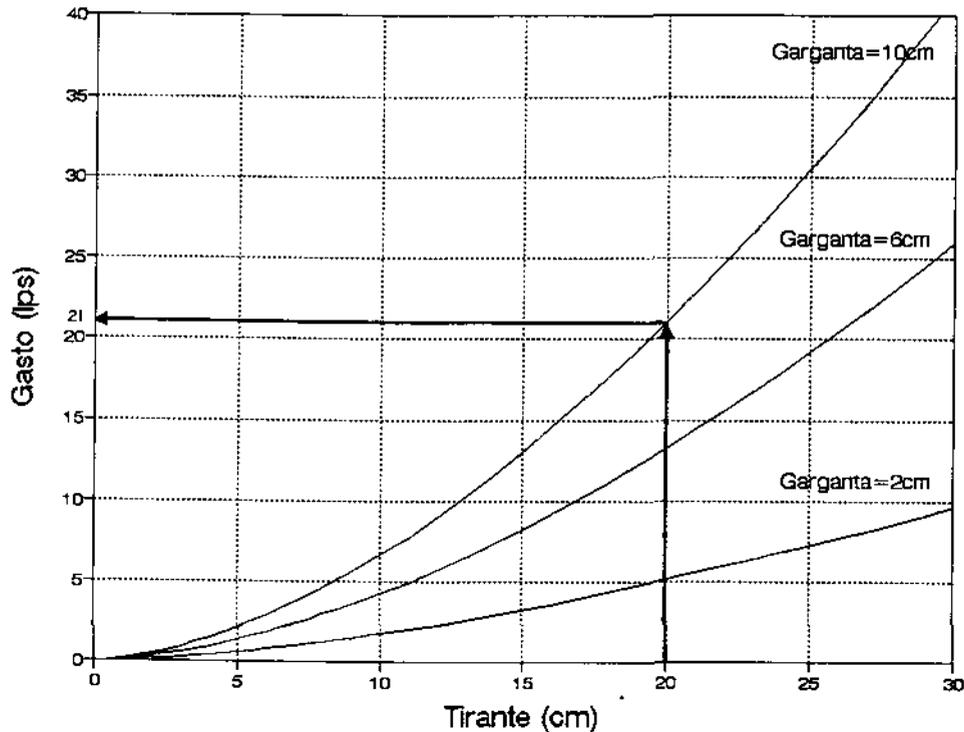
Lámina 53. Aforador Chapingo



Cuadro 19. Relación carga-gasto para aforadores Chapingo (lps)

TIRANTE (cm)	ANCHO DE GARGANTA (cm)		
	2.0	6.0	10.0
0.5	0,02	0,03	0,05
1.0	0,05	0,09	0,14
1.5	0,09	0,18	0,28
2.0	0,14	0,29	0,45
2.5	0,19	0,42	0,66
3.0	0,26	0,57	0,89
3.5	0,33	0,74	1,15
4.0	0,41	0,92	1,44
4.5	0,49	1,12	1,75
5.0	0,58	1,34	2,09
5.5	0,67	1,57	2,45
6.0	0,77	1,81	2,83
6.5	0,87	2,06	3,23
7.0	0,98	2,33	3,66
7.5	1,09	2,62	4,10
8.0	1,20	2,91	4,57
8.5	1,32	3,22	5,05
9.0	1,45	3,54	5,56
9.5	1,58	3,87	6,08
10.0	1,71	4,21	6,63
11.0	1,99	4,93	7,77
12.0	2,28	5,69	8,98
13.0	2,58	6,50	10,26
14.0	2,90	7,35	11,61
15.0	3,23	8,24	13,02
16.0	3,58	9,16	14,50
17.0	3,94	10,13	16,04
18.0	4,31	11,14	17,64
19.0	4,69	12,18	19,30
20.0	5,08	13,26	21,03
21.0	5,49	14,37	22,81
22.0	5,90	15,52	24,64
23.0	6,33	16,71	26,54
24.0	6,77	17,93	28,49
25.0	7,22	19,18	30,49
26.0	7,67	20,46	32,55
27.0	8,14	21,78	34,66
28.0	8,62	23,13	36,83
29.0	9,11	24,52	39,04
30.0	9,61	25,93	41,31

Lámina 54. Curvas carga-gasto para aforadores Chapingo



Ejemplo: en una prueba de riego se usó un aforador Chapingo con garganta de 10 cm, a la entrada de una melga. Obtener el gasto, si se lee un tirante de 20 cm.

Considerando la curva (lámina 54), se ingresa con el valor del tirante de 20 cm, trazando una vertical hasta la intersección con la curva correspondiente a 10 cm de garganta y, a partir de este punto, se traza una horizontal hasta el eje vertical, resultando un gasto de 21 lps.

Ingresando en la primer columna del cuadro 19, con el valor del tirante de 20 y desplazándose horizontalmente hasta la cuarta columna correspondiente a la garganta de 10 cm, resulta un gasto de 21.03 lps.

Sustituyendo el tirante de 20 cm en la ecuación 3.3 resulta:

$$Q = 0.14305 (20)^{1.6658} = 21.03 \text{ lps}$$

3.1.2 Aforador de garganta corta con plantilla horizontal.

Es un medidor con garganta reducida a una simple arista y plantilla horizontal, sus características (lámina 55) son las siguientes:

Sección rectangular, convergencia 3:1 en la entrada y 6:1 en la salida.

El ancho de entrada y salida (B) están dados por:

$$B = W + \frac{9}{2} L \quad (3.4)$$

Donde: W=ancho de garganta (cm).
L=longitud del aforador (cm).

Si el aforador trabaja sin ahogamiento, se recomienda expresar el gasto que escurre a través de éste, por la fórmula:

$$Q = C h^* \quad (3.5)$$

Donde: Q=gasto (lps).
C=K W^{1.025}
H=tirante aguas arriba (cm)

Las variables (K) y (α) están en función de la longitud (L), puede obtenerse mediante la gráfica correspondiente (lámina 56).

Lámina 55. Relaciones geométricas, aforador plantilla horizontal

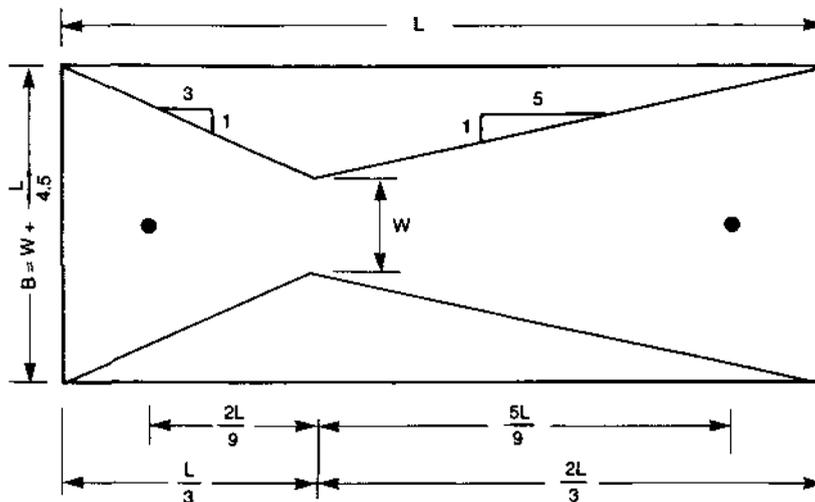
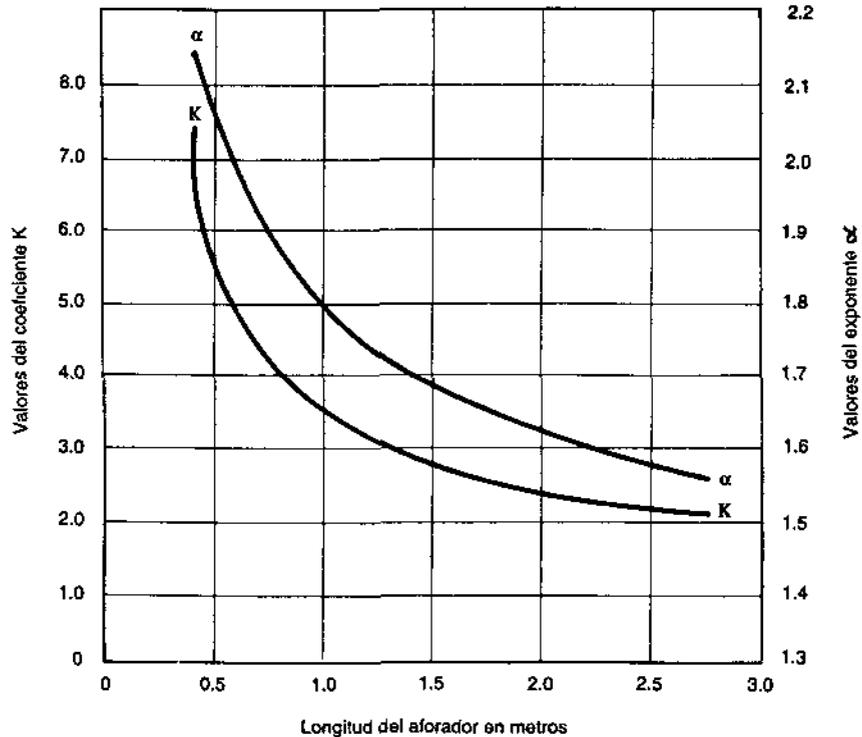


Lámina 56. Valores de coeficiente (K) y exponente (α)



En la lámina 57 se observan las dimensiones de dos aforadores, de garganta suprimida, que se diseñaron y construyeron, con anchos de garganta de 30 cm y 15 cm, cuyos gastos están dados por las ecuaciones:

garganta de 30 cm.

$$Q = 0.149 h^{2.006} \quad (3.6)$$

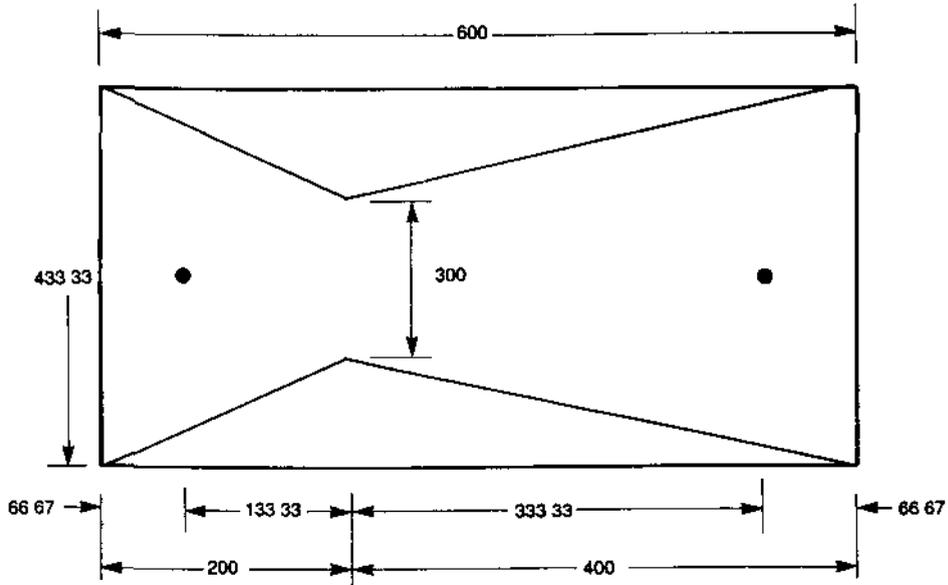
garganta de 15 cm.

$$Q = 0.075 h^{2.006} \quad (3.7)$$

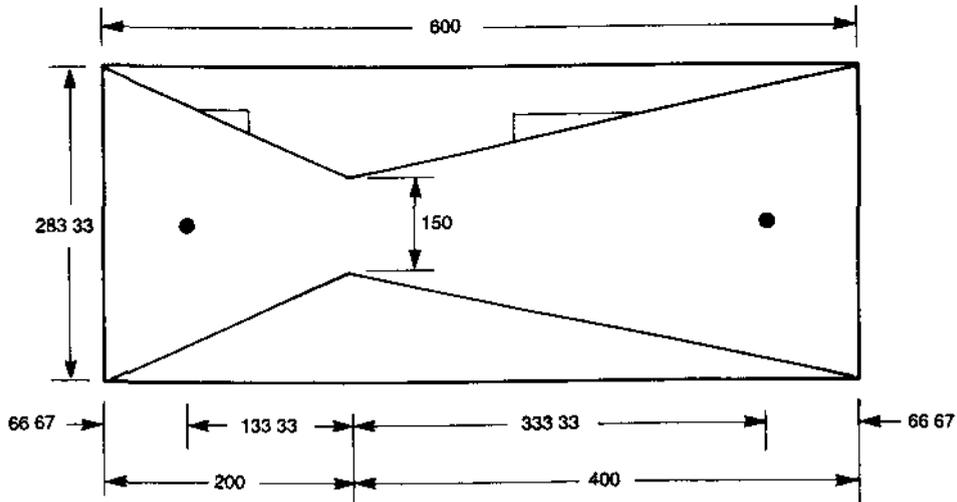
En estas ecuaciones: Q =Gasto (lps)
 h =Carga (cm)

Además, se han graficado en la lámina 58 y tabulado en el cuadro 20.

Lamina 57. Dimensiones de los aforadores ensayados



Aforador N° 1



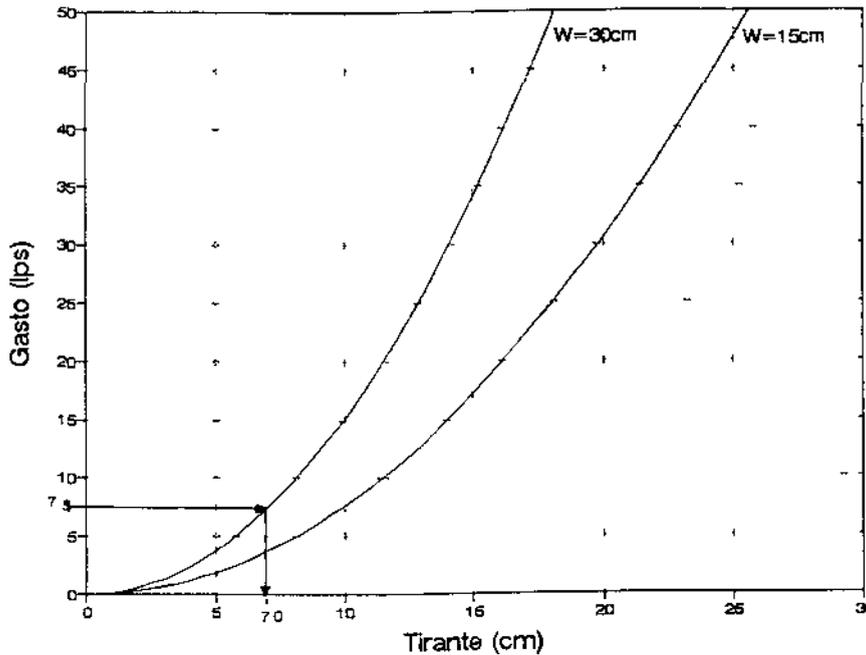
Aforador N° 2

* Dimensiones en milímetros

Cuadro 20. Relación carga-gasto, aforadores plantilla horizontal (lps)

TIRANTE (cm)	ANCHO (W) DE GARGANTA (cm)	
	30.0	15.0
0.5	0,04	0,02
1.0	0,15	0,08
1.5	0,34	0,17
2.0	0,60	0,30
2.5	0,94	0,47
3.0	1,35	0,68
3.5	1,84	0,93
4.0	2,40	1,21
4.5	3,04	1,53
5.0	3,76	1,89
5.5	4,55	2,29
6.0	5,42	2,73
6.5	6,37	3,20
7.0	7,39	3,72
7.5	8,48	4,27
8.0	9,66	4,86
8.5	10,90	5,49
9.0	12,23	6,16
9.5	13,63	6,86
10.0	15,11	7,60
11.0	18,29	9,21
12.0	21,78	10,96
13.0	25,57	12,87
14.0	29,67	14,93
15.0	34,07	17,15
16.0	38,78	19,52
17.0	43,80	22,05
18.0	49,12	24,73
19.0	54,75	27,56
20.0	60,68	30,54
21.0	66,92	33,68
22.0	73,47	36,98
23.0	80,32	40,43
24.0	87,48	44,03
25.0	94,94	47,79
26.0	102,71	51,70
27.0	110,79	55,77
28.0	119,18	59,99
29.0	127,87	64,36
30.0	136,86	68,89

Lamina 58. Curvas carga-gasto para aforadores con plantilla horizontal



Ejemplo: se ha instalado un aforador de garganta corta con plantilla horizontal de 30 cm en un surco. Obtener el tirante requerido para proporcionar un gasto de 7.5 lps.

Considerando la curva (lamina 58), se ingresa en el eje vertical con el gasto de 7.5 lps, hasta la interseccion con la curva correspondiente a 30 cm de ancho. A partir de este punto se traza una vertical hasta el eje horizontal, resultando un tirante de 7.0 cm.

Considerando el cuadro 20 se ingresa en la segunda columna, correspondiente a un ancho de 30 cm, con el gasto mas aproximado a 7.5 lps, para desplazarse en forma horizontal hasta la primer columna, resultando una carga de 7.0 cm.

Sustituyendo el gasto de 7.5 lps en la ecuacion 3.6 y despejando de esta la carga (h) resulta:

$$h = \left(\frac{7.5}{0.149} \right)^{\frac{1}{2.006}} = 7.1 \text{ lps}$$

3.1.3 Aforo volumétrico

En los sistemas de riego, el método volumétrico se usa básicamente en la medición del gasto en surcos, también se emplea para medir el flujo del agua en las boquillas a la salida de los sistemas de riego por aspersion.

Cuando los gastos son pequeños y se puede utilizar un encauzamiento del agua hacia un recipiente, se determina el gasto dividiendo el volumen por el tiempo de llenado:

$$Q = \frac{V}{T} \quad (3.8)$$

Donde: Q=Gasto (lps)
 V=Volumen llenado (lt)
 T=Tiempo de llenado (s)

Este método sencillo requiere poco equipo y es muy preciso. Se utiliza para medir gastos pequeños, de hasta 3 lps, pudiendo emplearse para gastos mayores, siempre que se disponga del lugar y depósito apropiado. Si se desea determinar el gasto con un margen de exactitud del 1%, se requieren 20 segundos para llenar el depósito. En forma similar a 2%, corresponden 10 segundos; para el 4%, 5 segundos, y así sucesivamente.

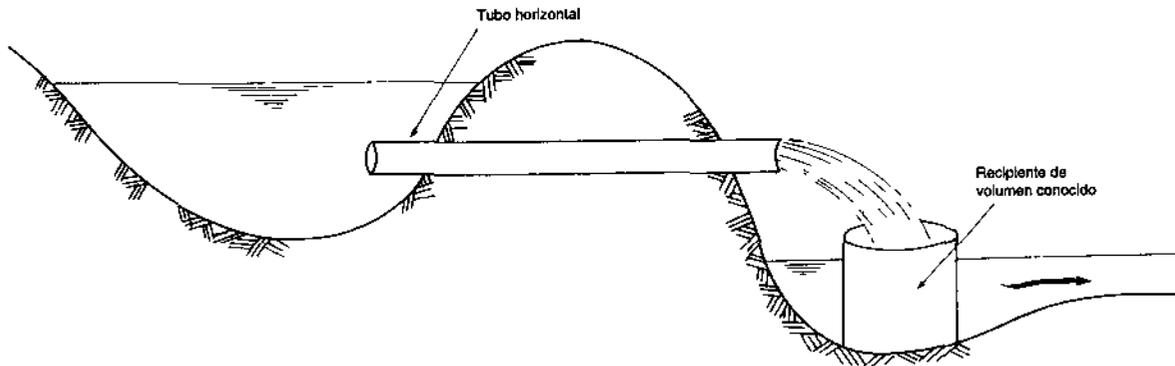
Cuando se aforan surcos, primero se emplea un recipiente de capacidad conocida, para saber así el volumen y luego se encauza el agua por medio de un plástico o tubo que permita que el agua caiga en el recipiente; tomándose los tiempos de inicio y final de llenado.

Para la medición volumétrica en surcos, el agua debe fluir generalmente a través de un tubo pequeño. La salida del tubo debe quedar a una altura menor de 4 cm del nivel máximo del agua en el surco de descarga (lámina 59).

La sedimentación sobre el punto de acceso no afecta las mediciones de agua. No conviene utilizar este sistema para medición de gastos en pendientes planas, en las que las condiciones de descarga en los surcos provoque un estancamiento de más del 5% en relación con la longitud prevista del surco. Si se emplea tubería de mayores dimensiones, puede reducirse el estancamiento sobre un punto de salida o descarga.

El aforo volumétrico, además de servir para la medición en surcos, se emplea para calibrar sifones, aspersores, microaspersores y goteros.

Lámina 59. Instalación para la medición volumétrica en surcos



Ejemplo: se mide el gasto que entra en un surco, mediante un recipiente de 30 litros. Después de depositar el recipiente en un hoyo, se conduce el agua hasta éste. El tiempo de llenado medido es de 8 segundos. El gasto que entra al surco, resulta:

$$Q = \frac{30}{8} = 3.75 \text{ lps}$$

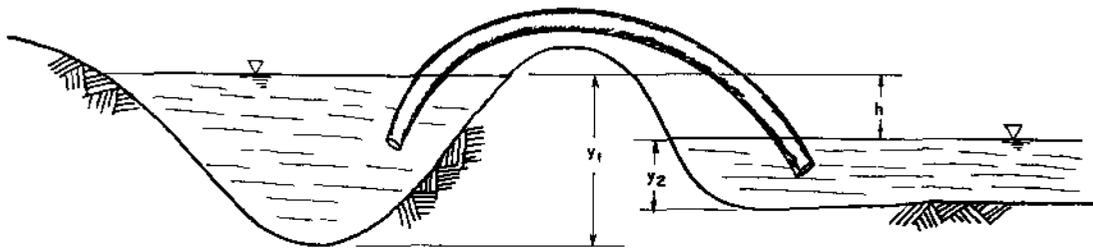
3.1.4 Aforo con sifones calibrados

Para conocer el gasto por sifón, primero se debe tener calibrado éste y después se determina la carga hidráulica de operación (h). Si la descarga es libre, la carga (h) corresponde a la diferencia entre el tirante del agua en la regadera y el nivel del centro de la descarga del sifón o el tirante del agua en el surco, esto último si la descarga es ahogada (lámina 60).

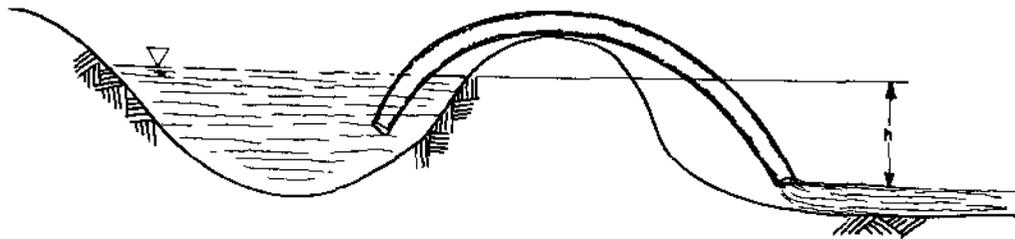
Se tiene calibrado a un sifón cuando se conoce su relación carga-gasto, ya sea mediante una ecuación, tabla o gráfica. La calibración puede obtenerse en campo o laboratorio, determinando el gasto (Q) por el método volumétrico, para diferentes cargas.

La relación carga-gasto de un sifón depende, en primer lugar, de su diámetro; y en segundo lugar: del diseño específico, material de construcción, longitud y forma, principalmente, por lo que se recomienda calibrar cada uno de los sifones empleados.

Lámina 60. Descarga en un sifón



DESCARGA AHOGADA



DESCARGA LIBRE

A pesar de lo anterior pueden usarse en forma aproximada las siguientes ecuaciones, de acuerdo al diámetro:

$\phi=2.54$ cm (1")

$$Q = 0.1298 h^{0.5356} \quad (3.9)$$

$\phi=5.08$ cm (2")

$$Q = 0.5213 h^{0.581} \quad (3.10)$$

$\phi=7.62$ cm (3")

$$Q = 1.2489 h^{0.5183} \quad (3.11)$$

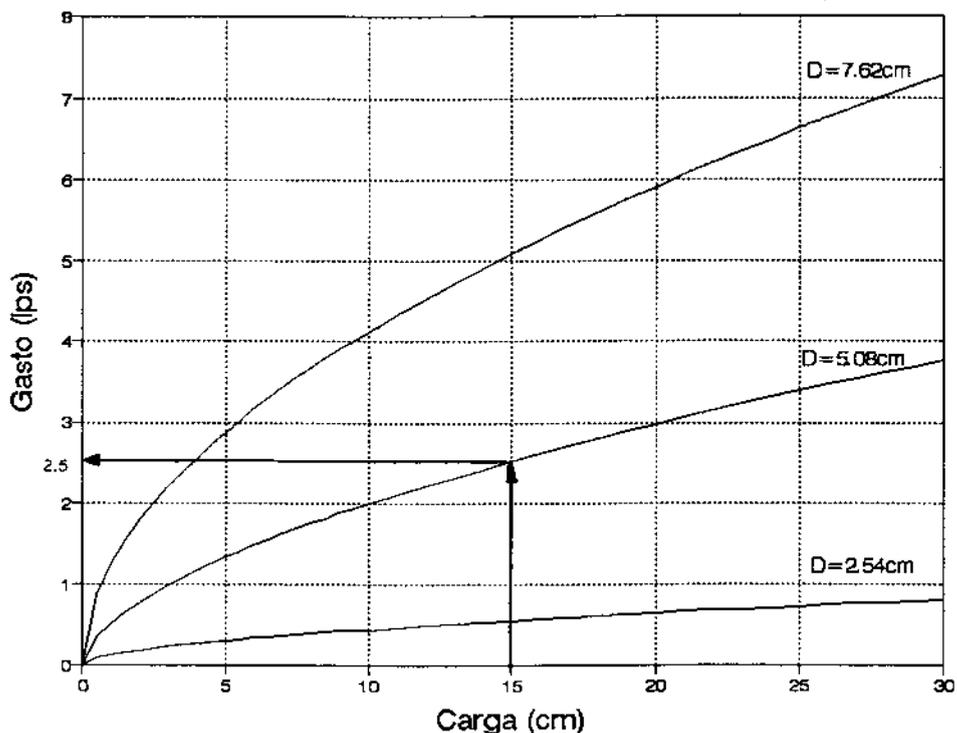
En estas ecuaciones: Q =Gasto en (lps)
 h =Carga (cm)

Las ecuaciones anteriores se han tabulado en el cuadro 21 y graficado en la lámina 61.

Cuadro 21. Relación carga-gasto, sifones de diferente diámetro (lps)

CARGA (cm)	DIAMETRO (cm)		
	2.54	5.08	7.62
0.5	0,09	0,35	0,87
1.0	0,13	0,52	1,25
1.5	0,16	0,66	1,54
2.0	0,19	0,78	1,79
2.5	0,21	0,89	2,01
3.0	0,23	0,99	2,21
3.5	0,25	1,08	2,39
4.0	0,27	1,17	2,56
4.5	0,29	1,25	2,72
5.0	0,31	1,33	2,88
5.5	0,32	1,40	3,02
6.0	0,34	1,48	3,16
6.5	0,35	1,55	3,30
7.0	0,37	1,61	3,42
7.5	0,38	1,68	3,55
8.0	0,40	1,74	3,67
8.5	0,41	1,81	3,79
9.0	0,42	1,87	3,90
9.5	0,43	1,93	4,01
10.0	0,45	1,99	4,12
11.0	0,47	2,10	4,33
12.0	0,49	2,21	4,53
13.0	0,51	2,31	4,72
14.0	0,53	2,42	4,90
15.0	0,55	2,51	5,08
16.0	0,57	2,61	5,26
17.0	0,59	2,70	5,42
18.0	0,61	2,80	5,59
19.0	0,63	2,88	5,75
20.0	0,65	2,97	5,90
21.0	0,66	3,06	6,05
22.0	0,68	3,14	6,20
23.0	0,70	3,22	6,34
24.0	0,71	3,30	6,48
25.0	0,73	3,38	6,62
26.0	0,74	3,46	6,76
27.0	0,76	3,54	6,89
28.0	0,77	3,61	7,02
29.0	0,79	3,69	7,15
30.0	0,80	3,76	7,28

Lámina 61. Curvas carga-gasto para sifones



Ejemplo: obtener el gasto que se entrega en un surco, mediante un sifón con diámetro de 5.08 cm, si la carga sobre éste es de 15 cm.

Mediante la curva (lámina 61), se ingresa en el eje horizontal con la carga de 15 cm, trazando una vertical hasta la intersección con la curva correspondiente al diámetro de 5.08 cm, y a partir de este punto, se traza una horizontal hasta el eje vertical resultando un gasto de 2.5 lps.

Considerando el cuadro 21, se obtiene un gasto de 2.51 lps que resulta de la carga de 15 cm.

Sustituyendo en la ecuación 3.10, la carga (h) de 15 cm, resulta un gasto de 2.51 lps.

$$Q = 0.5213 (15)^{0.581} = 2.51 \text{ lps}$$

3.1.5 Aforo mediante placa con orificios

Uno de los métodos más sencillos para medir el flujo de la corriente, es la placa sumergida con orificio. La placa se coloca dentro del surco perpendicularmente. Las placas con orificios se fabrican con láminas de hierro, acero o aluminio, que tienen aberturas maquinadas con precisión y cuyos diámetros varían desde 2.54 cm hasta 3.81 cm (1" hasta 1.5").

La lámina 62 muestra los detalles de construcción de una placa con tres orificios, de diámetros tales que permiten el aforo de flujos desde 0.5 lps hasta 4.0 lps, con cargas desde 1.3 cm hasta 3.5 cm. La placa que se muestra contiene ranuras cubiertas con plástico vinílico transparente que permite la lectura de la diferencia de carga, desde el lado de la placa aguas abajo.

Estas placas tienen varias ventajas: son sencillas, poco costosas, y fáciles de instalar. La corriente en el surco puede medirse con una diferencia de carga mínima, reduciéndose al mínimo el perímetro humedecido del surco encima del punto de medición y la probabilidad de derrame. Con un poco de cuidado en la colocación y la lectura, el margen de error en la medición no excederá del 5%.

En la práctica, el tamaño del orificio se elige de modo que la diferencia de carga varíe desde 1.3 cm hasta 63.5 cm (desde 0.5" hasta 25"), colocando la placa dentro y a través del surco en forma tal que el extremo superior quede lo más nivelado posible. El flujo a través del orificio debe quedar sumergido. En algunos casos, será necesario restringir el flujo de la placa aguas abajo para elevar este nivel del agua de la corriente hasta un punto ligeramente arriba del borde superior del orificio, dejando margen de unos milímetros para que la diferencia de carga se mantenga constante. Esta diferencia (de la placa aguas arriba y abajo) se mide con una regla. La lectura se aproxima a múltiplos de 0.1 cm. El flujo a través del orificio se calcula con la fórmula:

$$Q = C_d a \sqrt{2 g h} \quad (3.12)$$

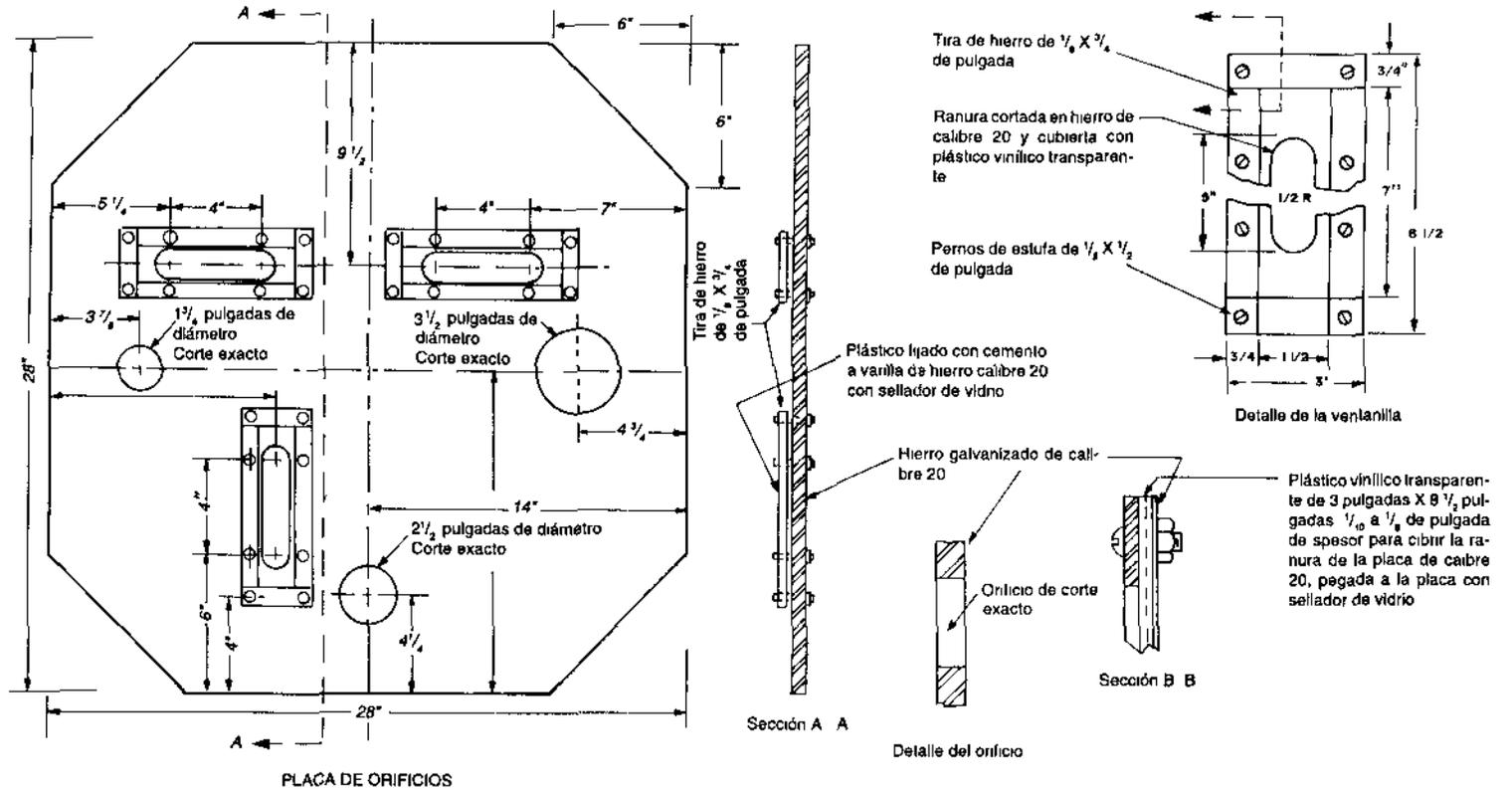
Donde

- Q = Gasto (lps).
- C_d = Coeficiente de descarga.
- h = Carga (cm).
- a = Área en cm².
- g = Aceleración de la gravedad (981 cm/s²).

Para diferentes diámetros de orificio en la placa, se han obtenido los valores de C_d (cuadro 22), así como los correspondientes gastos (cuadro 23).

Lámina 62. Placa con orificios para medir gasto en surcos

114



Materiales utilizados	
Nº	Descripción
1	Lámina de hierro del 20 de 28 X 28 pulgadas
6	Tira de hierro de $\frac{1}{8} \times \frac{3}{4}$ X 3 pulgadas
6	Tira de hierro de $\frac{1}{8} \times \frac{3}{4}$ X 7 pulgadas
3	3 X $9 \frac{1}{2}$ pulgadas, plástico vinílico transparente de $\frac{1}{16}$ a $\frac{1}{8}$ de pulgada
24	Pernos de estufa de $\frac{1}{8} \times \frac{1}{2}$ de pulgada

Cuadro 22. Coeficientes de descarga para orificios en placa

Diametro orificio (cm)	(pulgs)	Coeficiente Flujo libre	Coeficiente Flujo sumergido
1.91	(3/4)	0.61	0.57
2.54	(1)	0.62	0.58
3.24	(1 3/8)	0.64	0.61
4.45	(1 3/4)	0.63	0.61
5.08	(2)	0.62	0.61
6.35	(2 1/2)	0.61	0.60
7.62	(3)	0.60	0.60
8.89	(3 1/2)	0.60	0.60
10.16	(4)	0.60	0.60

Cuadro 23. Gasto para orificios en placa (lps)

Carga (cm)	Diametro orificio (cm)		
	4.45	6.35	8.89
1.0	0.43	0.86	1.65
1.5	0.53	1.05	2.02
2.0	0.61	0.21	2.33
2.5	0.69	1.35	2.61
3.0	0.75	1.48	2.86
3.5	0.81	1.60	3.08
4.0	0.87	1.71	3.30
4.5	0.92	1.81	3.50
5.0	0.97	1.91	3.69
5.5	1.02	2.00	3.87
6.0	1.06	2.09	4.04
6.5	1.11	2.18	4.20
7.0	1.15	2.26	4.36
7.5	1.19	2.34	4.52
8.0	1.23	2.42	4.66
8.5	1.26	2.49	4.81
9.0	1.30	2.57	4.95
9.5	1.34	2.64	5.08
10.0	1.37	2.70	5.21
10.5	1.41	2.77	5.34
11.0	1.44	2.84	5.47
11.5	1.47	2.90	5.59
12.0	1.50	2.96	5.71
12.5	1.53	3.02	5.83
13.0	1.56	3.08	5.94
13.5	1.59	3.14	6.06
14.0	1.62	3.20	6.17
14.5	1.65	3.26	6.28
15.0	1.68	3.31	6.39

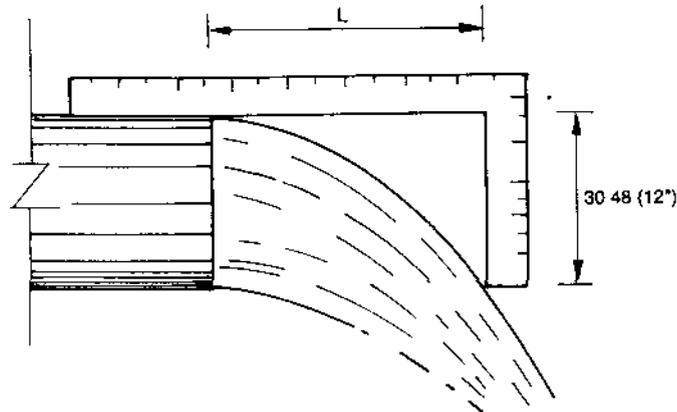
4 METODOS DE AFORO PARA DESCARGAS EN EQUIPOS DE BOMBEO

El abastecimiento de agua a través de pozos es de suma importancia, porque constituye una alternativa para aquellas zonas que no disponen de un escurrimiento superficial o de un vaso de almacenamiento. Los metodos para aforar descargas de equipo de bombeo se describen a continuación.

4.1 Metodo de la escuadra

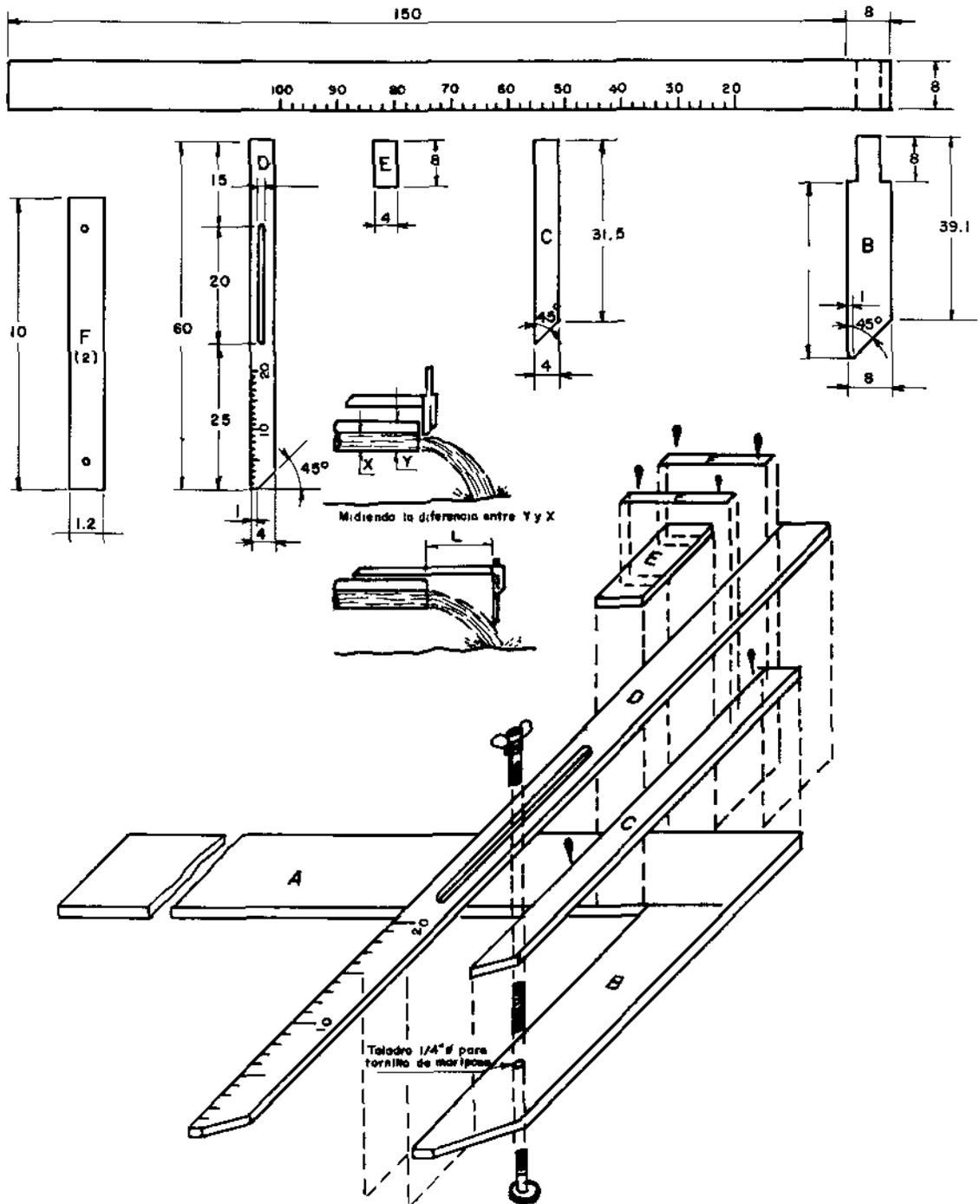
Para medir el flujo en tubos horizontales, mediante este metodo, es necesario medir una distancia horizontal y una vertical, componentes horizontal (L) y vertical (Y) respectivamente; la primera se mide desde la cuspide del interior del tubo hasta un punto de interseccion con la componente vertical, esta ultima se mide a partir de este punto hasta el punto donde el chorro cae en forma vertical (lámina 63). Este método de aforo es practico y rapido, pudiendose aplicar a tubos horizontales descargando llenos o parcialmente llenos.

Lamina 63. Aforo en tubo descargando lleno



Para aforar un tubo que descarga lleno se requiere determinar la componente horizontal del chorro (L), para medir esta componente, se ha ideado una escuadra adaptable (lamina 64), cuyo lado menor, componente vertical (Y), tiene una longitud de 30.5 cm (12"). En el cuadro 24 se tienen tabulados los gastos para diferente longitud de chorro y diámetro de tubería, conocidas estas dos variables se obtiene el valor del gasto (lps).

Lámina 64. Escuadra para aforo



Cuadro 24. Gasto en tubo, descargando lleno (lps)

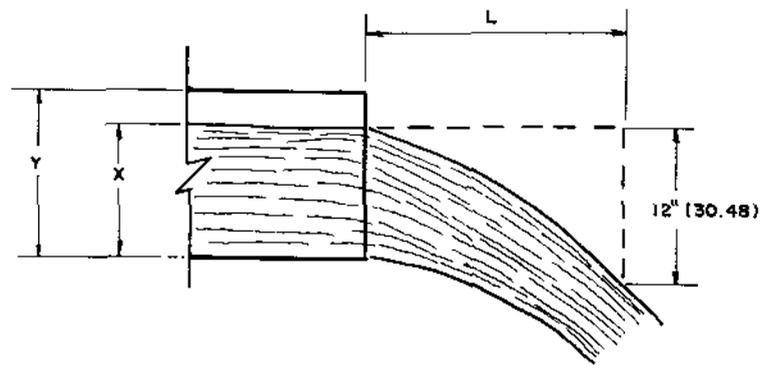
LONGITUD CHORRO (cm)	DIAMETRO DE LA TUBERIA (cm)						
	5.08 (2")	7.62 (3")	10.16 (4")	15.24 (6")	20.32 (8")	25.4 (10")	30.48 (12")
20	1.7	3.7	6.4	14.6	25.3	39.7	56.9
22	1.9	4.1	7.0	16.0	27.8	43.7	62.6
24	2.0	4.5	7.7	17.5	30.3	47.7	68.3
26	2.2	4.8	8.3	19.0	32.8	51.7	73.9
28	2.4	5.2	9.0	20.4	35.4	55.6	79.6
30	2.6	5.6	9.6	21.9	37.9	59.6	85.3
32	2.7	6.0	10.2	23.3	40.4	63.6	91.0
34	2.9	6.3	10.9	24.8	42.9	67.6	96.7
36	3.1	6.7	11.5	26.2	45.5	71.5	102.4
38	3.2	5.0	12.2	27.7	48.0	75.5	108.1
40	3.4	7.4	12.8	29.2	50.5	79.5	113.8
42	3.6	7.8	13.4	30.6	53.0	83.5	119.4
44	3.7	8.2	14.1	32.1	55.6	87.4	125.1
46	3.9	8.6	14.7	33.5	58.1	91.4	130.8
48	4.1	8.9	15.4	35.0	60.6	95.4	136.5
50	4.3	9.3	16.0	36.5	63.2	99.4	142.2
52	4.4	9.7	16.6	37.9	65.7	103.3	147.9
54	4.6	10.0	17.3	39.4	68.2	107.3	153.6
56	4.8	10.4	17.9	40.8	70.7	111.3	159.3
58	4.9	10.8	18.6	42.3	73.3	115.2	165.0
60	5.1	11.2	19.2	43.7	75.8	119.2	170.6
62	5.3	11.5	19.8	45.2	78.3	123.2	176.3
64	5.4	11.9	20.5	46.7	80.8	127.2	182.0
66	5.6	12.3	21.1	48.1	83.4	131.1	187.7
68	5.8	12.6	21.8	49.6	85.9	135.1	193.4
70	6.0	13.0	22.4	51.0	88.4	139.1	199.1
72	6.1	13.4	23.0	52.5	90.9	143.1	204.8
74	6.3	13.8	23.7	53.9	93.5	147.0	210.5
76	6.5	14.1	24.3	55.4	96.0	151.0	216.1
78	6.6	14.5	25.0	56.9	98.5	155.0	221.8
80	6.8	14.9	25.6	58.3	101.0	159.0	227.5
82	7.0	15.3	26.2	59.8	103.6	162.9	233.2
84	7.1	15.6	26.9	61.2	106.1	166.9	238.9
86	7.3	16.0	27.5	62.7	108.6	170.9	244.6
88	7.5	16.4	28.2	64.2	111.1	174.9	250.3
90	7.7	16.7	28.8	65.6	113.7	178.8	256.0
92	7.8	17.1	29.4	67.1	116.2	182.2	261.6
94	8.0	17.5	30.0	68.5	118.7	186.8	267.3
96	8.2	17.9	30.7	70.0	121.2	190.8	273.6
98	8.3	18.2	31.4	71.4	123.8	194.7	278.7
100	8.5	18.6	32.0	72.9	126.3	198.7	284.4

Ejemplo: determinar el gasto de una bomba, con tubo horizontal descargando lleno, con un diámetro de 20.3 cm (8") y una longitud del chorro (L) de 50 cm.

Considerando el cuadro 24, se ingresa en la columna correspondiente al diámetro de 20.3 cm y en la línea para una longitud de 50 cm, resulta un gasto de 63.2 lps.

Si el tubo descarga parcialmente lleno (lámina 65), el gasto se obtiene como si fuera un tubo a descarga llena, pero se determina el valor del tirante (X) del agua, midiendo la distancia desde la pared inferior hasta la superficie del agua. Con este tirante (X) y el diámetro interior del tubo (D), se obtiene la relación (X/D); con esta relación se ingresa al cuadro 25, para tomar el porcentaje (%) del área con respecto al tubo lleno; finalmente se transforma este porcentaje a decimal (%/100) y se multiplica por el gasto a descarga llena.

Lámina 65. Aforo en tubo descargando parcialmente lleno



Ejemplo: determinar el gasto de una bomba con tubo horizontal que descarga parcialmente lleno, cuyo diámetro (D) es de 15.2 cm (6") y longitud de chorro (L) de 48 cm. Si se mide un tirante de vacío de 12 cm.

Ingresando con estos valores de diámetro (D) y longitud (L) de chorro en el cuadro 24, resulta un gasto de 35 lps, que corresponde al tubo a descarga llena.

La relación se obtiene con el tirante de vacío (X) y diámetro (D).

$$R = \frac{X}{D} = \frac{12}{15.2} = 0.79$$

Con esta relación se ingresa en el cuadro 25, para obtener el porcentaje de área con respecto a tubo lleno, resultando 84.78 %.

Cuadro 25. Porcentaje de área con respecto a tubo lleno

X/D	%		X/D	%
0.01	0.17		0.51	51.27
0.02	0.47		0.52	52.55
0.03	0.88		0.53	53.82
0.04	1.34		0.54	55.09
0.05	1.87		0.55	56.35
0.06	2.44		0.56	57.63
0.07	3.08		0.57	58.89
0.08	3.74		0.58	60.13
0.09	4.46		0.59	61.40
0.10	5.21		0.60	62.64
0.11	5.98		0.61	63.89
0.12	6.80		0.62	65.13
0.13	7.64		0.63	66.36
0.14	8.51		0.64	67.58
0.15	9.41		0.65	68.81
0.16	10.33		0.66	70.02
0.17	11.27		0.67	71.72
0.18	12.24		0.68	72.41
0.19	13.23		0.69	75.99
0.20	14.23		0.70	74.76
0.21	15.27		0.71	75.95
0.22	16.31		0.72	77.08
0.23	17.38		0.73	78.21
0.24	18.45		0.74	79.34
0.25	19.54		0.75	80.44
0.26	20.66		0.76	81.54
0.27	21.79		0.77	82.62
0.28	22.92		0.78	83.68
0.29	24.06		0.79	84.78
0.30	25.24		0.80	85.77
0.31	26.41		0.81	86.77
0.32	27.59		0.82	87.76
0.33	28.78		0.83	88.73
0.34	29.98		0.84	89.67
0.35	31.32		0.85	90.59
0.36	32.42		0.86	91.49
0.37	33.64		0.87	92.36
0.38	34.87		0.88	93.20
0.39	36.11		0.89	94.02
0.40	37.06		0.90	94.79
0.41	38.60		0.91	95.54
0.42	39.85		0.92	92.26
0.43	41.11		0.93	97.30
0.44	42.37		0.94	97.56
0.45	43.65		0.95	98.13
0.46	44.91		0.96	98.66
0.47	46.18		0.97	99.12
0.48	47.45		0.98	99.52
0.49	48.73		0.99	99.88
0.50	50.00			

Finalmente, el gasto se obtiene transformando el porcentaje anterior a decimal y se multiplica por el gasto a tubo lleno.

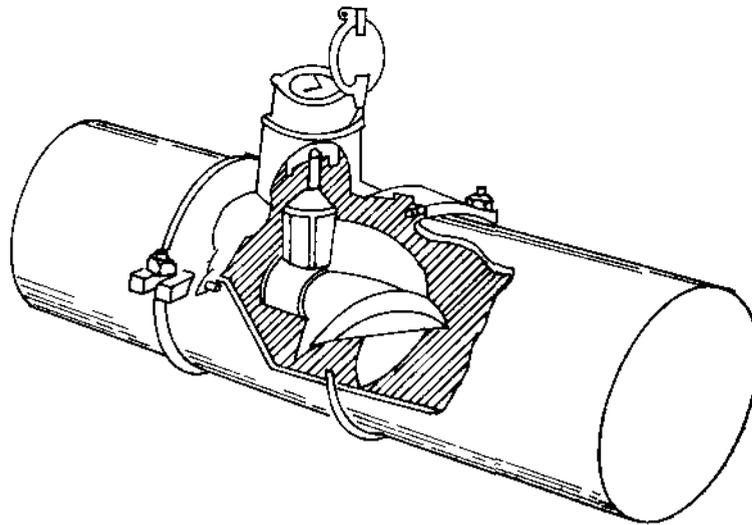
$$Q = 35 \times \frac{84.78}{100} = 29.7 \text{ lps}$$

Que es el gasto para tubo descargando parcialmente lleno.

4.2 Medidores de hélice.

Este tipo de medidor consiste de un propulsor cónico conectado a un registrador de carga mediante una serie de engranes. La hélice queda suspendida frente al centro del flujo (lámina 66). La velocidad de la hélice (rpm) es proporcional a la velocidad del flujo en la tubería y como el área de la sección transversal del tubo es conocida, entonces se conoce el gasto medio. Se pueden emplear en tuberías desde 10 cm hasta 183 cm (desde 4" hasta 72"). El medidor registra el gasto instantáneo o el volumen total; cuando esto último ocurre se conoce como medidor volumétrico totalizador.

Lámina 66. Medidor volumétrico en tubería

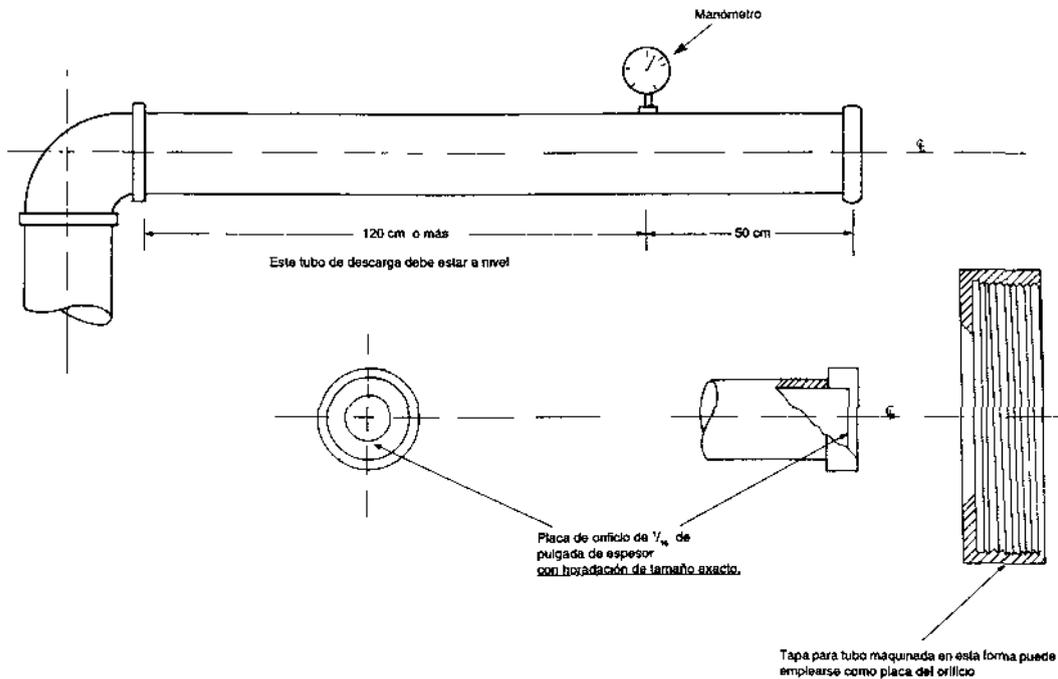


4.3 Medidores de orificio en tuberías

Los orificios en tuberías son generalmente circulares y se encuentran dentro del tubo horizontal o en su extremo de descarga. Cuando el orificio se encuentra en el tubo, la descarga no es libre y la carga (h), debe medirse en puntos situados aguas arriba y abajo, respecto al orificio. Esta carga, generalmente se mide con un manómetro.

Los tubos de orificio de uso más generalizado, para el aforo de agua de riego y gasto en pozos, tienen localizado el orificio circular en la descarga del tubo (lámina 67). Permiten la medición de gastos desde 3 lps hasta 130 lps. El tubo debe estar a nivel y el manómetro se coloca más o menos a 50 cm aguas arriba del orificio. Ningún codo, válvula u otros accesorios deben quedar a una distancia menor de 120 cm aguas arriba del manómetro. La relación entre el diámetro del orificio y el tubo no debe ser menor de 0.50 ni mayor de 0.83.

Lámina 67. Orificio circular colocado en la descarga de un tubo



El gasto a través del orificio se obtiene con la fórmula:

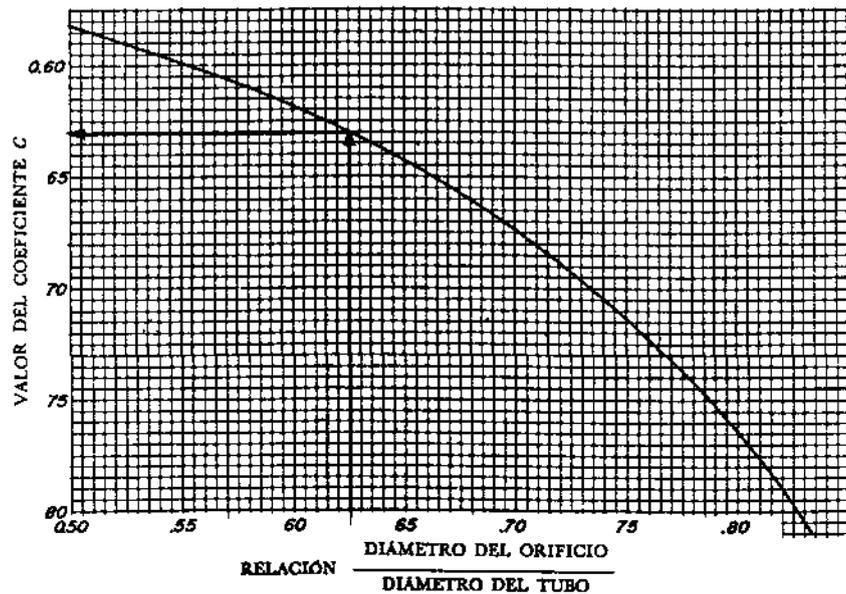
$$Q = \frac{C a \sqrt{2 g h}}{1000} \quad (4.1)$$

donde: Q=Gasto (lps)
 C=Coefficiente de descarga.
 a=Area del orificio en (cm²)
 g=Aceleracion de la gravedad (981 cm/s²).
 h=Carga sobre orificio (cm)

El coeficiente (C) de descarga depende de la relacion (R), que resulta del cociente de los diametros de orificio y tubo, asi como de otros factores que afectan el gasto en orificios. El valor del coeficiente (C) puede obtenerse de la grafica (lamina 68), en la que se entra con el valor de (R) dado por:

$$R = \frac{\text{Diámetro orificio}}{\text{Diámetro tubo}} \quad (4.2)$$

Lamina 68. Coeficiente de descarga (C) para orificios en tubo



Ejemplo: encontrar el gasto que pasa por un orificio de 12.7 cm (5") que se encuentra en el extremo de un tubo de 20.3 cm (8"), si la carga (h) en el manometro es de 160 cm.

Sustituyendo los diámetros de orificio y tubería en la ecuación 4.2

$$R = \frac{5}{8} = 0.625$$

Ingresando con esta relación (R) en la curva (lámina 68), resulta un coeficiente (C) de 0.63.

El área del orificio:

$$a = \Pi \times \frac{D^2}{4} = 3.1416 \times \frac{12.7^2}{4} = 126.7 \text{ cm}^2$$

El gasto se obtiene sustituyendo el coeficiente (C), área (a) y carga (h) en la ecuación 4.1, resultando:

$$Q = \frac{C a \sqrt{2 g h}}{1000} = \frac{0.63 \times 126.7 \times \sqrt{2 \times 981 \times 160}}{1000}$$

$$Q=44.8 \text{ lps.}$$

5 METODOS DE AFORO EN SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADOS

En los sistemas de riego presurizado en sus diferentes modalidades, se encuentran colocados dispositivos de riego (aspersores, micro-aspersores, goteros), cuya función principal es distribuir uniformemente una lamina de agua hacia los cultivos, a un gasto y presión determinados.

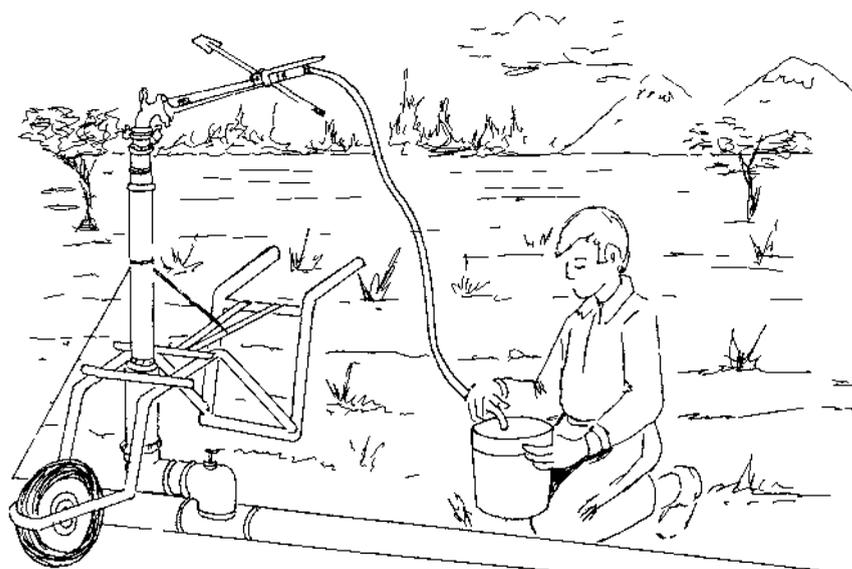
Para saber si los dispositivos de riego trabajan en óptimas condiciones, en cuanto a gasto y presión de operación, es necesaria su evaluación; la cual se lleva a cabo por un método de campo, que consiste en una prueba de aforo.

5.1 Aforo de aspersores, micro-aspersores y goteros

La prueba de aforo se basa en la relación volumen-tiempo y consiste en determinar el tiempo de llenado de un recipiente, de volumen conocido; realizándose de la manera siguiente: se coloca y se pone en operación el sistema como normalmente acostumbra el usuario, cuidando que al efectuar la prueba se encuentre estabilizada la presión.

Para tener una mejor precisión y validez en la medición del gasto, se recomienda conectar una manguera flexible directamente en la boquilla del aspersor (lámina 69), con la finalidad de que la descarga de este sea en forma directa al recipiente y así evitar posibles errores.

Lámina 69. Aforo en un sistema de riego presurizado

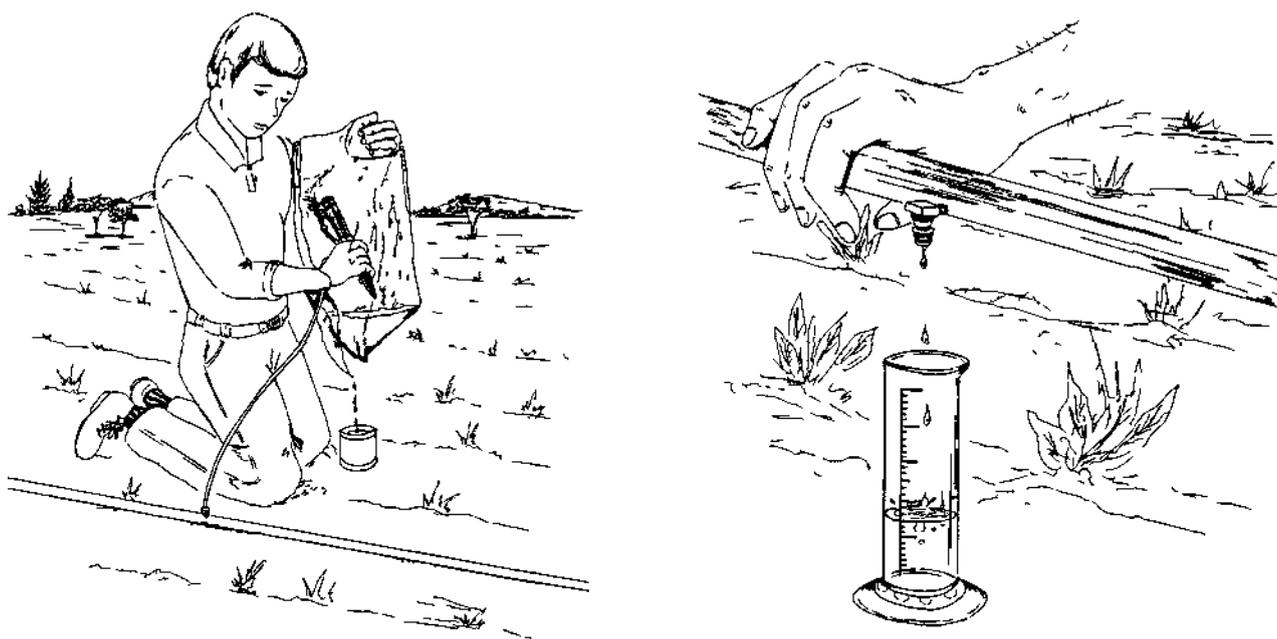


La descarga del aspersor se colecta en el recipiente, de volumen conocido (V), tomando en cuenta el tiempo (T) de llenado mediante un cronómetro y la presión de operación por medio de un manómetro. El gasto se obtiene por la siguiente expresión:

$$Q = \frac{V}{T} \quad (5.1)$$

También se sugiere que al realizar la prueba, se seleccionen los recipientes de volumen adecuado para el aforo, ya que la utilización correcta de estos dará como resultado una rápida y precisa prueba de aforo. Si se realizan aforos en aspersores de alta o mediana presión, se utilizan recipientes con una capacidad mínima de 20 lts (lámina 69), si la prueba se realiza en sistemas de micro-aspersión o goteo, los recipientes utilizables son botes de 1 lt o probetas graduadas (lámina 70).

Lámina 70. Aforo en microaspersor y gotero



5.2 Relación gasto-presión

En general, el funcionamiento de un sistema presurizado y el gasto que entrega, dependen de que se cumplan los requerimientos de carga establecidos por el fabricante. Cuando se instala un equipo de riego, se debe cuidar que trabaje dentro de este rango de presión (carga), de no ser así, el equipo no funcionará como es debido.

Si la presión (carga), proporcionada al sistema es menor que la establecida por el fabricante, este no entregará todo el gasto para el cual fue diseñado y en el peor de los casos puede llegar a no funcionar.

Si la presión proporcionada al sistema es mayor que la requerida, el gasto se incrementa pero hasta cierto límite, pues el equipo está diseñado para proporcionar cierto gasto. Lo que ocurre realmente es que aumenta la fricción en las paredes interiores del equipo, incrementando el desgaste, el agua sale de la boquilla en forma "pulverizada", disminuyendo así la lámina que llega al suelo.

La presión proporcionada al sistema puede ser de dos fuentes: un depósito elevado o equipo de bombeo.

Si se dispone de un depósito elevado, la presión puede transformarse en unidades de carga mediante:

$$1 \frac{Kg}{cm^2} \text{ (presión)} = 10 \text{ m (carga)} \quad (5.2)$$

Con la relación anterior, se hacen las conversiones correspondientes para conocer la presión disponible y compararla con la presión requerida, y así conocer las condiciones en que trabaja el sistema.

GLOSARIO DE TERMINOS

- AFORO:** Acción que consiste en medir el gasto que pasa a través de la sección transversal de una corriente.
- ACUIFERO:** Formación geológica que contiene un manto de agua considerable.
- AZOLVE:** Material inorgánico de granos finos.
- BOCATOMA:** Estructura construida al comienzo de un canal, para regular el caudal y detener el paso de material de arrastre en suspensión y sedimentos en el canal.
- CANAL:** Conducto artificial que sirve para mover el agua de un lugar a otro, empleando únicamente la fuerza de gravedad para realizar dicho movimiento.
- CARGA
HIDRAULICA:** Es la distancia vertical comprendida desde un punto de interés hasta la superficie libre del agua.
- CAUDAL:** Volumen de agua que atraviesa la sección transversal de una corriente, por unidad de tiempo.
- COMPUERTA:** Dispositivo que consiste en una placa móvil, plana o curva, que detiene o regula el paso del agua en canales, presas y otras estructuras hidráulicas.
- CALIBRAR:** Determinar la función que relacione el gasto con las variables que más lo afectan, esto en estructuras hidráulicas tales como: canales, compuertas o aspersores.
- CONVERGENTE:** Que se dirige a un mismo punto.
- CIMACIO:** Curva en forma de S prolongada, con un punto de inflexión.
- CORRIENTE:** Masa de agua que se mueve.
- CRESTA:** Pared horizontal de la escotadura que se encuentra en contacto con el líquido.

CAVITACION: Proceso que consiste en la formación de burbujas de aire en la zona de baja presión de una tubería y de su impulsión en la zona de alta presión, este fenómeno se caracteriza por un "golpeteo" en la tubería.

CONTRACCION: Reducción de la sección transversal del flujo de agua después de pasar por un orificio, vertedor o escotadura.

DESCARGA
AHOGADA: Orificio descargando al otro lado del represo, cuyo nivel está por abajo del canto inferior del orificio.

ESCOTADURA: Abertura practicada en la pared que limita un líquido, para permitir su paso.

ESCALA: Graduación de un instrumento de medida.

ESTANCAMIENTO: Depósito que retiene el agua.

EROSION: Arrastre de la capa superficial del suelo por diversos agentes.

ESCANDALLO: Pieza de plomo, que por su peso sirve para mantener en su posición al molinete, y evitar en lo posible que sea desviado de la vertical por la corriente.

ESTACION
DE AFORO: Lugar en el cual se realizan sistemáticamente observaciones para conocer el régimen del gasto de una corriente.

ESCUADRA: Pieza metálica, o de otro material, en forma de "L" para medir distancias en relación a dos líneas perpendiculares.

FLOTADOR: Objeto flotante que adquiere la velocidad superficial del agua.

FUENTE DE
ABASTECIMIENTO: Medio por el cual se suministra el líquido a los usuarios.

GARGANTA: Parte contraída de un canal o de una obra, con una sección de desague mínima, que es siempre más pequeña que la sección normal.

INMERSION: Acto de sumergir en un líquido.

INFILTRACION: Entrada lenta del agua a través de los poros del suelo.

LINEA DE
CORRIENTE: Línea que da la dirección de la velocidad del fluido en cada punto a lo largo del flujo.

LIMNIMETRO: Escala graduada instalada en una estación de aforo para registrar el nivel del agua.

LIMNIGRAFO: Dispositivo que da una representación gráfica de las variaciones del nivel del agua, en función de tiempo.

NOMOGRAMA: Representación gráfica de fórmulas o funciones.

MOLINETE: Dispositivo que sirve para medir la velocidad del flujo en un punto cualquiera de una sección transversal.

MANOMETRO: Instrumento para medir la presión de los fluidos.

OPERACION: Acciones y labores necesarias para el manejo del agua en la irrigación.

PRESA
DERIVADORA: Muro artificial construido sobre la sección transversal de un río y cuyo objeto es derivar en forma controlada el agua hacia un canal.

PRESA
ALMACENAMIENTO: Estancamiento artificial de los escurrimientos de una cuenca.

PIEZOMETRO: Dispositivo para medir la presión de una masa de agua.

PARAMETRO: Cantidad empleada como patrón de comparación.

PARED RUGOSA: Pared sólida que limita una corriente y cuyas irregularidades atraviesan la capa laminar produciendo turbulencia.

PERDIDA DE CARGA:	Pérdida de energía del flujo entre dos puntos.
RAPIDA:	Tramo del canal con pendiente muy pronunciada, que provoca un aumento de velocidad.
RUGOSIDAD:	Asperezas que se presentan en una superficie.
RASANTE:	Pendiente del fondo de un canal.
REMANSO:	Elevación del nivel, aguas arriba, sobre la superficie normal en una corriente causada por una obstrucción, tal como una presa o compuerta.
REGADERA:	Canal en el interior de la parcela que permite llevar el agua hasta el surco o melga
SONDEO:	Medición de la profundidad de un cauce, con una varilla o sonda, desde la superficie del agua hasta el lecho en uno o varios puntos.
SUPERFICIE LIBRE:	Superficie de agua expuesta a la presión atmosférica.
SIFON:	Conducto cerrado en el que se hace un vacío y sirve para trasladar el líquido de un recipiente a otro.
SECCION TRANSVERSAL:	Corte imaginario sobre un plano normal a la dirección del flujo.
TIRANTE:	Distancia vertical comprendida desde el fondo del canal hasta el nivel del agua.
TALUD:	Pared lateral del canal que puede ser inclinada o vertical.
TOMA:	Estructura para derivar la masa de agua a un canal.
VELOCIDAD:	Distancia recorrida por unidad de tiempo.
VENTURI:	Medidor del tipo de estrangulamiento en una tubería y constituido por un tramo cilíndrico corto.
VISCOSIDAD:	Propiedad de los fluidos en los cuales el roce de unas moléculas con otras, opone una resistencia al movimiento uniforme de su masa.

VASTAGO: Pieza en forma de varilla que sirve para articular o sostener otras piezas. Barra que sujeta al centro de una de las dos caras del émbolo.

VERTEDOR: Estructura colocada sobre la sección transversal de una corriente y cuya función es derivar, regular o medir el gasto que escurre a través de este.

BIBLIOGRAFIA

1. Aparicio Mijares, Francisco Fundamentos de hidrología de superficie. Ed. Limusa, 1989.
2. Bos, Marinus G.
Clemmens, Albert J.
Replogle, John A. Aforadores de caudal para canales abiertos. ILRI Publicación 38, 1986.
3. Chow, Ven Te Hidráulica de los canales abiertos. Ed. DIANA, 1983.
4. Correu Toledo, Guillermo
Andrade Vargas, Javier Manual para el alumbramiento de aguas subterráneas. Programa de perforaciones con recursos del F.I.R.A., 1974.
5. Dirección General de
Distritos de Riego, SARH. Conocimientos generales para que los aforadores y canaeros desempeñen eficientemente sus labores. Memorándum Técnico 192, 1962.
6. Ernes F., Brater
Williams, King Handbook of hydraulics. Ed. Mc. Graw-Hill, Inc. 8a Edición, 1976.
7. González Acevez, Pascual
Nassar García, Gerardo Construcción y calibración del aforador de garganta móvil "Chapingo". Departamento Irrigación, Universidad Autónoma de Chapingo, 1980.
8. Instituto de
Investigaciones Eléctricas
(C.F.E) Manual de diseño de obras civiles. Ecurrimiento, 1981.

9. Martínez Austria, Polioptro
Castillo González, Jorge Manual de diseño de aforadores de garganta larga. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 1991.
10. Ministerio de Obras
Públicas Diccionario técnico bilingüe de riego y drenaje. Madrid, España, 1977.
11. Palacios Vélez, Enrique Manual de operación de distritos de riego, Departamento Irrigación, Universidad Autónoma de Chapingo, 1979.
12. Secretaría de Recursos
Hidráulicos Instructivo para aforo de corrientes. 6a. Ed., 1964.
13. Servicio de Conservación
de Suelos Departamento de
Agricultura de E.U.A. Medición del agua de riego. Ed. DIANA, 1975.
14. Skertchly M, Leslie Manual de diseño de estructuras de aforo. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1988.
15. Sotelo Avila, Gilberto Hidráulica general. Volumen 1, Ed. Limusa, 1979.
16. Sparks E, Carl Discharge characteristic for radial gates at the división gates structure. Research Methods, IE 500. Arizona State University, Departament of Industrial Engineering, 1967.

17. Springall G., Rolando Hidrología. Instituto de
Ingeniería, UNAM, 1970.
18. S.R.H. La medida de agua para riego.
Memorándum Técnico 242, 1967.
19. Trueba Coronel, Samuel Hidráulica. Editorial CECSA,
1954.
20. Zierold Reyes, Luis Utilización de las compuertas
de las bocatomas y represas
como estructuras aforadoras,
Memorándum Técnico No. 196
SRH., 1973.

Manual de aforos, se terminó de imprimir en el mes de mayo de 1992 en los talleres de Impresión y Diseño. La edición consta de 500 ejemplares, y su cuidado estuvo a cargo de la Subcoordinación Editorial y Gráfica del IMTA.