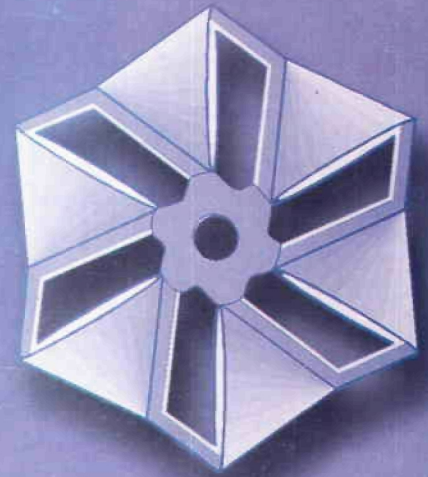


Instructivo para aforo con molinete





IMTA

INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA



SEMARNAP

Instructivo para aforo con molinete

2a edición
(Reimpresión)

*Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje
Juan Carlos Herrera Ponce
Efrén Peña Peña*

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA
DEL AGUA
CENTRO DE CONSULTA DEL AGUA

Jiutepec, Mor., octubre de 1999

DIRECTORIO DEL INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

Director General:
Dr. Alvaro A. Aldama

Coordinador de Tecnología de Riego y Drenaje:
Dr. Benjamín de León Mojarro

Subcoordinador de Ingeniería de Riego:
M.C. Efrén Peña Peña

REVISIÓN DE LA PRIMERA EDICIÓN:

Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje:
Dr. Luis Rendón Pimentel
M.C. Israel Velasco Velasco
Ing. José A. Guillén González

Coordinación de Sistemas Hidráulicos :
Dr. Polioptro Martínez Austria
Dr. Luis León Vizcaíno
M.I. Edmundo Pedroza González

Programa Editorial:
Lic. Javier Sicilia Zardaín

REVISIÓN DE LA SEGUNDA EDICIÓN:

Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje:
Dr. Luis Rendón Pimentel
M.C. Juan Carlos Herrera Ponce

Revisión literaria:
Lic. Antonio Requejo del Blanco

SE AGRADECE LA COLABORACIÓN DE:

Ing. José A. Guillén González
Ing. Jorge Castillo González
Ing. Rafael Espinosa Méndez

Título
Instructivo para aforo con molinete
2a. Edición
Diseño y Producción
Subcoordinación Editorial y Gráfica, IMTA

Diseño de portada:
Gema A. Martínez Ocampo
Ricardo Espinoza Reza

Colección Manuales
@ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Reservados todos los derechos
Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos
Tel: (73) 19 40 00 ext. 727
Fax: (73) 19 36 20
Hecho en México
Made in Mexico

Clasif. 620.064
H77
24337
C.B. 09934
Proced. DONACIÓN
Fecha 01.10.14

ÍNDICE GENERAL

PRÓLOGO	i
INTRODUCCIÓN	1
1 AFORO EN CANALES	3
1.1 <i>Conceptos básicos</i>	3
1.2 <i>Métodos de aforo usuales en canales</i>	5
2 SECCIÓN TRANSVERSAL	7
2.1 <i>Área de la sección transversal</i>	7
2.2 <i>Velocidad en la sección transversal</i>	12
2.3 <i>Gasto total del cauce</i>	14
3 AFORO CON MOLINETE	15
3.1 <i>Tipos de molinete</i>	15
3.1.1 <i>Molinete mecánico</i>	16
3.1.2 <i>Molinete eléctrico de copas</i>	16
3.2 <i>Pasos para aforar en una sección</i>	20
3.3 <i>Ejemplos de aforo con molinete</i>	32
ANEXO 1 OBTENCIÓN DE RELACIÓN ESCALA-GASTO	39
ANEXO 2 PRUEBAS PARA MOLINETES ELÉCTRICOS DE COPAS	45
ANEXO 3 INFORMACIÓN DE FABRICANTES	47
ANEXO 4 AFORO CON FLOTADOR	49
ANEXO 5 PASOS PARA AFORO CON MOLINETE	53
BIBLIOGRAFÍA	59

ÍNDICE DE LÁMINAS

1 Métodos de aforo en canales	5
2 Sección transversal de canal revestido	9
3 Área de una regadera de tierra limpia	10
4 Área de una regadera de tierra con hierba	11
5 Distribución de la velocidad en la sección transversal y en una vertical al centro del cauce	12
6 Profundidades de medición de la velocidad	13
7 Molinete mecánico de propela	17
8 Ensamblado del molinete eléctrico de copas <i>pigmeo</i>	19
9 Molinete eléctrico de copas <i>grande</i>	21
10 Marcas en un puente de aforos	22
11 Profundidad y altura de medición	23
12 Profundidad y altura de medición (método de seis décimos)	24
13 Alturas de medición (método dos y ocho décimos)	24
14 Corrección por desviación de la vertical	25
15 Registro de señales y tiempo	28
16 Hoja de calibración de un molinete <i>grande</i> , tipo Price	30
17 Fracción de una hoja de registro de aforo con molinete	32
18 Aforo en canal lateral revestido operando a máxima capacidad	33
19 Hoja de aforo para canal operando a mayor capacidad	34
20 Aforo en canal lateral revestido operando a menor capacidad	33
21 Hoja de aforo para canal operando a menor capacidad	35
22 Aforo en canal lateral de tierra	36
23 Hoja de aforo para canal de tierra	37
24 Aforo en regadera	36
25 Hoja de aforo en regadera	38
26 Relación escala-gasto ajustada	42
27 Ángulo de inclinación del talud de un canal	43
28 Área transversal para regaderas	49
29 Aforo con flotador	50
30 Medición con flotador en regadera de tierra con hierba	52

ÍNDICE DE CUADROS

1 Anchura de franja en función del ancho de la corriente	7
2 Factor K para corregir desviación de la vertical	25
3 Obtención de relación escala-gasto (método de regresión lineal simple)	40
4 Factor K para obtener la magnitud inclinada	44
5 Información sobre fabricantes	47

PRÓLOGO

En los distritos de riego transferidos se requiere que la entrega de agua sea por dotación volumétrica. La medición de volúmenes de agua, entregada o recibida en los diferentes niveles de operación, es una actividad fundamental para su distribución correcta; por esta razón, el personal relacionado directa o indirectamente con esta actividad debe estar bien capacitado en la metodología de aforo. A partir de la transferencia de los distritos de riego a los usuarios, la medición de los volúmenes de agua recibida o entregada ha requerido mayor precisión.

La Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje del IMTA ha desarrollado en forma periódica programas de capacitación para personal de la CNA y de las asociaciones de usuarios. En el marco de estos programas se han realizado cursos para aforo. En apoyo de estos cursos se han producido varios documentos, como la primera edición del *Instructivo para aforo con molinete* y el *Manual de aforos*.

Para elaborar esta segunda edición del *Instructivo para aforo con molinete*, se han tomado en cuenta las observaciones e inquietudes de varias personas relacionadas con la medición del agua. Estas opiniones han servido para simplificar algunos temas, profundizar en otros y enriquecer el instructivo con más ejemplos. Todo esto con objeto de que el personal con poca experiencia en el uso del molinete pueda realizar mediciones confiables.

El lenguaje empleado en este *Instructivo para aforo con molinete* es simple y de fácil acceso, ya que está dirigido a aquellas personas que se inician en esta actividad.

INTRODUCCIÓN

En un distrito de riego la conducción del agua, desde la fuente de aprovechamiento hasta la parcela, se realiza mediante un gran número de actividades.

El control y la medición de volúmenes de agua son actividades esenciales que se deben realizar desde la fuente de abastecimiento hasta las regaderas, con el fin de proporcionarle al cultivo la cantidad de agua que requiere. Para ejecutar estas actividades se dispone de métodos, instrumentos y estructuras de aforo.

A lo largo de los canales de un distrito de riego se pueden encontrar estructuras de medición, como los vertedores u otras, que permiten controlar y medir, tal es el caso de las compuertas calibradas.

El objetivo principal del presente trabajo es describir ampliamente el método de aforo con molinete para corrientes naturales y canales revestidos o de tierra.

Los principales objetivos del aforo son:

- Medir volúmenes entregados de agua a usuarios, en su parcela, y a canaleros, en puntos de control.
- Medir volúmenes perdidos de agua a lo largo de canales o corrientes naturales.
- Determinar la eficiencia de conducción.
- Distribuir correctamente el agua.
- Entregar a las parcelas el volumen de agua solicitado.
- Proteger la infraestructura hidráulica.



1 AFORO EN CANALES

1.1 Conceptos básicos

Para que sea más simple la comprensión del aforo con molinete es necesario manejar los siguientes conceptos:

- Aforo: medición del gasto o caudal de agua que conduce el canal o tubería.
- Tirante (profundidad): distancia de la superficie libre del agua al fondo del cauce.
- Escala: serie de divisiones que permiten indicar el valor de la magnitud que se mide.
- Área: superficie comprendida dentro de un perímetro. Se mide en centímetros cuadrados (cm^2), metros cuadrados (m^2), simplemente [L^2]. La unidad de medición para superficies de riego es la hectárea ($10,000 \text{ m}^2$). El área hidráulica para aforo es la comprendida dentro del perímetro hidráulico y la superficie libre del agua.
- Sección transversal: corte del cauce de agua, de tal forma que la dirección del flujo resulta perpendicular a este plano de corte.
- Velocidad: distancia que recorre una partícula en la unidad de tiempo (en nuestro caso una partícula de agua) y se expresa en centímetros por segundo (cm/s), metros por segundo (m/s) [LT^{-1}].
- Gasto o caudal: volumen de agua que pasa a través de la sección transversal de una corriente por la unidad de tiempo, se mide en: metros cúbicos por segundo (m^3/s), litros por segundo (l/s) [L^3T^{-1}].
- Volumen: espacio ocupado por un cuerpo de agua, se mide en centímetros cúbicos (cm^3), metros cúbicos (m^3) [L^3].

Cuando el volumen se asocia con el espacio que ocupa un prisma de área (A) y su altura, que se conoce como lámina (L), el volumen se obtiene con:

$$\text{Vol} = A L \quad (1)$$

Donde: A = área (m^2)
 L = lámina de agua (m)

Para evitar errores de cálculo, se debe tener cuidado al manejar las mismas unidades de medida.

Cuando el volumen se asocia con el gasto entregado en cierto intervalo de tiempo, el volumen se obtiene con:

$$Vol = Q t \quad (2)$$

Donde: Q = gasto o caudal (m^3/s)
 t = tiempo (segundos)

Ejemplo: Un productor desea regar su parcela de 6.4 ha de superficie con una lámina de 12 cm, suponiendo que no pierde agua en la conducción parcelaria, ¿qué volumen debe recibir en la entrada de su parcela?

Transformando unidades de superficie (ha a m):

$$\text{Área} = 6.4 \text{ ha} \times \frac{10,000 \text{ m}^2}{1 \text{ ha}} = 64,000 \text{ m}^2$$

Transformando unidades de lámina (cm a m):

$$\text{Lámina} = 12 \text{ cm} \times \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} = 0.12 \text{ m}$$

Sustituyendo área (A) y lámina (L) en ecuación 1:

$$Vol = (64,000 \text{ m}^2) (0.12 \text{ m}) = 7,680 \text{ m}^3$$

Ejemplo: el mismo productor mide en la entrada de su parcela un gasto promedio de 130 l/s durante 16 horas y 30 minutos. ¿Ha recibido el volumen solicitado?

Transformando unidades de gasto (l/s en m^3/s)

$$Q = 130 \frac{l}{s} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1,000 \text{ l}} = 0.130 \text{ m}^3/s$$

Transformando unidades de tiempo (h en seg)

$$t = 16.5 \text{ h} \times \frac{3,600 \text{ seg}}{1 \text{ h}} = 59,400 \text{ seg}$$

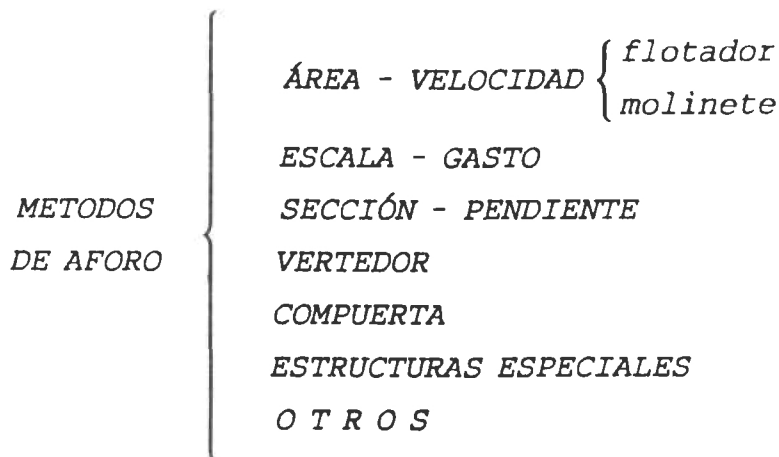
Sustituyendo gasto (Q) y tiempo (t) en ecuación 2:

$$Vol = (0.130 \frac{m^3}{s}) (59,400 \text{ s}) = 7,722 \text{ m}^3$$

1.2 Métodos de aforo usuales en canales

Cada método o estructura de aforo requiere de ciertas condiciones de operación para que el aforo sea confiable. Por esto se debe seleccionar la opción que mejor se adapte a cada caso específico. En la lámina 1 se enumeran los métodos de aforo más comúnmente empleados en los distritos de riego.

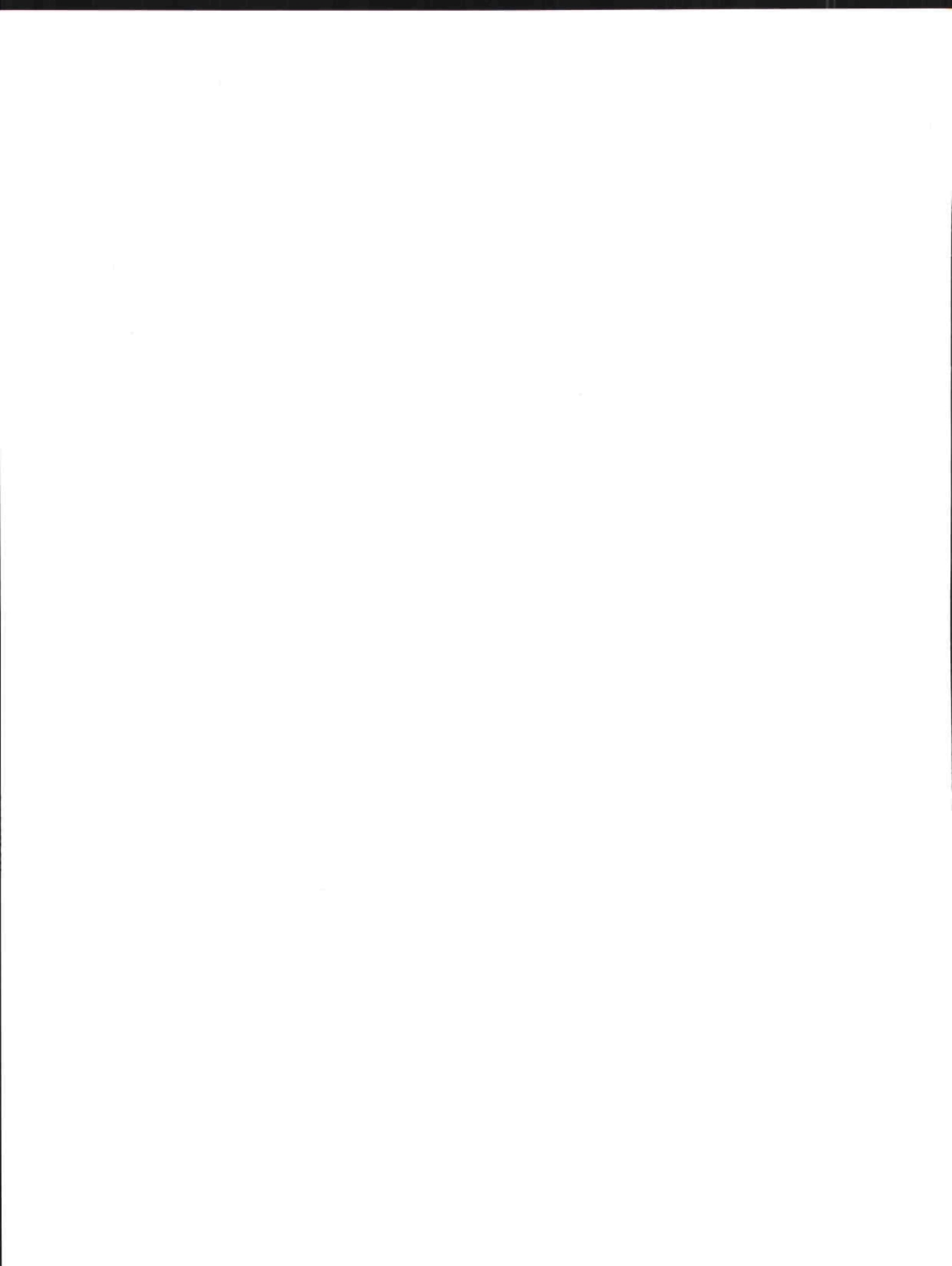
Lámina 1 Métodos de aforo en canales



En el presente trabajo se describe ampliamente el método de área y velocidad, que consiste en términos generales, en medir el área de la sección transversal de la corriente y la velocidad media del flujo para obtener el gasto como el producto del área y la velocidad. En canales, la velocidad generalmente se mide con flotador, molinete, colorantes u otros.

El molinete se emplea para aforar todo tipo de corrientes, su mayor potencial se obtiene en corrientes grandes, como ríos, canales principales o laterales; cuando la medición se realiza en forma correcta, el gasto aforado tiene un alto grado de confiabilidad.

El flotador se emplea para aforar corrientes que conducen gastos pequeños, como regaderas revestidas y sin revestir; para mayor información consultar el anexo 4.



2 SECCIÓN TRANSVERSAL

Debido a que la distribución de velocidades en un cauce no es uniforme, cuando se afora con molinete, se divide la sección transversal en franjas, con la finalidad de obtener en cada una de éstas el área y velocidad media del agua. El gasto por franja se obtiene multiplicando el área y la velocidad; el gasto total se calcula sumando los gastos de todas las franjas en que se dividió la sección transversal.

2.1 Área de la sección transversal

El área de la sección transversal puede ser regular, si el canal es revestido, o irregular, si es de tierra o cauce natural. En ambos casos, el área total se determina dividiendo la sección en franjas y sumando el área de todas ellas.

El ancho de cada franja depende del ancho del cauce y de la variación de la velocidad en la sección transversal. Para conseguir mayor precisión en la medición del área y en consecuencia del gasto, el ancho de cada franja debe ser menor mientras mayor sea la variación de la velocidad.

En general, se recomienda para canales de tierra con ancho menor de cuatro metros, ancho de la franja de ± 1.0 m. Para cauces con ancho menor de diez metros, franja de ± 2.0 m. En canales revestidos se considera además la influencia del talud para definir el ancho de las franjas; es decir, deben resultar franjas completas sobre la plantilla y los taludes del canal. El ancho de cada franja se obtiene con base en el cuadro 1.

Cuadro 1 Anchura de franja en función del ancho de la corriente

ANCHO CORRIENTE (m)	ANCHO FRANJA (m)
Hasta 2.0	0.50 - 1.00
2.0 - 4.0	1.00 - 2.00
4.0 - 10.0	2.00 - 4.00
10 - 50	4.00 - 6.00
50 - 100	6.00 - 10.0

Para determinar el área de una sección transversal se sigue este procedimiento:

- Seleccionar un tramo lo más recto posible y libre de maleza.
- Medir el ancho de la corriente. En secciones libres de maleza la medición se realiza de orilla a orilla, pues la maleza frena el movimiento del agua. Si ésta existe, la medición se realiza en la zona donde el agua fluye.

- Si el fondo del cauce presenta pocas irregularidades, dividir el ancho de la corriente en franjas de acuerdo con el cuadro 1, marcando sobre el puente para aforo o cable canastilla los puntos que las definen. Si el fondo presenta fuertes irregularidades, localizar los límites de las franjas en los puntos críticos del fondo. En ambos casos es preferible que el ancho de la franja sea múltiplo de 0.1 m, con el fin de facilitar cálculos posteriores.
- Dividir el ancho de cada franja en dos partes iguales, marcando el punto medio del ancho de la franja sobre el puente o cable canastilla.
- Medir las profundidades (tirantes) sobre los puntos marcados en el puente. Si son poco profundas hacerlo con varilla, de lo contrario, con sonda flexible y escandallo. A cada franja le corresponden tres tirantes (A, B y C). El tirante central (B) es único para cada franja, pero los tirantes extremos (A y C), de franjas vecinas, son comunes y corresponden a ambas franjas (lámina 2).

Ya que los canales revestidos pueden presentar irregularidades, es importante que se midan los tirantes, en los puntos marcados, con objeto de conseguir una mejor medición del área hidráulica.

Cuando se mide con sonda, ésta sufre una desviación de su vertical, causada por el empuje de la corriente; en el subcapítulo 3.2 se describe un método para corregir esta desviación.

- Calcular el tirante promedio (\bar{d}) con la expresión:

$$\bar{d} = \frac{A + 2B + C}{4} \quad (3)$$

Donde: \bar{d} = tirante promedio;
 A = tirante inicial (extremo);
 B = tirante central;
 C = tirante final (extremo).

- Calcular el área de cada franja (A) como el producto del tirante medio (\bar{d}) y el ancho de la franja (a):

$$A = a * \bar{d} \quad (4)$$

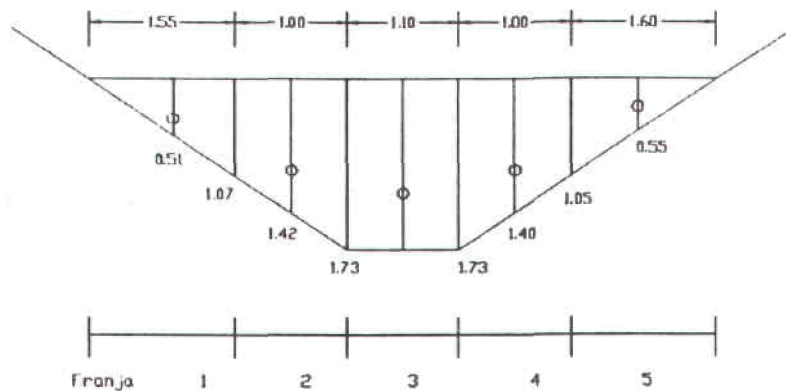
- Calcular el área de la sección transversal (A_T) sumando el área de las franjas (A_n):

$$A_T = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n \quad (5)$$

Cuando se mide el gasto de un cauce, el área de la sección transversal no se emplea en cálculos posteriores, ya que se utilizan las áreas parciales, quedando el área total como referencia.

Ejemplo: En la sección transversal de un canal revestido de concreto se han medido los tirantes y anchos de franja, según lámina 2.

Lámina 2 Sección transversal de canal revestido



A continuación se calculan los tirantes promedio de cada franja de la sección transversal. El tirante promedio se obtiene sustituyendo los tirantes A, B y C en la ecuación 3:

$$\bar{a}_1 = \frac{0.0 + 2 \times 0.51 + 1.07}{4} = \frac{2.09}{4} = 0.523 \text{ m}$$

$$\bar{a}_2 = \frac{1.07 + 2 \times 1.42 + 1.73}{4} = \frac{5.64}{4} = 1.41 \text{ m}$$

$$\bar{a}_3 = 1.73 \text{ m}$$

$$\bar{a}_4 = \frac{1.73 + 2 \times 1.40 + 1.05}{4} = \frac{5.58}{4} = 1.395 \text{ m}$$

$$\bar{a}_5 = \frac{1.05 + 2 \times 0.55 + 0.0}{4} = \frac{2.15}{4} = 0.538 \text{ m}$$

El área de la franja se obtiene con el tirante medio y ancho de cada franja (Ec. 4):

$$A_1 = 1.55 \times 0.523 = 0.8107 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 1.00 \times 1.410 = 1.410 \text{ m}^2$$

$$A_3 = 1.10 \times 1.730 = 1.903 \text{ m}^2$$

$$A_4 = 1.00 \times 1.395 = 1.395 \text{ m}^2$$

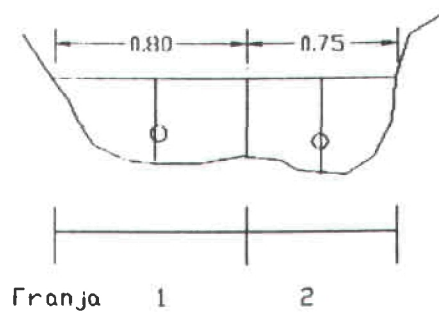
$$A_5 = 1.60 \times 0.538 = 0.8608 \text{ m}^2$$

Sumando estas áreas parciales (Ec. 5) se obtiene el área de la sección transversal.

$$A_T = 0.8107 + 1.410 + 1.903 + 1.395 + 0.8608 = 6.38 \text{ m}^2$$

Ejemplo: En una regadera de tierra se han medido los tirantes y anchos de franja (lámina 3).

Lámina 3 Área de una regadera de tierra limpia



Los tirantes promedio de cada franja:

$$\bar{d}_1 = \frac{0.0 + 2 \times 0.48 + 0.45}{4} = \frac{1.41}{4} = 0.353 \text{ m}$$

$$\bar{d}_2 = \frac{0.45 + 2 \times 0.52 + 0.0}{4} = \frac{1.49}{4} = 0.373 \text{ m}$$

El área de cada franja:

$$A_1 = 0.80 \times 0.353 = 0.282 \text{ m}^2$$

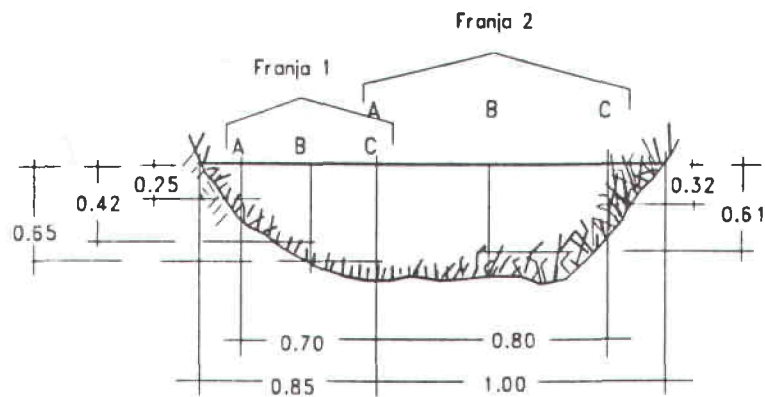
$$A_2 = 0.70 \times 0.373 = 0.261 \text{ m}^2$$

El área total:

$$A_T = 0.282 + 0.261 = 0.543 \text{ m}^2$$

Ejemplo: En la medición del ancho de la sección transversal de una regadera de tierra con hierba no se consideran 15 cm de una orilla, ni 20 cm de la otra, ni algunos centímetros del fondo, pues el pasto del fondo frena el movimiento del agua. Al hacer esto, el área que resulta es aquella en donde el agua se mueve (lámina 4).

Lámina 4 Área de una regadera de tierra con hierba



Los tirantes promedio de cada franja:

$$\bar{d}_1 = \frac{0.25 + 2 \times 0.42 + 0.65}{4} = \frac{1.74}{4} = 0.435 \text{ m}$$

$$\bar{d}_2 = \frac{0.65 + 2 \times 0.61 + 0.41}{4} = \frac{2.28}{4} = 0.570 \text{ m}$$

El área de cada franja:

$$A_1 = 0.70 \times 0.435 = 0.31 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 0.80 \times 0.570 = 0.456 \text{ m}^2$$

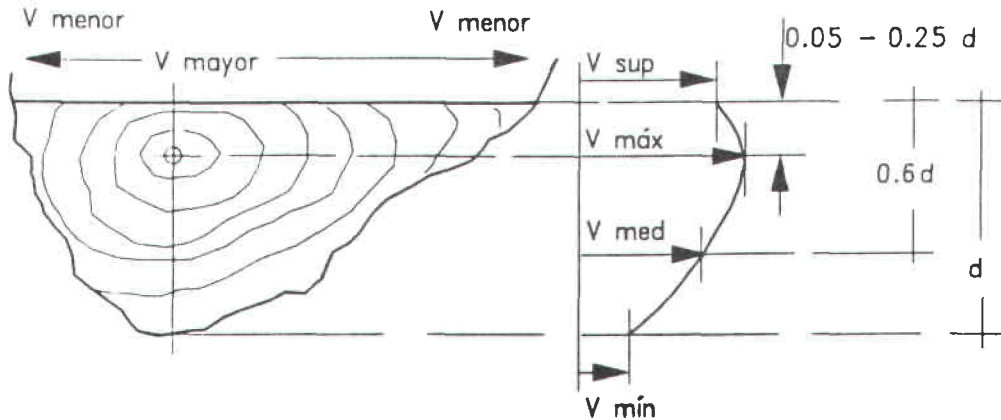
El área de la sección transversal:

$$A_T = 0.305 + 0.456 = 0.761 \text{ m}^2$$

2.2 Velocidad en la sección transversal

La velocidad del agua en la sección transversal y en una vertical de la corriente se distribuye aproximadamente como lo muestra la lámina 5.

Lámina 5 Distribución de la velocidad en la sección transversal y en una vertical al centro del cauce



En esta lámina se observa que en la sección transversal de una corriente se presentan isotacas (curvas que unen puntos con la misma velocidad). Por lo general la velocidad máxima tiende a presentarse en la zona más profunda de la sección, mientras que las velocidades mínimas en las orillas y en el fondo del cauce. Esto se debe a la fricción de las partículas de agua con las paredes del cauce. En lo ancho de la sección, la velocidad es más variable, mientras más irregular sea el fondo.

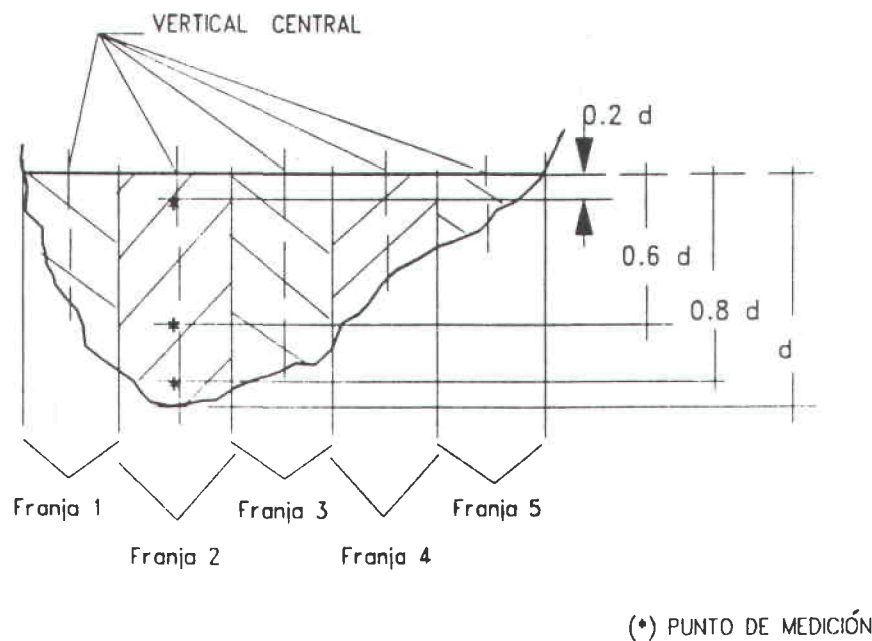
La velocidad sobre una vertical se distribuye como una parábola de eje horizontal, en la que la velocidad mínima se presenta en el fondo del cauce, aumentando hacia arriba hasta un punto en el que se presenta la velocidad máxima, a partir del cual disminuye hacia la superficie. La velocidad máxima se presenta de 0.5 a 0.25 de profundidad en la vertical, y la velocidad promedio a 0.6 de profundidad aproximadamente. Esta velocidad es la que se emplea para cálculos posteriores.

Ya que la velocidad varía a lo ancho de la sección transversal y sobre cada vertical, no se debe medir en un solo punto. Por el contrario, como ya se mencionó, hay que dividir la sección en franjas verticales (lámina 6) y medir la velocidad en la vertical central de cada una de ellas.

A continuación se describen cuatro métodos fáciles para obtener la velocidad media en una vertical (lámina 6). En todos los casos se debe repetir al menos tres veces la medición de la velocidad en el mismo punto y luego promediarlas.

- a) Si se promedian las velocidades obtenidas a dos y ocho décimos de profundidad, medida desde la superficie, se obtiene una estimación muy precisa de la velocidad media. Este método se recomienda cuando varíe mucho la velocidad en la vertical o cuando existen tirantes mayores de 1.0 m.
- b) Para tirantes menores de 1.0 m o para poca variación de la velocidad en la vertical, se recomienda medir la velocidad a seis décimos de profundidad, desde la superficie.
- c) Para pequeñas regaderas con área transversal menor de 0.6 m^2 , en las que no varía mucho la velocidad, se recomienda multiplicar la velocidad superficial por un coeficiente que varía desde 0.85 hasta 0.95.
- d) En ríos de gran profundidad se recomienda promediar las velocidades obtenidas a dos, seis y ocho décimos de profundidad.

Lámina 6 Profundidades de medición de la velocidad



La forma de medir la velocidad depende del tipo de molinete empleado. En el subcapítulo 3.2 se describe la forma de medir la velocidad según el molinete, así como algunos ejemplos.

2.3 Gasto total del cauce

Como se dijo anteriormente, dividir la sección transversal en franjas tiene como objetivo medir con mayor precisión el área y la velocidad. La precisión del gasto obtenido depende de estas mediciones.

El gasto por franja (q_i) se calcula multiplicando el área y velocidad de cada franja:

$$q_i = A_i * v_i \quad (6)$$

El gasto total (Q_T) es simplemente la suma de los gastos parciales (q):

$$Q_T = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n \quad (7)$$

Ejemplo: en la regadera con hierba del ejemplo anterior (lámina 4), además de las áreas, se midieron las velocidades en cada franja a seis décimos de profundidad: en la franja 1, $v_1 = 0.18$ m/s, y en la 2, $v_2 = 0.22$ m/s.

Los gastos de cada franja:

$$q_1 = 0.31 \text{ m}^2 \times 0.18 \text{ m/s} = 0.056 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$q_2 = 0.456 \text{ m}^2 \times 0.22 \text{ m/s} = 0.100 \text{ m}^3/\text{s}$$

El gasto total:

$$Q_T = 0.056 + 0.100 = 0.156 \text{ m}^3/\text{s} = 156 \text{ l/s}$$

3 AFORO CON MOLINETE

En los distritos de riego de México, se usa el molinete para determinar la velocidad del agua. Cuando la corriente es poco profunda, se monta en una varilla, y cuando es muy profunda se adapta a una sonda.

El molinete funciona de la siguiente manera: el agua en movimiento hace girar una propela o una rueda de copas, el número de revoluciones por segundo de la rueda o la hélice se relaciona con la velocidad del agua mediante una ecuación que se puede presentar en forma gráfica o tabular. Esta ecuación se aplica en el rango de operación en que fue calibrado previamente el molinete.

3.1 Tipos de molinete

Por la forma de contar el número de revoluciones de la propela o rueda, el molinete puede ser de tres tipos: *mecánico*, cuando un sistema de engranes proporciona el número de revoluciones de la propela; *eléctrico*, mediante un circuito eléctrico se cuentan las revoluciones y, por último, *electrónico*, en el que un sistema de circuitos integrados proporciona el número de revoluciones por segundo y la velocidad del flujo.

En los distritos de riego se ha generalizado el uso de molinetes eléctricos y mecánicos. Ambos tipos de molinete los fabrican comercialmente en el país diferentes fabricantes. La mayoría de los aforadores prefieren el molinete mecánico por dos razones: el fácil armado y la forma en que registra las vueltas de la *propela*, desgraciadamente con éste sólo se pueden aforar corrientes poco profundas. Para aforar corrientes más profundas existe un modelo de molinete eléctrico de copas que se monta en una sonda flexible.

Los molinetes electrónicos aún no se fabrican comercialmente en el país, las pocas instituciones que cuentan con estos, los han conseguido de importación. En algunos centros de investigación, este aparato se encuentra en etapa experimental, tal es el caso del que ha desarrollado el Instituto Politécnico Nacional (IPN).

Cualquiera que sea el tipo de molinete debe de estar previamente calibrado en un laboratorio. Si no se dispone de la tabla, la gráfica o la ecuación de calibración, la velocidad del agua no se puede determinar. *Es importante señalar que cada molinete dispone de su propia ecuación de calibración; por lo que no se debe emplear la de algún otro molinete. Además, para conservar su precisión, se debe llevar a calibrar periódicamente a un laboratorio de hidráulica autorizado.* El IMTA pondrá en operación, a partir de 1996, un banco para calibración de molinetes.

El molinete se debe calibrar cuando cambien sus características hidrodinámicas. Dependiendo del trabajo que desempeñe el aparato, sus características se alterarán en menor o mayor grado. La causa de esta alteración puede ser el cambio de forma de alguna de sus piezas como la propela, la horquilla, la cruceta o la rueda de copas; o por el desgaste sufrido en el pivote, la espiral, la corona, la joya u alguna otra pieza móvil.

3.1.1 Molinete mecánico

Este tipo de molinete es adecuado para aforar en pequeñas corrientes, donde la profundidad permita realizar la medición instalándolo en la varilla, cuya longitud máxima es de 2.0 m. Requiere una profundidad mínima de 0.10 m y puede medir velocidades del agua de 0.07 m/s a 2.0 m/s.

Las partes básicas del molinete mecánico son: el armazón o marco, donde se fijan los demás elementos; la propela, cuyo movimiento es originado por el flujo de agua; el eje, que trasmite el movimiento a las ruedas dentadas, las cuales registran el número de vueltas de la propela, así como otras piezas mostradas en la lámina 7.

El molinete se coloca con la propela contra la dirección del flujo, ésta se monta en el extremo del eje, el cual dispone de una sección con cuerda sinfín para transmitir el movimiento a dos engranes graduados A y B que registran las vueltas de la propela; siendo A el que cuenta de 1 a 100 vueltas, en múltiplos de 10, y el B de 100 a 1,000 revoluciones, en múltiplos de 100.

El embrague y desembrague del movimiento se efectúa por medio de un dispositivo elevador que puede ser de dos formas: con un solo cordón, el cual sirve para subir el soporte de cintas paralelas y la muelle para bajarlas; con dos cordones y balancín con dos levas, en éste último se sube mediante un cordón el soporte de paralelas y con el otro se bajan.

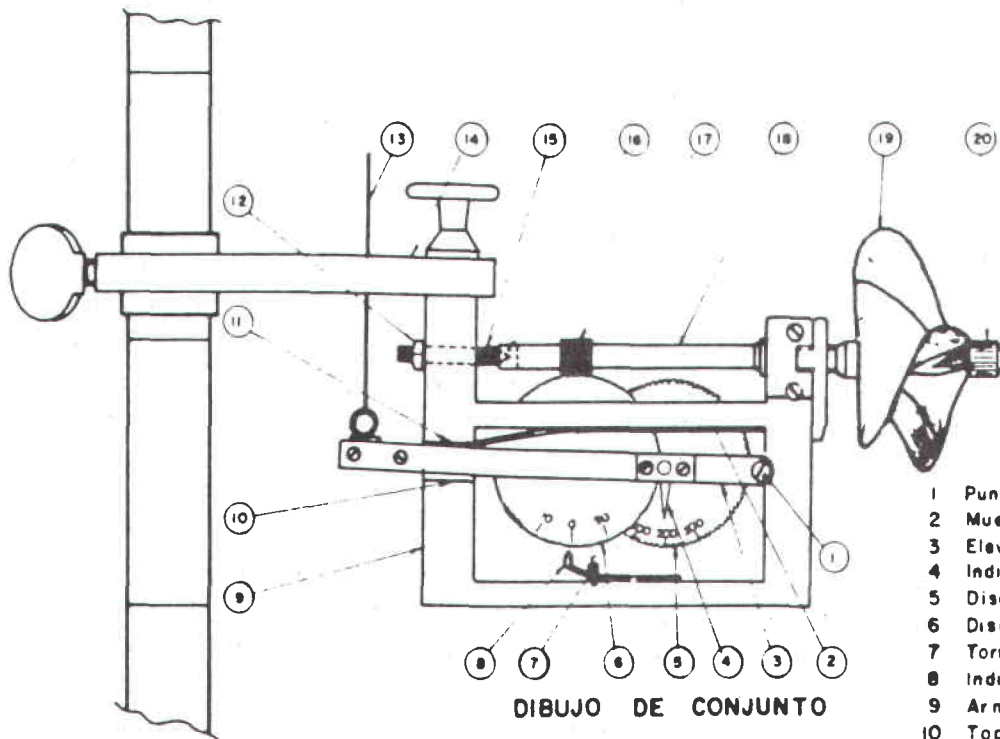
El conteo de las revoluciones de la propela se efectúa por lectura directa en los discos de engranes, uno de los cuales gira por embrague directo del sinfín del eje, midiendo hasta 100 revoluciones; el otro por transmisión del primero, mediante un piñón. Por cada vuelta completa del primer disco el segundo marca 100 revoluciones, acumulando sucesivamente de cien en cien, hasta mil.

El armado de este molinete es muy simple. Después de fijar la hélice en el eje, se monta el aparato en la varilla y se amarra el cordón en el mecanismo elevador, para efectuar desde el exterior el embrague y desembrague del disco A, en el sinfín del eje.

3.1.2 Molinete eléctrico de copas

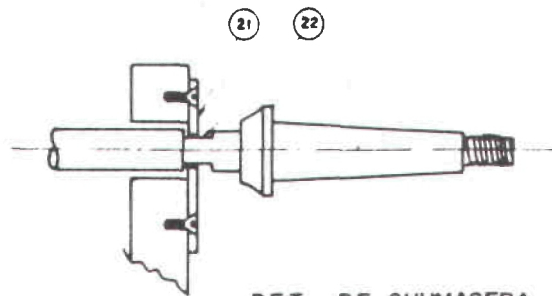
En México se fabrican dos tamaños de molinete eléctrico de copas: el *pigmeo* o *enano*, para bajas velocidades y corrientes chicas; y el *grande*, para altas velocidades y grandes corrientes; estos modelos son semejantes en forma. Ambos molinetes se colocan con la rueda de copas contra la dirección de la corriente.

Lámina 7 Molinete mecánico de propela

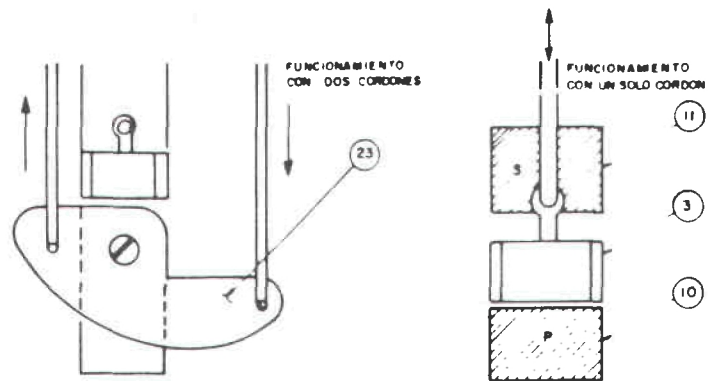


DIBUJO DE CONJUNTO

- 1 Punta de giro
- 2 Muelle de despegue
- 3 Elevador de los discos
- 4 Índice de centenas
- 5 Disco 'B'
- 6 Disco 'A'
- 7 Tornillo de corrección
- 8 Índice fijador
- 9 Armazón o marco
- 10 Tope inferior
- 11 Tope superior
- 12 Contra tuerca
- 13 Cordón elevador
- 14 Soporte
- 15 Pivote
- 16 Joya
- 17 Espiral
- 18 Eje
- 19 Hélice
- 20 Tuera opresora de hélice
- 21 Tope o collarín
- 22 Tramo de apoyo delantero
- 23 Balancín



DET. DE CHUMACERA



MECANISMOS ELEVADORES

Las partes básicas del molinete de copas son: la rueda de copas, cuyo giro es originado por la corriente del agua y se coloca contra la dirección de ésta; la horquilla, que sirve de sostén a las demás partes del molinete; la caja de contactos, donde se generan las señales para registrar las vueltas de la rueda de copas; la cruceta, para fijar el aparato en la varilla y otras piezas más que se muestran en las láminas 8 y 9. Las siguientes partes dependen del tipo de molinete: los timones, para proporcionarle estabilidad; la varilla, que consiste de cuatro tramos separables de 0.50 m con su zapata; la sonda flexible con sus terminales, su solera y su escandallo.

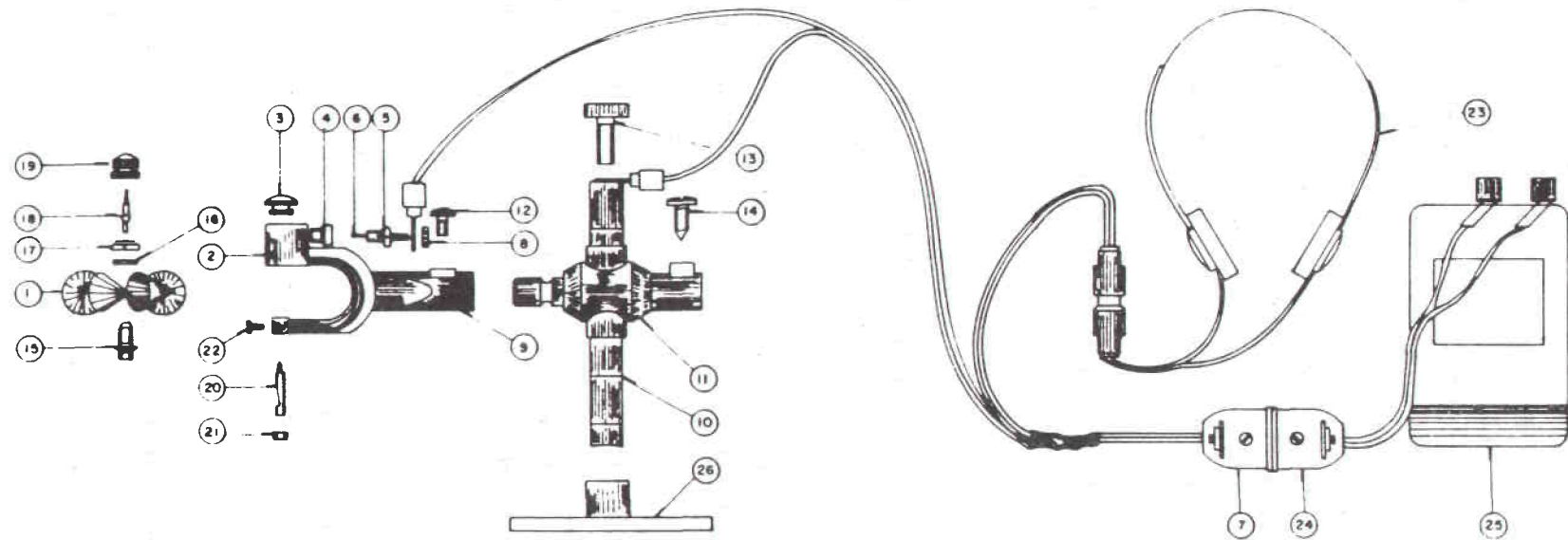
El número de vueltas de la rueda de copas, se registra mediante un *señal* sonora o de luz. El molinete *pigmeo* dispone de un *contacto simple* en la cámara, que registra una vuelta por señal, y opcionalmente un contacto doble que registra dos revoluciones por señal. El molinete *grande* dispone de dos contactos: el *simple* y el *contacto penta* que registra cinco vueltas por señal para altas velocidades del agua, de manera que la señal auditiva pueda registrarse claramente. Para registrar las señales, se conecta una terminal del circuito eléctrico en el contacto de la caja y la otra en el cuerpo del molinete, en la varilla o en la solera.

El molinete *pigmeo* solamente se puede montar en la varilla (lámina 8), por lo que se emplea en profundidades menores de 2.0 m. La zapata se atornilla en el extremo inferior de la varilla, con objeto de fijarla y mantenerla en posición vertical. El lado mayor de la zapata debe quedar paralelo a la dirección del flujo. Ensamblar este tipo de molinete es muy simple, ya que la rueda de copas y los dispositivos de la cámara de contactos vienen por lo general instalados en la horquilla. De no ser así la lámina 8 muestra con detalle la forma de ensamblar cada una de las partes. Si la horquilla tiene todas sus partes se procede a:

- a) insertar la cruceta, sujetándola con el tornillo correspondiente y cuidando que el eje de rotación de la rueda de copas quede vertical;
- b) insertar la varilla en la cruceta, fijándola a la altura de la medición deseada;
- c) atornillar la zapata en el extremo inferior de la varilla;
- d) conectar las terminales del circuito eléctrico, una en el tornillo de la caja de contactos y la otra en la varilla.

El circuito se cierra en la cámara. Cada vez que hacen contacto la aletilla del eje de la rueda y el resorte de contacto, se trasmite una señal luminosa o auditiva. Cada molinete mide en el rango de velocidades para el que fue calibrado, pero en general el *pigmeo* puede operar desde 0.015 m/s hasta 0.60 m/s.

Lámina 8 Ensamblado del molinete eléctrico de copas *pigmeo*



- 1 Rueda de copas
- 2 Cámara de contactos
- 3 Tapa de la cámara
- 4 Aislador
- 5 Tornillo de contacto
- 6 Resorte de contacto
- 7 Cable duplex
- 8 Tuerca del tornillo de contacto
- 9 Horquilla
- 10 Varilla de 0.50 m (cuatro)
- 11 Cruceta
- 12 Tornillo opresor de la cruceta
- 13 Tornillo opresor de la varilla

- 14 Tornillo opresor del timón
- 15 Maza soporte de la rueda copas
- 16 Rondana de ajuste
- 17 Tuerca sujetadora de la rueda de copas
- 18 Eje de union a la maza
- 19 Chumacera
- 20 Pivote
- 21 Tuerca del pivote
- 22 Tornillo sujetador del pivote
- 23 Audifonos
- 24 Cable con dos polos, con clavija y dos terminales
- 25 Pila (1.5 V)
- 26 Zapata

El molinete *grande*, si la profundidad lo permite, se puede montar en las varillas. El ensamblado es semejante al *pigmeo*. Pero en profundidades mayores que la longitud de las varillas (2.0 m), se emplea una sonda flexible. Para ello se retira la cruceta y se fijan los timones y la solera en el cuerpo de la horquilla. La solera se suspende de la sonda flexible. Y por último, se atornilla el escandallo (pescado) en la solera (lámina 9).

El escandallo se fabrica en aleaciones de plomo y su peso varía de 7 a 25 kg; se monta en la sonda flexible, con objeto de disminuir el arrastre causado por la corriente. Este arrastre provoca que el molinete se desvíe de la vertical un ángulo (ϕ) y en consecuencia que la longitud del cable no corresponda a la profundidad vertical que se desea medir. En consecuencia, la longitud del cable se debe corregir para compensar la desviación de su vertical; más adelante se describe cómo realizar esta corrección.

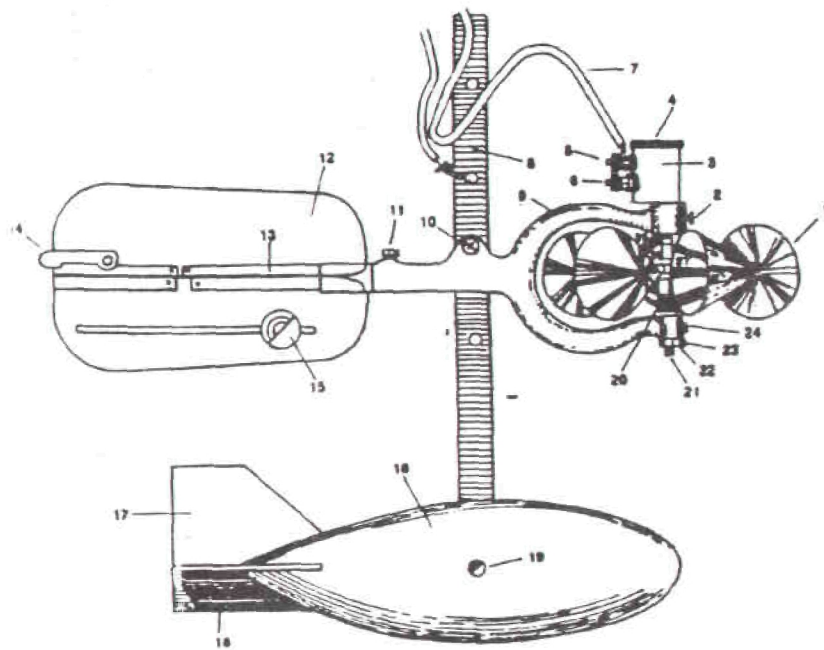
El rango de velocidades en que puede medir el molinete *grande*, varía en general desde 0.02 m/s hasta 4.0 m/s.

3.2 Pasos para aforar en una sección

A continuación se describen los pasos para aforar con molinete en cauces poco anchos y donde se dispone de un puente para aforos fijo o portátil. Las mediciones se deben anotar en la hoja para aforo con molinete.

- a) En gabinete, compruebe que el molinete que se va a emplear se encuentre en buen estado mecánico y disponga de su ecuación o tabla de calibración; en el anexo 2 se describen algunas pruebas para molinetes.
- b) En caso de emplear molinete eléctrico, comprobar que se reciban correctamente las señales. Para ello revise: conexiones, cable, pila; gire, además, la rueda de copas con las terminales del circuito eléctrico conectadas. Si no se recibe el número de señales considerado para las vueltas dadas, según el tipo de contacto seleccionado, revise en la caja de contactos que el resorte roce la aletilla del eje de la rueda; el roce debe ser ligero para evitar que detenga el giro del eje.
- c) En el campo, si no se dispone de una sección de aforo o un puente para aforos, seleccione un tramo lo más recto posible y una sección transversal regular; aléjelo de zonas con hierba, de caídas o de rápidas, y colóquelo en donde no haya obstrucciones y el agua corra libremente, es decir, donde no esté embalsada.
- d) En canales pequeños en los que no exista un puente para aforos, y si el ancho de la corriente lo permite, se puede emplear un puente portátil hecho con tablones de madera, apoyándolo únicamente en las paredes del canal. Los puentes sostenidos por columnas no son recomendables para aforar, porque frenan el flujo de agua.

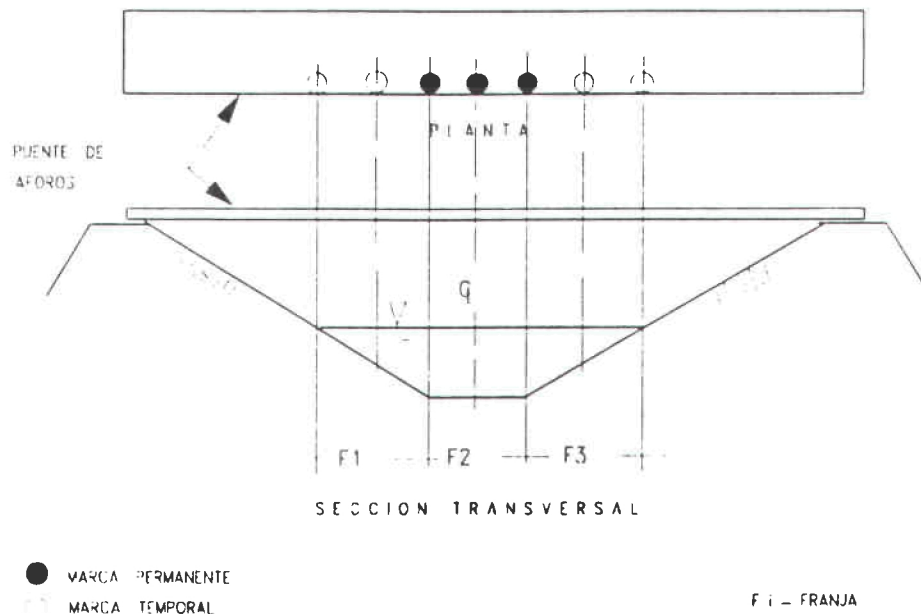
Lámina 9 Molinete eléctrico de copas grande



- 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 Soleta de soporte
- 9 Horquilla
- 10 Tornillo de suspensión en soleta
- 11 Tornillo de conexión entre horquilla y cole
- 12 Timón vertical
- 13 Timón horizontal
- 14 Broche de cierre para amarrar 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 oprimor
- 24 Tornillo de ajuste
- 25 Eje
- 26 Soporte de la rueda de copas
- 27 Tuerca del soporte
- 28 Tope 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 Tope del contacto penta
- 34 Espiral del contacto simple
- 35 Rosca de pasta aislante del contacto

- e) En la sección transversal de la corriente, mida el ancho del espejo de agua para definir el número de franjas, según el cuadro I. Marque sobre el puente para aforos los puntos límites y central de cada franja (A, B y C). Si el puente está sobre un canal revestido, las marcas sobre él pueden ser de dos tipos: permanentes, dependen de la geometría y son los puntos sobre la plantilla del canal; y temporales, dependen de la variación del tirante y son los que están sobre los taludes (lámina 10).

Lámina 10 Marcas en un puente de aforos



- f) En los puntos marcados, mida los tirantes; el tirante promedio de cada franja se calcula con

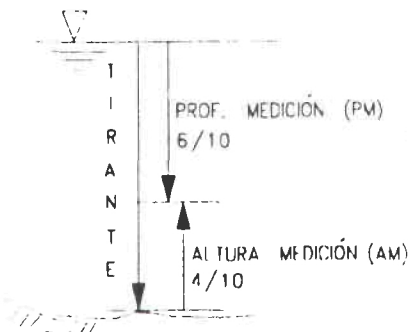
la ecuación:
$$\bar{d} = \frac{A + 2B + C}{4}$$

- g) En el punto central de cada franja introduzca el molinete a la profundidad de medición (PM), según método empleado (dos y ocho décimos, si se tiene mucha variación de velocidad y seis décimos si hay poca). La profundidad de medición (PM) se obtiene multiplicando el tirante por 6/10, 8/10 o 2/10, según sea el caso, y se mide de la superficie del agua hacia el fondo; esta forma de medición en campo es laboriosa.

Una forma más simple de colocar el molinete a la profundidad de medición (PM) es considerando la altura de medición (AM), que es la distancia del fondo hacia la superficie. Se puede obtener de dos formas:

- i) Primero, obtener la profundidad de medición (PM) y después restar al tirante ésta profundidad, lo que implica realizar dos operaciones.
- ii) Considerando el complemento del método empleado, la altura de medición (AM) se obtiene multiplicando éste por el tirante. La suma del método y su complemento es uno; por ejemplo, para el método de 6/10 su complemento es 4/10, ya que la suma de ambos es uno (lámina 11).

Lámina 11 Profundidad y altura de medición



Ejemplo: El tirante central de una franja mide 0.51 m, la velocidad se mide mediante el método de 6/10. A continuación se obtiene la profundidad (PM) y la altura de medición (AM), aunque en campo basta con obtener una de éstas.

La profundidad de medición (PM) es la distancia de la superficie hacia el fondo:

$$PM_{(6/10)} = 0.51 \times \frac{6}{10} = 0.31 \text{ m}$$

La altura de medición (AM), distancia del fondo hacia la superficie se puede obtener de dos formas.

- Restando al tirante la profundidad de medición (PM):

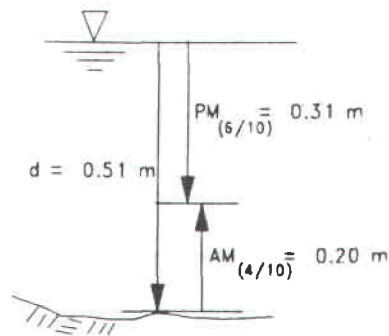
$$AM_{(4/10)} = 0.51 - 0.31 = 0.20 \text{ m}$$

- Multiplicando el tirante por el complemento de 6/10:

$$AM_{(4/10)} = 0.51 \times \frac{4}{10} = 0.20 \text{ m}$$

Esta última forma para obtener la altura de medición (AM) es más fácil, ya que se realiza mediante una sola operación. La lámina 12 muestra cómo el punto de medición, obtenido con la profundidad de medición (PM) y la altura de medición (AM), para el método de seis décimos, es el mismo.

Lámina 12 Profundidad y altura de medición (método de seis décimos)



Ejemplo: El tirante central de una franja mide 1.73 m, la velocidad se mide mediante el método de dos y ocho décimos. A continuación se obtiene únicamente la altura de medición.

La altura de medición (AM) a ocho décimos de profundidad se obtiene multiplicando el tirante por 8/10:

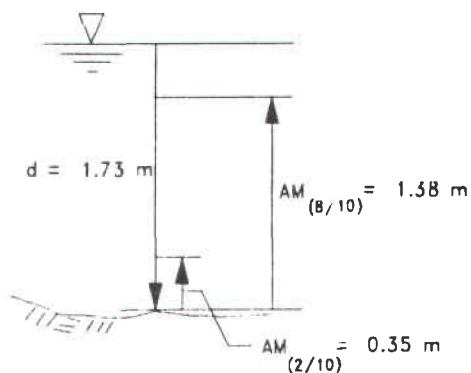
$$AM_{(8/10)} = 1.73 \times \frac{8}{10} = 1.38 \text{ m}$$

La altura de medición (AM) a dos décimos de profundidad se obtiene multiplicando el tirante por 2/10:

$$AM_{(2/10)} = 1.73 \times \frac{2}{10} = 0.35 \text{ m}$$

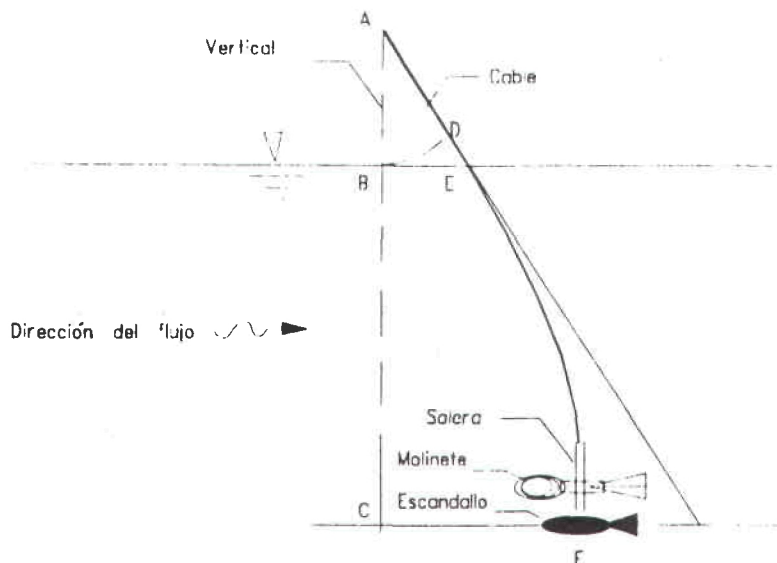
En estas alturas de medición (AM), indicadas en la lámina 13, se coloca el molinete para medir la velocidad del agua.

Lámina 13 Alturas de medición (método dos y ocho décimos)



- h) Como se ha mencionado, la sonda flexible que sostiene el molinete sufre una desviación, mostrada en la lámina 14. Debido al empuje de la corriente, la sonda se desplaza un ángulo (ϕ) con respecto a la vertical (AC), presentando una curvatura (AF).

Lámina 14 Corrección por desviación de la vertical



La longitud de la sonda se debe corregir por un factor K, el cual fue propuesto por Shenehon (1900), para obtener la profundidad vertical de la corriente (cuadro 2).

Cuadro 2 Factor K para corregir desviación de la vertical

ϕ	K	sec ϕ
10	.0050	1.0154
12	.0072	1.0223
14	.0098	1.0306
16	.0128	1.0403
18	.0164	1.0515
20	.0204	1.0642
22	.0248	1.0785
24	.0296	1.0946
26	.0350	1.1126
28	.0408	1.1326
30	.0472	1.1547
32	.0544	1.1792
34	.0620	1.2062
36	.0698	1.2361

La metodología para realizar la corrección por desviación de la vertical consiste en:

- medir la distancia vertical \overline{AB} ;
- sumergir la sonda hasta que el escandallo toque el fondo y medir \overline{AF} ;
- calcular la longitud superficial del cable $\overline{AE} = \overline{AB} \sec \phi$;
- obtener la longitud sumergida del cable $\overline{EF} = \overline{AF} - \overline{AE}$;
- calcular la profundidad real con: $\overline{BC} = (1 - k) \overline{EF}$

Ejemplo: Si la longitud total del cable es $AF=10.8$ m, la longitud vertical sin sumergir $AB=2.5$ m y el ángulo con respecto a la vertical $\phi=24^\circ$. Encontrar la profundidad BC.

De la lámina 5, a el ángulo $\phi = 24^\circ$ le corresponde $K = 0.0296$, sustituyendo valores resulta:

$$\overline{AE} = \overline{AB} \sec \phi = 2.5 \text{ m} \times \sec (24^\circ) = 2.5 \text{ m} \times 1.0946 = 2.7 \text{ m}$$

$$\overline{EF} = \overline{AF} - \overline{AE} = 10.8 \text{ m} - 2.7 \text{ m} = 8.1 \text{ m}$$

$$\overline{BC} = (1 - k) \overline{EF} = (1 - .0296) \times 8.1 \text{ m} = 7.9 \text{ m}$$

- i) Medición de tiempo y conteo de vueltas de la propela o de la rueda de copas. En cada punto de medición, el conteo de vueltas se debe repetir al menos tres veces. Si una de éstas resulta muy diferente se puede deber a alguna obstrucción de la rueda o a una mala lectura, entonces hay que eliminar y repetir. La medición y el conteo dependen del tipo de molinete empleado:

Molinete mecánico: se fija el molinete a la profundidad de medición. Para medir el tiempo se jala el cordón que opera el mecanismo elevador, el cual embraga el disco A con el sinfín y simultáneamente se oprime el botón del cronómetro, dejando trascurrir por lo menos 60 segundos antes de parar el movimiento de los discos. Para detenerlos se suelta el cordón o se acciona el cordón en el otro extremo, según sea el tipo de dispositivo elevador. Esto hace que la muelle desembrague los discos de la cuerda sinfín del eje.

Para simplificar la lectura de los discos se puede colocar en ceros sus índices, girando manualmente la propela. De otra forma basta con tomar lecturas de los discos antes de meter el aparato en el agua y, después de sacarlo, restar las lecturas y obtener así el número de vueltas para el tiempo considerado, para calcular las revoluciones por segundo.

Se debe tener cuidado, antes de meter el molinete en el agua, de que el disco A esté desembragado del sinfín, es decir, que aunque la propela se mueva los discos no giren.

Ejemplo: Se ha medido la velocidad con un molinete mecánico, la lectura de los discos antes de introducir el aparato en el agua fue de 25, después de sacarlo, de 89; el tiempo de observación fue de 60 segundos y su ecuación de calibración es:

$$V = 0.16 N + 0.03$$

El número de revoluciones (vueltas) de la propela se obtiene restando las lecturas.

$$\text{núm vueltas} = 89 - 25 = 64$$

La velocidad se obtiene mediante la ecuación del molinete, ya que no se dispone de la tabla de calibración. Sin embargo, primero hay que obtener el número de revoluciones por segundo (N), dividiendo el número de vueltas de la propela por el tiempo:

$$N = \frac{64}{60} = 1.067$$

y después, la velocidad del agua, sustituyendo el número de revoluciones por segundo (N) en la ecuación para el molinete:

$$V = 0.16 \times 1.067 + 0.03 = 0.201 \text{ m/s}$$

Molinete eléctrico: se monta el molinete en la varilla o en la sonda y se posiciona a la profundidad correspondiente. La medición del tiempo y el registro de vueltas de la rueda de copas es semejante en ambos tipos de molinete, depende del número de vueltas por señal y éste a su vez del tipo de contacto.

Cuando el molinete dispone de contactos que registran más de una vuelta de rueda de copas por señal, es mejor fijar el número de señales (vueltas) y registrar el tiempo con objeto de reducir errores de lectura.

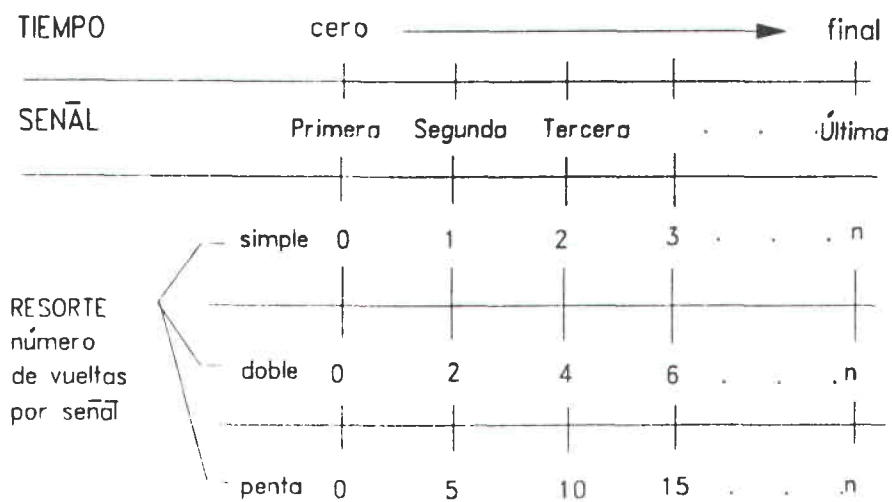
En los casos descritos a continuación se debe iniciar con el número de señales o intervalos de tiempo indicados, para garantizar que la medición quede comprendida dentro del intervalo de tiempo en que se calibró el molinete, pues generalmente el tiempo mínimo del intervalo es de 40 segundos (este tiempo se ha empleado en varias calibraciones).

- i) Cinco vueltas por señal (contacto penta): inicie con seis señales o más. El tiempo se empieza a contar a partir de la primer señal y se termina al completar el número de señales. El número de vueltas se obtiene multiplicando el número de señales por cinco. El molinete tipo Price dispone del contacto penta, que se recomienda para más de una vuelta por segundo de la rueda.

- ii) Dos vueltas por señal (contacto doble): inicie con 15 señales o más. El tiempo se empieza a contar a partir de la primera señal. El número de vueltas se obtiene multiplicando el número de señales por dos. El molinete *pigmeo* se puede habilitar de fábrica con el contacto doble y se recomienda para más de una vuelta por segundo de la rueda de copas.
- iii) Una vuelta por señal (contacto simple): inicie con un intervalo de tiempo de 60 segundos o más. Se debe tener cuidado de sincronizar la primer señal con el inicio del tiempo. El número de señales corresponde a las revoluciones (vueltas) dadas. Ambos molinetes, *pigmeo* y *grande*, disponen de este contacto. Se debe emplear cuando la velocidad de corriente genere no más de una vuelta por segundo de la rueda de copas.

En todos los casos (contacto simple, doble y penta) al aparecer la primer señal se presiona el botón del cronómetro para asignarle el número cero; a la segunda se le asigna el uno; a la tercera, el dos y así sucesivamente (lámina 15); esto porque en la primer señal se tiene el tiempo cero y no se ha completado ninguna vuelta, mientras que en la segunda se completa una vuelta o cinco, según el tipo de contacto empleado.

Lámina 15 Registro de señales y tiempo



Ejemplo: Se ha medido la velocidad con un molinete *grande*, cuya hoja y ecuación de calibración se muestran en la lámina 16. Considerando el contacto penta para un número de ocho señales, que es mayor de las seis recomendadas, se registró un tiempo de 51 segundos, el cual está comprendido en el intervalo de la tabla, que varía de 40 a 70 segundos.

Primero, se debe obtener el número de vueltas de la rueda de copas:

$$\text{núm vueltas} = 5 \times \text{núm señales} = 5 \times 8 = 40$$

La velocidad del agua se puede obtener mediante la ecuación o la tabla de calibración.

Ecuación: considerando la ecuación de calibración del molinete, que es:

$$v = 0.69789 N + 0.01318$$

obtener el número de revoluciones por segundo de la rueda que se denota por RPS o N, y que se obtiene dividiendo el número de vueltas (40) por el tiempo (51 segundos).

$$N = RPS = \frac{40}{51} = 0.7843$$

La velocidad se calcula sustituyendo N en la ecuación del molinete empleado:

$$V = 0.69789 (0.7843) + 0.01318 = 0.561 \text{ m/s}$$

Tabla: considerando la tabla de calibración (lámina 16) se entra con el número de revoluciones de la rueda de copas (40) y el tiempo (51), lo que da como resultado la misma velocidad de 0.561 m/s.

- j) Terminada la medición, seque cuidadosamente el aparato y lubrique con una gota de aceite ligero (por ejemplo, "Tres en Uno") todas las partes de contacto del molinete como son: la chumacera, la flecha, la joya, etcétera.
- k) Hasta este punto se han completado las mediciones. Lo que sigue es llenar la hoja para aforo con molinete. A continuación se describen los datos que deben anotarse en las columnas de la hoja:
- 1: Distancia (m) del origen al punto límite o punto de aforo. Esta columna se ocupa principalmente cuando se afora con canastilla, en corrientes anchas.
 - 2: Profundidad o tirante (m) se considera desde el nivel del agua hasta el fondo del cauce. En esta columna se anotan las profundidades (A,B,C) de todas las franjas.
 - 3: Método empleado para medir la velocidad. Pueden ser de seis décimos (6/10); dos y ocho décimos (2/10 y 8/10); dos, seis y ocho décimos o superficial (sup).
 - 4: Profundidad (m) a que se coloca el molinete. Según el método descrito en la columna anterior, resulta del producto de las columnas 2 y 3. Con el método de dos y ocho décimos se tendrán dos profundidades de medición de la velocidad (lámina 17). Con el superficial o el de 6/10 de profundidad, se tendrá una sola medición.

Lámina 16 Hoja de calibración de un molinete *grande*, tipo Price

SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRÁULICOS																						
SUBDIRECCIÓN DE HIDROLOGÍA																						
DEPARTAMENTO DE HIDROMETRIA																						
TABLA DE VELOCIDADES EN METROS POR SEGUNDO																						
R=Número de revoluciones											T=Tiempo en segundos											
T	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	150	200	250
40	0.031	0.048	0.066	0.083	0.100	0.188	0.275	0.362	0.449	0.537	0.624	0.711	0.798	0.886	1.060	1.234	1.409	1.583	1.758	2.630	3.503	4.375
41	0.030	0.047	0.064	0.081	0.098	0.183	0.269	0.354	0.439	0.524	0.609	0.694	0.779	0.864	1.035	1.205	1.375	1.545	1.715	2.586	3.418	4.289
42	0.030	0.046	0.063	0.080	0.096	0.179	0.262	0.348	0.429	0.512	0.595	0.678	0.761	0.844	1.010	1.176	1.342	1.509	1.675	2.506	3.336	4.167
43	0.029	0.046	0.062	0.078	0.094	0.175	0.257	0.338	0.419	0.500	0.581	0.662	0.744	0.825	0.987	1.149	1.312	1.474	1.636	2.448	3.259	4.071
44	0.029	0.045	0.061	0.077	0.092	0.172	0.251	0.330	0.410	0.489	0.568	0.648	0.727	0.806	0.965	1.123	1.282	1.441	1.599	2.392	3.185	3.978
45	0.029	0.044	0.060	0.075	0.091	0.188	0.248	0.323	0.401	0.478	0.556	0.634	0.711	0.789	0.944	1.099	1.254	1.409	1.564	2.340	3.115	3.890
46	0.028	0.044	0.059	0.074	0.089	0.165	0.241	0.317	0.392	0.468	0.544	0.620	0.696	0.772	0.924	1.075	1.227	1.379	1.530	2.289	3.048	3.806
47	0.028	0.043	0.058	0.073	0.087	0.162	0.236	0.310	0.384	0.459	0.533	0.607	0.681	0.756	0.904	1.053	1.201	1.350	1.498	2.241	2.983	3.725
48	0.028	0.042	0.057	0.071	0.086	0.159	0.231	0.304	0.377	0.449	0.522	0.595	0.667	0.740	0.886	1.031	1.176	1.322	1.467	2.194	2.921	3.648
49	0.027	0.042	0.056	0.070	0.084	0.156	0.227	0.298	0.369	0.440	0.512	0.583	0.654	0.725	0.868	1.010	1.153	1.295	1.437	2.150	2.862	3.574
50	0.027	0.041	0.055	0.069	0.083	0.153	0.223	0.292	0.362	0.432	0.502	0.572	0.641	0.711	0.851	0.990	1.130	1.269	1.409	2.107	2.805	3.503
51	0.027	0.041	0.054	0.068	0.082	0.150	0.218	0.287	0.355	0.424	0.492	0.561	0.629	0.697	0.834	0.971	1.108	1.245	1.382	2.066	2.750	3.434
52	0.027	0.040	0.053	0.067	0.080	0.147	0.214	0.282	0.349	0.416	0.483	0.550	0.617	0.684	0.818	0.953	1.087	1.221	1.355	2.026	2.697	3.368
53	0.026	0.040	0.053	0.066	0.079	0.145	0.211	0.277	0.342	0.408	0.474	0.540	0.606	0.672	0.803	0.935	1.067	1.198	1.330	1.988	2.647	3.305
54	0.026	0.039	0.052	0.065	0.078	0.142	0.207	0.272	0.336	0.401	0.466	0.530	0.595	0.659	0.789	0.918	1.047	1.176	1.306	1.952	2.598	3.244
55	0.026	0.039	0.051	0.064	0.077	0.140	0.204	0.267	0.330	0.394	0.457	0.521	0.584	0.648	0.778	0.901	1.028	1.155	1.282	1.917	2.551	3.185
56	0.026	0.038	0.051	0.063	0.075	0.138	0.200	0.262	0.325	0.387	0.449	0.512	0.574	0.636	0.761	0.886	1.010	1.135	1.259	1.862	2.506	3.129
57	0.025	0.038	0.050	0.062	0.074	0.136	0.197	0.258	0.319	0.381	0.442	0.503	0.564	0.625	0.748	0.870	0.993	1.115	1.238	1.850	2.462	3.074
58	0.025	0.037	0.049	0.061	0.073	0.134	0.194	0.254	0.314	0.374	0.434	0.495	0.555	0.615	0.735	0.855	0.976	1.096	1.216	1.818	2.420	3.021
59	0.025	0.037	0.048	0.060	0.072	0.131	0.191	0.250	0.309	0.368	0.427	0.486	0.545	0.605	0.723	0.841	0.960	1.078	1.196	1.788	2.379	2.970
60	0.025	0.036	0.048	0.060	0.071	0.130	0.188	0.246	0.304	0.362	0.420	0.478	0.537	0.595	0.711	0.827	0.944	1.060	1.176	1.758	2.340	2.921
61	0.025	0.036	0.048	0.059	0.070	0.128	0.185	0.242	0.299	0.356	0.414	0.471	0.528	0.585	0.700	0.814	0.928	1.043	1.157	1.729	2.301	2.873
62	0.024	0.036	0.047	0.058	0.069	0.126	0.182	0.238	0.295	0.351	0.407	0.463	0.520	0.576	0.689	0.801	0.914	1.026	1.139	1.702	2.264	2.827
63	0.024	0.035	0.046	0.057	0.069	0.124	0.179	0.235	0.290	0.346	0.401	0.458	0.512	0.567	0.678	0.789	0.899	1.010	1.121	1.675	2.229	2.783
64	0.024	0.035	0.046	0.057	0.068	0.122	0.177	0.231	0.286	0.340	0.395	0.449	0.504	0.558	0.667	0.777	0.886	0.995	1.104	1.649	2.194	2.739
65	0.024	0.035	0.045	0.056	0.067	0.121	0.174	0.228	0.282	0.335	0.389	0.443	0.496	0.550	0.657	0.765	0.872	0.980	1.087	1.624	2.161	2.697
66	0.024	0.034	0.045	0.056	0.066	0.119	0.172	0.225	0.278	0.330	0.383	0.436	0.489	0.542	0.648	0.753	0.859	0.965	1.071	1.599	2.128	2.657
67	0.024	0.034	0.044	0.055	0.065	0.117	0.169	0.222	0.274	0.326	0.378	0.430	0.482	0.534	0.638	0.742	0.846	0.951	1.055	1.576	2.096	2.617
68	0.023	0.034	0.044	0.054	0.064	0.116	0.167	0.218	0.270	0.321	0.372	0.424	0.475	0.526	0.629	0.732	0.834	0.937	1.039	1.553	2.066	2.579
69	0.023	0.033	0.044	0.054	0.064	0.114	0.165	0.215	0.266	0.317	0.367	0.418	0.468	0.519	0.620	0.721	0.822	0.923	1.025	1.530	2.036	2.542
70	0.023	0.033	0.043	0.053	0.063	0.113	0.163	0.213	0.262	0.312	0.362	0.412	0.462	0.512	0.611	0.711	0.811	0.910	1.010	1.509	2.007	2.506

ECUACIÓN (L-3): $V=0.69789N+0.01318$
 N=número de revoluciones por segundo.
 V=velocidad en m/seg.

La fórmula con que se calculó esta tabla fue deducida en el Laboratorio de Tara de Molinetes.
 Observadores: Ing. Adolfo Huet B., Eduardo Huet B., Ing. J. A. Monobe G.

- 5: Número de revoluciones "vueltas" (R) proporcionadas por el molinete.
- 6: Tiempo T (en segundos) que duró la observación.
- 7: Número de revoluciones por segundo (RPS o N), resulta de dividir la columna 5 entre la 6. Se obtiene cuando no se dispone de la tabla.
- 8: Velocidad en el punto (m/s), esta velocidad se puede obtener de dos formas; entrando con los valores de R y T, columnas 5 y 6, en la tabla que le corresponde únicamente al molinete empleado, o sustituyendo el número de revoluciones por segundo (columna 7) en la ecuación del molinete empleado.
- 9: En esta columna se anota el coeficiente, generalmente considerado de 0.9; se emplea únicamente en caso de que la medición de la velocidad haya sido superficial, por lo general en las orillas de los cauces anchos.
- 10: Velocidad media en la franja (m/s), se obtiene según el método empleado para determinarla; si el método es 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; si es de 6/10, la velocidad es la misma que en la columna 8; si por el contrario es el superficial, la velocidad se obtiene del producto de las columnas 8 y 9.
- 11: Ancho medido de la franja (m).
- 12: Profundidad media en la franja (tirante medio), se obtiene con la ecuación 3. En una franja intermedia el tirante inicial (A) es el mismo que el final (C) de la franja anterior, mientras que el tirante final (C), de la franja central, es el mismo que el inicial (A) de la siguiente franja (lámina 6).
- 13: Área de la franja (m^2), resulta del producto de las columnas 11 y 12 (Ec. 4).
- 14: Gasto parcial (m^3/s) o gasto que pasa a través de la franja considerada, se obtiene multiplicando las columnas 10 y 13 (Ec. 6).

Finalmente, el área total de la sección transversal se obtiene sumando los valores de la columna 13 (Ec. 5) y el gasto total a través de esta sección, sumando los valores de la columna 14 (Ec. 7). La lámina 17 detalla el llenado de algunas columnas de una hoja para aforo con molinete.

Lámina 17 Fracción de una hoja de registro de aforo con molinete

		SONDEO		MOLINETE			
		PROFUNDIDAD	PROFUNDIDAD DE LA OBSERVACIÓN		NÚMERO DE REVOLUCIONES	TIEMPO EN SEGUNDOS	
		m	método	m	m		
Franja 1	A	0.0				61	Una profundidad de medición
	B	0.51	6 / 10	0.31	40		
Franja 2	A	1.07				58	Una profundidad de medición
	B	1.42	6 / 10	0.85	100		
Franja 3	C	1.73				58	Dos profundidades de medición de velocidad en la misma vertical
	B	1.73	2 / 10	0.35	200		
			8 / 10	1.38	100		
	C	1.73					

3.3 Ejemplos de aforo con molinete

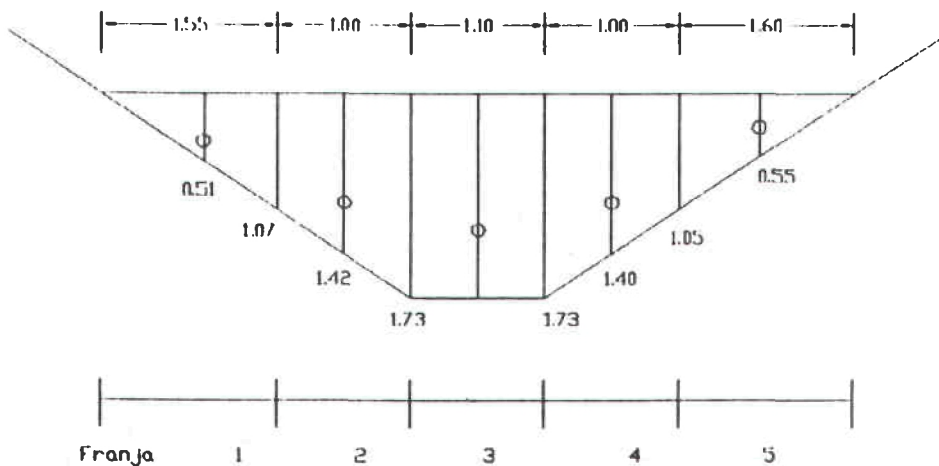
A continuación se describen algunos aforos en diferentes tipos de corriente, realizados con el molinete de copas tipo Price modelo 631R, cuya ecuación y tabla de calibración se encuentran en la lámina 16. Se obtuvieron en el laboratorio de la Comisión Nacional del Agua, *la tabla corresponde únicamente a dicho molinete y no se debe emplear para ningún otro.*

Se recomienda al lector comprobar los cálculos de los ejemplos desarrollados, sobre todo los relacionados con la obtención de la velocidad, mediante la tabla y la ecuación.

a) Se realizaron dos aforos en el mismo canal revestido, el primero, cuando funcionaba a máxima capacidad y el segundo, a menor capacidad.

La lámina 18 muestra el canal lleno; el ancho de la corriente se ha dividido en cinco franjas: una sobre la plantilla y dos en cada talud. Se han preferido dos franjas por talud y no una debido a la variación tan grande de la velocidad. En cada franja la velocidad se ha medido a seis décimos de profundidad, mientras que en la franja central, por la mayor variación a lo largo de la vertical, la velocidad se ha medido a dos y ocho décimos de profundidad. La lámina 19 muestra los cálculos realizados para obtener el gasto.

Lámina 18 Aforo en canal lateral revestido operando a máxima capacidad



En la lámina 20 se tiene el mismo canal, pero a menor capacidad, a causa de un tirante pequeño. La variación de la velocidad en la franja central no es muy grande, por esto se ha medido únicamente a seis décimos de profundidad. Además, como la variación de la velocidad sobre los taludes no es muy grande, se ha tomado una sola franja sobre cada talud. La velocidad se midió a seis décimos de profundidad. Los cálculos se muestran en la lámina 21.

Lámina 20 Aforo en canal lateral revestido operando a menor capacidad

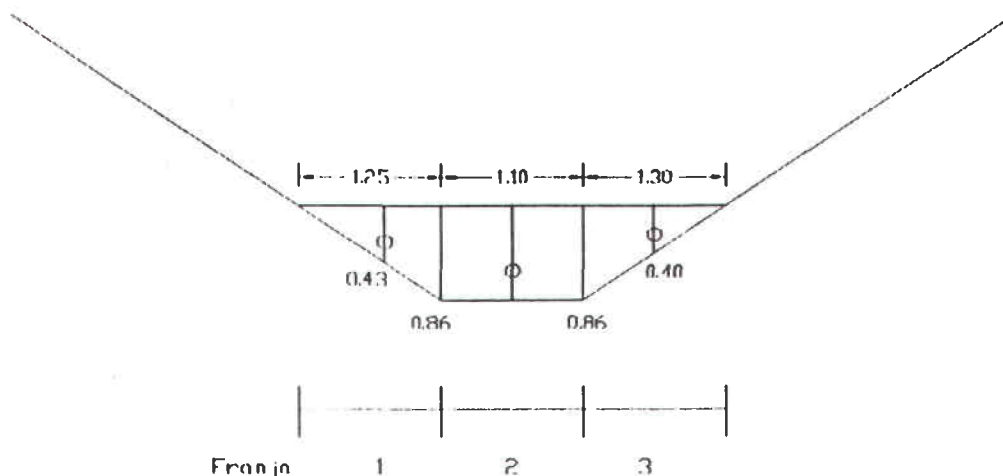


Lámina 19 Hoja de aforo para canal operando a mayor capacidad

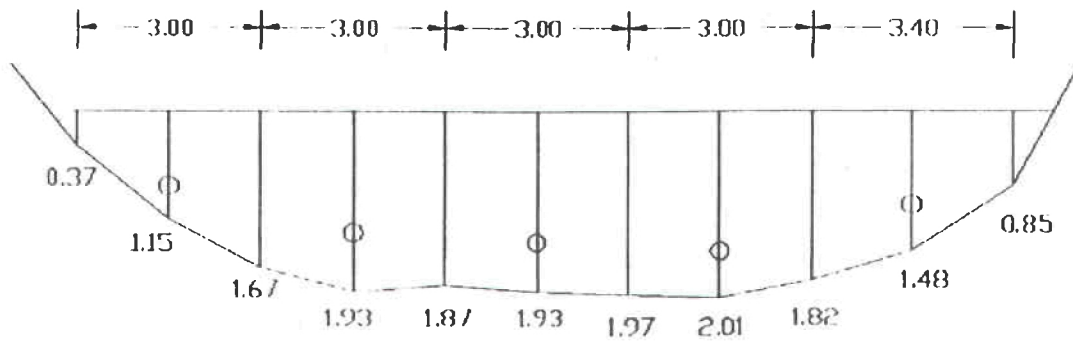
SONDEOS		MOLINETE				VELOCIDAD			SECCIÓN			GASTO PARCIAL	OBSERVACIONES
DIST. A PUNTO INICIAL	PROFUNDIDAD	PROFUNDIDAD DE OBSERVACIÓN		NÚMERO DE REV.	TIEMPO	REV./ SEGUNDO	EN EL PUNTO	COEF.	MEDIA DEL TRAMO	ANCHO	PROFUNDIDAD		
m	m	Método	m		seg	rps	m/s	adm	m/s	m	m	m ²	m ³ /s
	0.0												
	0.51	6/10	0.31	40	61	0.656	0.471	-	0.471	1.55	0.523	0.811	0.382
	1.07												
	1.42	6/10	0.85	100	58	1.724	1.216	-	1.216	1.00	1.410	1.410	1.715
	1.73												
	1.73	2/10	0.35	200	58	3.448	2.42	-					
		8/10	1.38	100	77	1.299	0.92	-	1.670	1.10	1.730	1.903	3.178
	1.73												
	1.40	6/10	0.84	100	63	1.587	1.121	-	1.121	1.00	1.395	1.395	1.564
	1.05												
	0.55	6/10	0.33	40	68	0.588	0.424	-	0.424	1.60	0.538	0.861	0.365
	0.0												
TOTAL												7.204	

Lámina 21 Hoja de aforo para canal operando a menor capacidad

SONDEOS		MOLINETE					VELOCIDAD			SECCIÓN			GASTO PARCIAL	OBSERVACIONES
DISF. A PUNTO INICIAL	PROFUNDIDAD	PROFUNDIDAD DE OBSERVACIÓN		NÚMERO DE REV.	TIEMPO	REV. / SEGUNDO	EN EL PUNTO	COEF	MEDIA DEL TRAMO	ANCHO	PROFUNDIDAD	AREA		
m	m	Método	m		seg	rps	m/s	adm	m/s	m	m	m ²	m ³ /s	
	0.0													
	0.72	6/10	0.43	30	76	0.395	0.289	-	0.289	2.00	0.668	1.335	0.385	
	1.23													
	1.45	6/10	0.87	30	50	0.600	0.432	-	0.432	1.10	1.415	1.556	0.672	
	1.53													
	1.28	6/10	0.77	30	46	0.652	0.468	-	0.468	1.10	1.323	1.455	0.681	
	1.20													
	0.55	6/10	0.33	30	65	0.462	0.335	-	0.335	1.90	0.575	1.093	0.366	
	0.0													
TOTAL													2.104	

b) En un canal de tierra (lámina 22), debido a la variación de la velocidad en la sección transversal: se han considerado cinco franjas, tres centrales y una en cada extremo. Como la variación de la velocidad en cada una de las verticales no es muy grande, la velocidad se midió a seis décimos de profundidad. Los cálculos se muestran en la lámina 23.

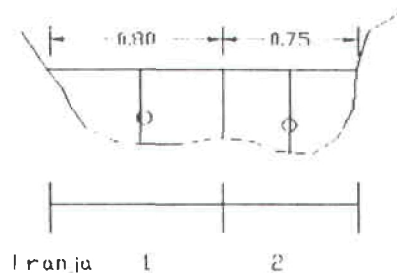
Lámina 22 Aforo en canal lateral de tierra



c) Una regadera (lámina 24a), debido a lo irregular de su fondo, no pudo considerarse parabólica. Por esto, la sección se ha dividido en dos franjas. A causa de un pequeño tirante se midió a seis décimos de profundidad. Al inicio de la misma regadera se tiene un tramo revestido (lámina 24b) de sección rectangular en el que, por el tamaño de la plantilla, no es necesario dividir en franjas. Sin embargo, para tener mayor precisión en la velocidad se ha medido a dos y ocho décimos de profundidad. En la lámina 25 se tienen los cálculos para ambas secciones, irregular y rectangular; nótese que seleccionando la última sección para realizar el aforo el trabajo se simplifica grandemente y el resultado es casi el mismo.

Lámina 24 Aforo en regadera

a) Sección irregular



b) Sección regular

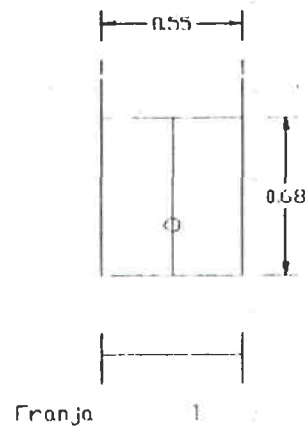


Lámina 23 Hoja de aforo para canal de tierra

SONDEOS		MOLINETE				VELOCIDAD			SECCIÓN			GASTO PARCIAL	OBSERVACIONES
DIST. A PUNTO INICIAL	PROFUNDIDAD	PROFUNDIDAD DE OBSERVACIÓN		NÚMERO DE REV.	TIEMPO	REV. / SEGUNDO	EN EL PUNTO	COEF.	MEDIA DEL TRAMO	ANCHO	PROFUNDIDAD		
m	m	Método	m		seg	rps	m/s	adm	m/s	m	m	m ²	m ³ /s
	0.37												
	1.15	6/10	0.69	20	54	0.370	0.272	-	0.272	3.00	1.085	3.255	0.885
	1.67												
	1.93	6/10	1.16	25	45	0.556	0.401	-	0.401	3.00	1.850	5.550	2.226
	1.87												
	1.93	6/10	1.16	30	47	0.638	0.459	-	0.459	3.00	1.925	5.775	2.651
	1.97												
	2.01	6/10	1.21	25	43	0.581	0.419	-	0.419	3.00	1.953	5.859	2.455
	1.87												
	1.48	6/10	0.89	20	43	0.465	0.338	-	0.338	3.40	1.408	4.787	1.618
	0.85												
TOTAL												9.825	

Lámina 25 Hoja de aforo en regadera

a) Sección irregular

SONDEOS		MOLINETE					VELOCIDAD			SECCIÓN			GASTO PARCIAL	OBSERVACIONES
DIST. A PUNTO INICIAL	PROFUNDIDAD	PROFUNDIDAD DE OBSERVACIÓN		NÚMERO DE REV.	TIEMPO	REV./SEGUNDO	EN EL PUNTO	COEF.	MEDIA DEL TRAMO	ANCHO	PROFUNDIDAD	ÁREA		
m	m	Método	m		seg	rps	m/s	adm	m/s	m	m	m ²	m ³ /s	
	0.0													
	0.48	6/10	0.29	25	59	0.424	0.309	-	0.309	0.80	0.353	0.282	0.087	
	0.45													
	0.52	6/10	0.31	25	72	0.347	0.256	-	0.256	0.70	0.373	0.261	0.067	
	0.0													
TOTAL												0.154		

b) Sección regular

SONDEOS		MOLINETE					VELOCIDAD			SECCIÓN			GASTO PARCIAL	OBSERVACIONES
DIST. A PUNTO INICIAL	PROFUNDIDAD	PROFUNDIDAD DE OBSERVACIÓN		NÚMERO DE REV.	TIEMPO	REV./SEGUNDO	EN EL PUNTO	COEF.	MEDIA DEL TRAMO	ANCHO	PROFUNDIDAD	ÁREA		
m	m	Método	m		seg	rps	m/s	adm	m/s	m	m	m ²	m ³ /s	
	0.68													
	0.68	2/10	0.14	40	56	0.714	0.512	-						
		8/10	0.54	30	68	0.441	0.321	-	0.416	0.55	0.68	0.374	0.156	
	0.68													
TOTAL												0.156		

ANEXO I OBTENCIÓN DE RELACIÓN ESCALA-GASTO

Cuando se dispone de un tramo de río o de canal en el que permanecen constantes las características hidráulicas y en el que no cambia el área transversal para un mismo gasto, se puede obtener el gasto en función únicamente del tirante.

A) Relación escala-gasto (tirante-gasto)

Para obtener la relación escala-gasto de un tramo del canal se mide el gasto, generalmente con molinete, y se registra el tirante correspondiente. Para mayor precisión se repite la medición del gasto, al menos tres veces. Los aforos se deben realizar en el rango de operación del canal en cantidad suficiente para minimizar el error del muestreo.

Una vez realizados los aforos se tiene el gasto en función del tirante. Graficando los puntos se puede observar que siguen una distribución casi curva. En ella, en su eje horizontal (abscisas), se tiene el gasto, y en el vertical (ordenadas), el tirante. Se puede obtener de dos formas:

A mano alzada: una forma rápida, pero poco precisa, es trazar la curva a mano alzada, de tal forma que sea lo más continua posible y pase lo más cerca de la mayor cantidad de puntos.

Método de regresión (mínimos cuadrados): para ser más estrictos en la obtención de la curva, se puede emplear la relación empírica del tipo:

$$Q = \beta_0 d^{\beta_1} \quad (8)$$

Donde: $Q = \text{Gasto (m}^3/\text{s)}$
 $d = \text{tirante (m)}$
 β_0 y $\beta_1 = \text{parámetros de la curva}$

Obtener los parámetros para una curva es más difícil que para una recta. Por esta razón, se obtendrán linealizando la ecuación anterior, mediante la siguiente transformación logarítmica:

$$\text{Ln } (Q) = \text{Ln } (\beta_0) + \beta_1 \text{ Ln } (d) \quad (9)$$

Si se considera la ecuación de una recta en su forma ordenada al origen, se tiene:

$$y = b + mx \quad (10)$$

Haciendo la analogía de las ecuaciones 9 y 10 resulta:

$y = \text{Ln } (Q)$	<i>variable dependiente</i>
$b = \text{Ln } \beta_0$	<i>ordenada al origen</i>
$m = \beta_1$	<i>pendiente de la recta</i>
$x = \text{Ln } (d)$	<i>variable independiente</i>

El proceso de cálculo consiste en obtener el logaritmo natural de las variables iniciales Q y d para trabajar sobre sus logaritmos, según se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro 3 Obtención de relación escala-gasto (método de regresión lineal simple)

VARIABLES INICIALES		LOGARITMOS		CUADRADOS		PRODUCTO
IRANITE (d. mil)	GASTO (Q. mil. s.)	X = Ln(d)	Y = Ln(Q)	X ²	Y	X Y
0,63	0,7512	-0,4620	-0,2861	0,2135	0,0818	-0,1322
0,75	1,0151	-0,2877	0,0150	0,0828	0,0002	-0,0043
0,80	1,5200	-0,2231	0,4187	0,0498	0,1753	-0,0934
0,88	1,9451	-0,1278	0,6653	0,0163	0,4426	-0,0850
1,05	2,3645	0,0488	0,8606	0,0024	0,7406	0,0420
1,12	2,7465	0,1133	1,0103	0,0128	1,0208	0,1145
1,21	3,7854	0,1906	1,3312	0,0363	1,7720	0,2537
1,30	4,3514	0,2624	1,4705	0,0688	2,1624	0,3858
1,45	5,6725	0,3716	1,7356	0,1381	3,0124	0,6449
1,66	6,4066	0,5068	1,8573	0,2569	3,4497	0,9413
1,73	7,2040	0,5481	1,9746	0,3004	3,8992	1,0823
SUMAS		0,9409	11,0531	1,1781	16,7570	3,4140

De esta tabla se obtienen las cinco sumas (sumatorias):

$$\Sigma x = 0.9409$$

$$\Sigma y = 11.0531$$

$$\Sigma x^2 = 1.1781$$

$$\Sigma y^2 = 16.7570$$

$$\Sigma xy = 3.4140$$

$$N = 11 \text{ (núm. aforos)}$$

Sustituyendo estas sumas en cada una de las siguientes ecuaciones se obtienen otras sumas, conocidas como *sumas de cuadrados*, sumas que se simbolizan como SC.

$$SC(x) = \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{N} = 1.1781 - \frac{(0.9409)^2}{11} = 1.0976$$

$$SC(y) = \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{N} = 16.7570 - \frac{(11.0531)^2}{11} = 5.6505$$

$$SC(xy) = \sum xy - \frac{(\sum x \sum y)}{N} = 3.4140 - \frac{(0.9409)(11.0531)}{11} = 2.4686$$

Con todas estas sumas se obtiene un indicador conocido como coeficiente de correlación lineal (r), que es la medida de la intensidad de la relación entre las variables x , y .

$$r = \frac{SC(xy)}{\sqrt{SC(x) SC(y)}} = \frac{2.4686}{\sqrt{1.0976 \times 5.6505}} = 0.9913$$

Este coeficiente siempre tiene un valor de -1 a $+1$; cuando es negativo, indica que una variable crece mientras la otra disminuye; cuando es positivo, ambas crecen simultáneamente. Mientras el coeficiente es más cercano a la unidad indica que la intensidad de relación entre ambas variables es alta.

También se obtienen los parámetros de la ecuación de la recta, tales como, la pendiente de la recta:

$$\beta_1 = \frac{SC(xy)}{SC(x)} = \frac{2.4686}{1.0976} = 2.2491$$

Y la ordenada al origen:

$$\begin{aligned} Ln(\beta_0) &= \frac{1}{n} [\sum y - \beta_1 \sum x] \\ &= \frac{1}{11} [11.0531 - 2.2491 (0.9409)] = 0.8124 \end{aligned}$$

El antilogaritmo de este último:

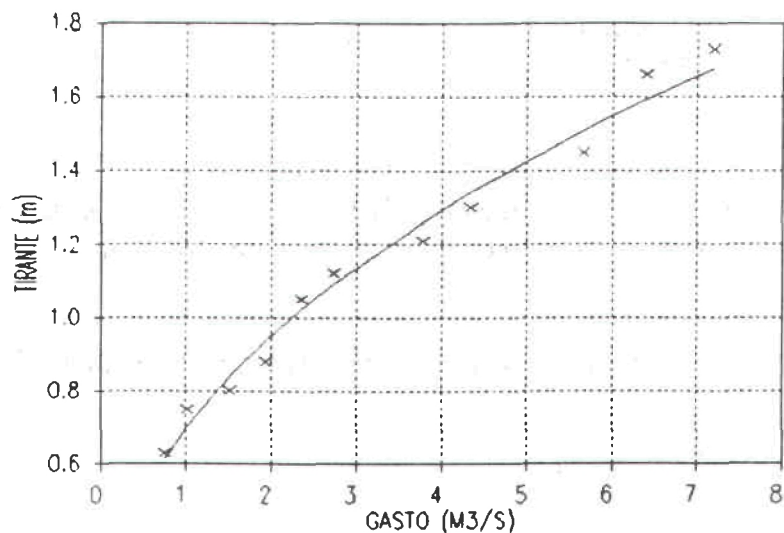
$$\begin{aligned} \beta_0 &= Inv (Ln \beta_0) \\ &= Inv Ln (0.8124) = 2.2533 \end{aligned}$$

Sustituyendo β_0 y β_1 en la ecuación 4.6 resulta la ecuación empírica:

$$Q = 2.2533 d^{2.249}$$

Graficando la ecuación y los puntos de aforo (Lámina 26), se observa el comportamiento de la curva ajustada. Es importante mencionar que esta ecuación es confiable solamente en el rango de aforos y para la sección considerados; por ello, la curva no se debe prolongar.

Lámina 26 Relación escala-gasto ajustada



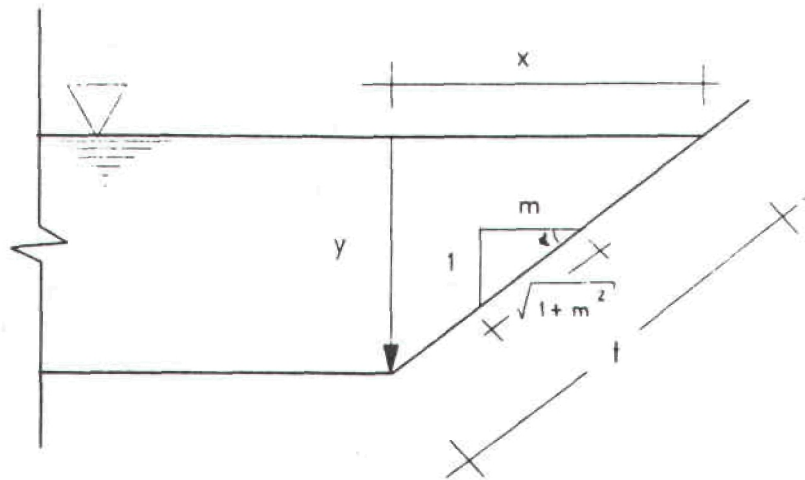
B) Instalación del limnómetro en el talud del canal

Conocida la ecuación empírica que relaciona el gasto con el tirante se procede a instalar un limnómetro, que es una escala pintada en madera o marcada en una lámina de fierro. El limnómetro puede quedar sobre la plantilla (vertical) o sobre el talud (inclinada); si es vertical es una escala común, pero si es inclinada, debe medir las longitudes verticales (tirantes). De tal forma que para conocer el gasto es suficiente leer el tirante en el limnómetro y recurrir a la curva ajustada de la sección.

La magnitud de las unidades de la escala inclinada, dependen del ángulo de inclinación del talud y pueden obtenerse geométricamente o con nivel (manguera o montado). Cuando se emplea el nivel, la escala vertical se traslada al talud. El nivel de manguera permite trasladar dicha escala fácilmente y es recomendable cuando el talud es muy irregular. En canales revestidos con talud regular se puede generar la escala geométricamente, pintándola en la madera o lámina, antes de ponerla sobre el talud, para conseguir esto es indispensable el ángulo de inclinación del talud.

Aplicando algunas relaciones trigonométricas se puede obtener fácilmente la magnitud de la escala del talud. Si se considera el talud de un canal sobre el que se tiene un triángulo de agua (lámina 27), el ángulo de inclinación es el formado por el talud y el lado horizontal.

Lámina 27 Ángulo de inclinación del talud de un canal



En el triángulo unitario, la *pendiente del talud* es la cotangente del ángulo de inclinación:

$$\text{ctg } \alpha = \frac{m}{1} = m$$

El seno del ángulo de inclinación del triángulo unitario es:

$$\text{sen } \alpha = \frac{1}{\sqrt{1+m^2}}$$

El seno del ángulo de inclinación del triángulo de agua sobre el talud es:

$$\text{sen } \alpha = \frac{d}{t}$$

Igualando estas últimas ecuaciones y despejando la magnitud del talud resulta:

$$t = d \sqrt{1+m^2} \quad (11)$$

- Donde: t = Magnitud del talud
 d = Tirante
 m = Desplazamiento horizontal

Conociendo (m) del triángulo unitario y la magnitud vertical (tirante) se puede conocer la magnitud de escala inclinada. El cuadro 4 muestra el factor (k) por el que se debe multiplicar la magnitud vertical para obtener los valores de (m) más comúnmente empleados en los canales de los distritos de riego.

Cuadro 4 Factor K para obtener la magnitud inclinada

COMPONENTE		FACTOR
(m)	VERTICAL	
0.00	1	1.0
0.25	1	1.031
0.40	1	1.077
0.50	1	1.118
0.75	1	1.250
1.00	1	1.414
1.25	1	1.601
1.50	1	1.803
1.75	1	2.016
2.00	1	2.236
2.50	1	2.693
3.00	1	3.163

En algunas ocasiones se desconoce (m) de la sección seleccionada. Para determinarlo fácilmente, se forma sobre el talud, con una escuadra de madera, el triángulo unitario en el que el lado vertical debe ser de un metro y la medida del lado horizontal debe corresponder al desplazamiento horizontal (m).

Ejemplo: Se desea construir una escala en una lámina de fierro, pero se desconoce la inclinación del talud dada por (m). Para esto se construye una escuadra de madera cuyo lado vertical mide un metro. Con ella se encuentra un desplazamiento horizontal (m) de 1.40. La magnitud del talud se obtiene cada diez centímetros de tirante (d=10 cm). Si se sustituye m=1.40 en la Ec. 11, resulta:

$$\begin{aligned}
 t &= d \times \sqrt{1+m^2} = 10 \times \sqrt{1+1.4^2} \\
 &= 10 \times \sqrt{2.96} \\
 &= 10 \times 1.72 \\
 t &= 17.3
 \end{aligned}$$

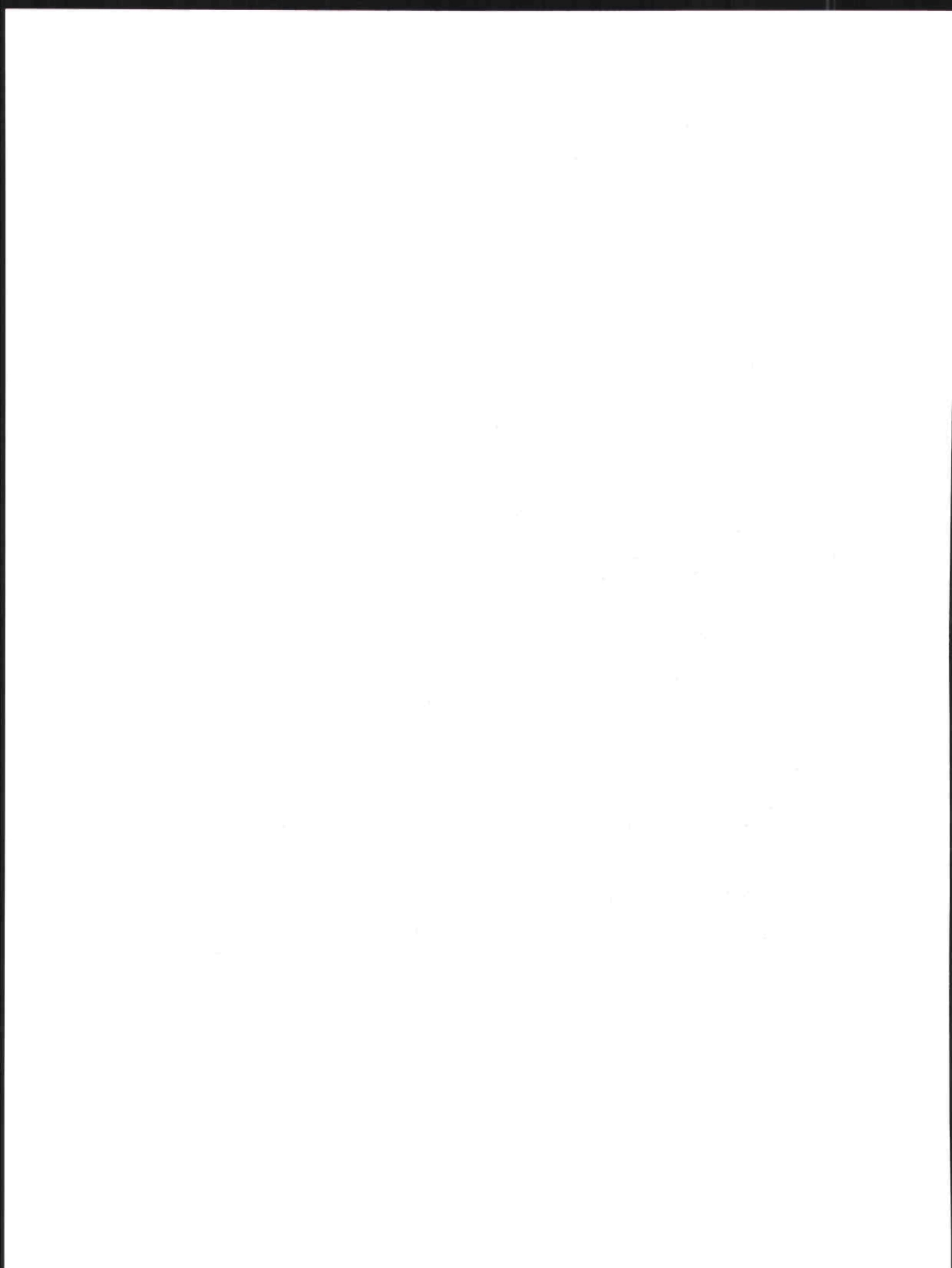
Esto significa que para un desplazamiento m=1.40, cada 10 cm de escala vertical equivalen 17.3 cm en la escala del talud.

ANEXO 2 PRUEBAS PARA MOLINETES ELÉCTRICOS DE COPAS

- a) Revise que estén bien apretados los tornillos de ajuste de la horquilla cruceta, sobre todo el que fija el pivote.
- b) Antes de aforar, coloque el molinete con el eje de copas vertical, sosténgalo con una mano y con la otra dele un impulso regular a la rueda de copas. Si el molinete se encuentra en buenas condiciones la rueda debe girar un tiempo mínimo de 60 segundos.
- c) Revise que el resorte de contactos apenas roce la aletilla para que no frene el giro de la rueda de copas.
- d) Revise el cono que asienta sobre el pivote. Con la tapa de la cámara de contactos puesta ajuste el pivote de manera que tenga poca holgura vertical. Con una mano tome el molinete por la horquilla manteniendo el eje de la rueda en posición vertical; con la otra, tome las copas haciendo un ligero esfuerzo hacia abajo, empujando y jalando, para detectar que no haya juego horizontal, ya que el asiento no tiene la forma cónica correcta.
- e) Prueba de holgura de la chumacera de la cámara de contactos. Destape la cámara de contactos; tome el molinete con una mano; mantenga el eje de la rueda de copas vertical. Con la otra mano tome la rueda de copas haciendo una ligera presión hacia abajo para que asiente sobre la punta del pivote. Realice un pequeño esfuerzo lateral y observe que el eje de la chumacera no tenga una holgura demasiado grande (debe tener poco juego con el fin de evitar un falso contacto, sobre todo, cuando se use el contacto simple).
- f) Revisión de la normalidad de la rueda de copas. Tome el molinete con una mano; mantenga el eje de la rueda de copas vertical; asegúrese que la tapa de la cámara de contactos esté puesta. Impulse fuertemente con la otra mano la rueda de copas y cambie de posición el molinete hasta que el eje permanezca horizontal. Si en este cambio de posición experimenta vibración en la mano, el molinete está correcto.
- g) Prueba de holgura vertical de la rueda de copas. Para el molinete Pígemeo, sujete la horquilla con los dedos índice y pulgar (el índice debe estar en la cámara de contactos y el pulgar en el pivote). Con la mano derecha dele un impulso suave y cuando la rueda de copas esté girando apriete con ambos dedos la horquilla. Si el movimiento se frena es que el aparato está correcto. Para el tipo Price, haga girar la rueda de copas impulsándola suavemente; apoye la parte inferior del pivote sobre una mesa y oprima la tapa de la cámara hacia abajo; la rueda de copas debe frenarse. Esta fuerza debe ser aproximadamente de 2 a 3 kilogramos.

Esta última prueba es muy importante, ya que si el molinete tiene demasiada holgura en sentido vertical, al estar aforando el agua presionará en la rueda de copas ocasionando que el asiento cónico se deslice sobre el ángulo del pivote y roce la parte cilíndrica del mismo, en vez de apoyarse sobre la punta.

- h) Finalmente, para conservar el aparato en buen estado y mantener por largo tiempo su calibración, es importante secarle el agua entre el pivote y la joya y aceitar la chumacera de la cámara de contactos.



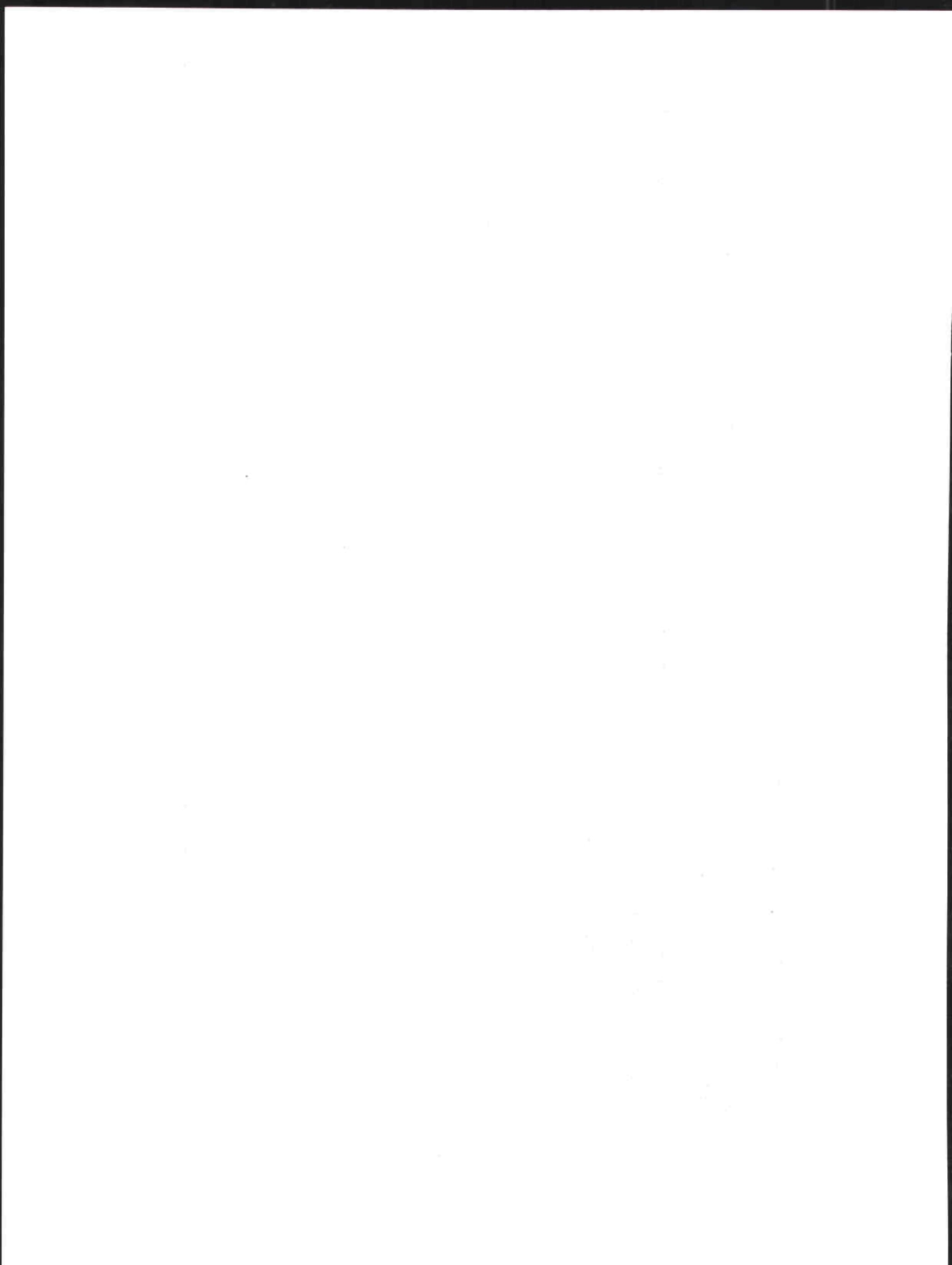
ANEXO 3 INFORMACIÓN DE FABRICANTES

Para mayor información respecto a los modelos de molinete que se fabrican actualmente en el país, o los que se puedan conseguir de importación, se recomienda comunicarse con los fabricantes.

El siguiente cuadro muestra a los fabricantes nacionales de molinete (ordenados alfabéticamente), que se localizaron a la fecha de publicación del presente instructivo.

Cuadro 5 Información sobre fabricantes

EMPRESA	DIRECCIÓN Y TELÉFONO	TIPO DE MOLINETE	CANTIDAD DE MODELOS
APARATOS DE MEDICIÓN HIDROCLIMÁTICOS	Calle Miguel Hidalgo Núm. 16. Col. Las Palomas. Tlanepantla, Edo. de México. CP 54100 Tel. (915) 3928216	Mecánico	1
		Eléctrico de copas	2
ROSSBACH DE MÉXICO S.A.	Av. Ermita Ixtapalapa Núm. 1629. Col. El Manto. Ixtapalapa, Mex., D.F. CP 09830 Tel. (915) 6851111		
		Eléctrico de copas	2



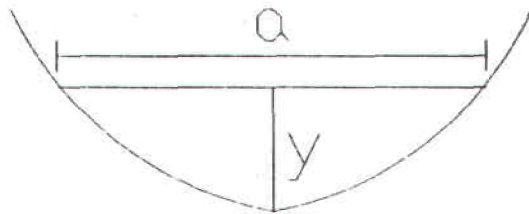
ANEXO 4 AFORO CON FLOTADOR

El flotador es un objeto más ligero que el agua; puede ser un trozo de madera, una pelota de esponja o un pequeño bote (de rollo fotográfico con un peso extra en su interior); de color naranja o amarillo, para que sea más visible. La medición con flotador requiere poco tiempo, con respecto al molinete; sin embargo, para que sea lo más confiable posible, el flotador debe adquirir una velocidad muy cercana a la velocidad superficial del agua. Esto no se consigue cuando las condiciones del viento son adversas; es decir, si la dirección del viento es en contra del flujo, la velocidad del flotador disminuye y, en caso contrario, aumenta.

A) Área de la sección transversal

Si la sección transversal es muy irregular se debe dividir en, al menos, dos franjas para obtener su área. Pero si el fondo del cause se aproxima a una parábola, como en el caso de regaderas recién abiertas (lámina 28), el área se puede estimar con:

Lámina 28 Área transversal para regaderas



$$A_T = \frac{2}{3} a \cdot y \quad (12)$$

Donde: A_T = área sección transversal (m^2);
 a = ancho del espejo del agua (m);
 y = profundidad máxima (m).

B) Velocidad media de la sección

La medición con flotador se basa en obtener la velocidad media de la corriente a partir de la velocidad superficial; por esta razón el flotador se debe emplear para medir en forma gruesa la velocidad de corrientes que conducen gastos pequeños (± 100 lps), para gastos mayores, es preferible el molinete o alguna estructura de mayor precisión.

$$V_m = K V_s \quad (13)$$

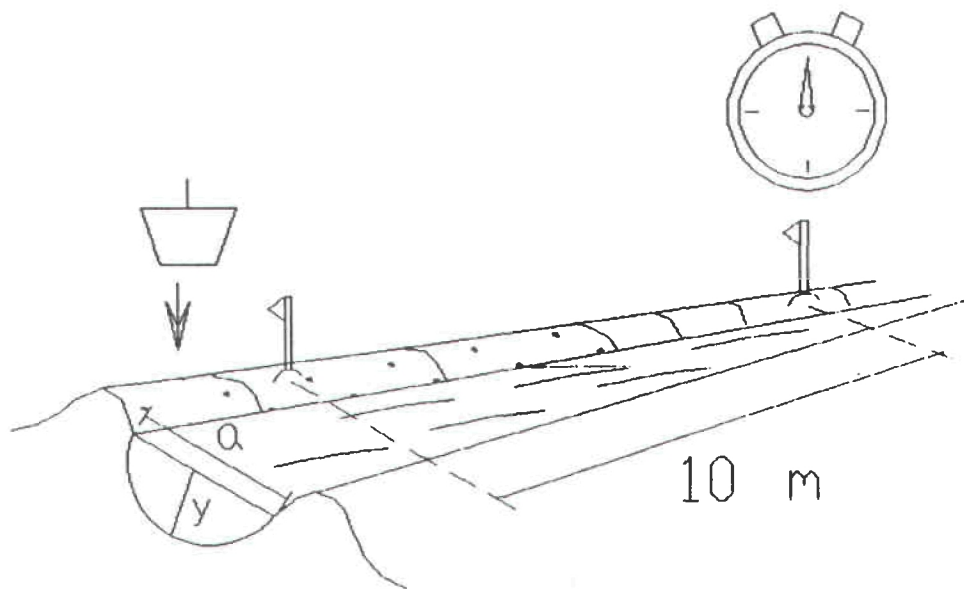
Donde: V_m = velocidad media de la corriente (m/s);
 V_s = velocidad superficial de la corriente (m/s);
 K = varía de 0.85 a 0.95 (adim).

K depende de las condiciones del viento; $K=0.9$, cuando no se presenta viento; $K=0.95$, si el viento frena el movimiento del flotador; y $K=0.85$, en caso contrario.

Para medir el gasto con flotador se realiza lo siguiente (lámina 29):

- 1) En gabinete: verificar que se disponga de flotador, cronómetro, cinta métrica y varilla (1.0m).
- 2) En campo: seleccionar un tramo lo más recto posible, con una longitud (L) de al menos 10 m; con la sección transversal lo más regular; alejado de rápidas o curvas; y en el que el agua corra libremente, es decir, que no esté remansada.
- 3) Marcar con estacas los puntos inicial, medio y final del tramo.
- 4) Medir el área de la sección transversal en los puntos marcados; si el fondo es regular se puede aproximar a una parábola; pero si es muy irregular se debe dividir en, al menos, dos franjas.
- 5) Arrojar el flotador a la corriente unos metros antes del punto inicial del tramo para que cuando pase por éste, ya haya alcanzado la velocidad superficial del flujo; el flotador se debe desplazar por el centro del espejo de agua del tramo seleccionado.
- 6) Calcular la velocidad de flotador, a partir del tiempo (t) de recorrido, en el tramo de longitud (L). Repetir al menos tres veces la medición del tiempo.

Lámina 29 Aforo con flotador



C) Ejemplos de aforo con flotador

i) Regadera de tierra con fondo regular y sin hierba

En este caso se tiene una regadera recién abierta y en consecuencia limpia; como el fondo se puede aproximar a una parábola. El área se puede estimar a partir del ancho promedio del espejo de agua ($a = 0.9$ m) y del tirante promedio ($y = 0.42$ m):

$$\begin{aligned} A_T &= \frac{2}{3} a \cdot y \\ &= \frac{2}{3} (0.9) (0.42) = 0.252 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Para medir la velocidad se consideró un tramo con longitud de 10 m y se registró un tiempo promedio de 33 s. Por lo tanto, la velocidad superficial (V_s) es:

$$V_s = \frac{10}{33} = 0.30 \text{ m/s}$$

Para la velocidad media V_m se considera un factor $K=0.95$, ya que el viento frena el movimiento del flotador:

$$V_m = 0.95 (0.30) = 0.285 \text{ m/s}$$

Finalmente, el gasto se calcula con:

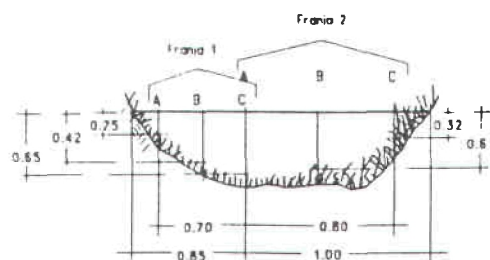
$$\begin{aligned} Q &= A_T \cdot V_m \\ &= 0.252 (0.285) = 0.072 \text{ m}^3/\text{s} \quad (72 \text{ lps}) \end{aligned}$$

ii) Regadera de tierra con fondo irregular y hierba.

Ejemplo: obtener el gasto de una regadera de tierra con fondo irregular y hierba, si la medición se realizó con un flotador; no se presentó efecto del viento; se consideró un tramo de 10 m y se registró un tiempo promedio de recorrido del flotador de 50 segundos, para las tres lecturas de tiempo.

Solución: para medir el área de la sección transversal de esta regadera no se consideraron 15 cm de la orilla izquierda, ni 20 cm de la derecha, ni algunos centímetros del fondo, pues el pasto frena el movimiento del agua. Al hacer esto, el área que se considera es aquella en donde el agua se mueve libremente. Los tirantes y anchos de franja de la sección transversal media se observan en la lámina 30.

Lámina 30 Medición con flotador en regadera de tierra con hierba



Los tirantes promedio de cada franja:

$$\bar{d}_1 = \frac{0.25 + 2 \times 0.42 + 0.65}{4} = \frac{1.74}{4} = 0.435 \text{ m}$$

$$\bar{d}_2 = \frac{0.65 + 2 \times 0.61 + 0.32}{4} = \frac{2.19}{4} = 0.547 \text{ m}$$

El área de cada franja:

$$A_1 = 0.70 \times 0.435 = 0.304 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 0.80 \times 0.547 = 0.438 \text{ m}^2$$

El área de la sección transversal:

$$A_T = 0.304 + 0.438 = 0.743 \text{ m}^2$$

La velocidad superficial:

$$V_s = \frac{10}{50} = 0.20 \text{ m/s}$$

Para la velocidad media se considera un factor K de 0.9 (no se presenta efecto del viento).

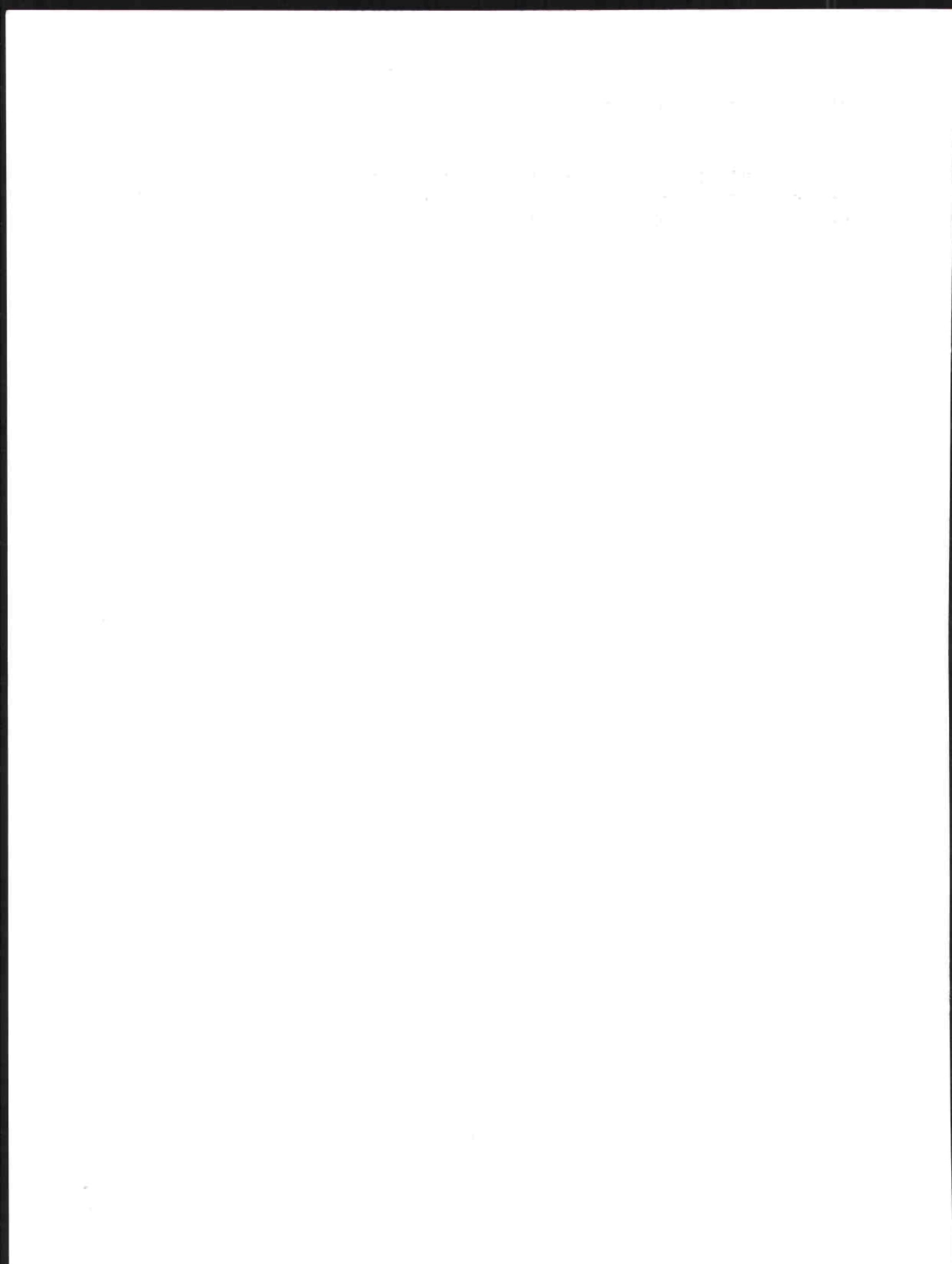
$$V_m = 0.9 (0.2) = 0.18 \text{ m/s}$$

Finalmente, el gasto se calcula con:

$$\begin{aligned} Q &= A_T \cdot V_m \\ &= 0.743 (0.18) = 0.134 \text{ m}^3/\text{s} \quad (134 \text{ lps}) \end{aligned}$$

ANEXO 5 PASOS PARA AFORO CON MOLINETE

A continuación se presentan los principales pasos para realizar el aforo con molinete, montado en la sonda flexible. Esta medición se realizó en el canal lateral 68+582 del Módulo IV del Distrito de Riego 005 Delicias, Chihuahua.





Puente de estructura metálica para aforo con molinete.



Puente de concreto para aforo con molinete.



Medición del ancho de la franja.



Medición del tirante.



Ubicación del molinete para medir velocidad a seis décimos de profundidad.



Registro del número de revoluciones y tiempo para medir velocidad.



Vaciado de las mediciones en la libreta para aforo con molinete.



Obtención de la velocidad a partir de la tabla de calibración del molinete.

BIBLIOGRAFÍA

Aparicio Mijares, Francisco, *Fundamentos de hidrología de superficie*, Ed. Limusa, México, 1989.

Brater, E.F.; Wisler, C.O., *Hidrology*, 2a. Edición, México, 1959.

Chow, Ven Te, *Hidráulica de los canales abiertos*, Ed. Diana, México, 1983.

Huet Bobadilla, Adolfo, *Pruebas mecánicas de campo para molinetes tipo Price*, S R H., México, 1974.

Huet Bobadilla, Adolfo, *Pruebas mecánicas de campo para molinete mecánico*, S R H., México, 1980.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, *Manual de aforos*, 2a. Edición, México, 1993.

Secretaría de Recursos Hidráulicos, *Instructivo para aforo de corrientes*, 6a. Edición, México, 1964.

Instructivo para aforo con molinete 2da. Edición

Se terminó de reimprimir en el mes de octubre de 1999.

En los talleres de J.R. Impresores, S.A. de C.V.

Tonalá No. 343 Col. Roma Sur C.P. 06760 México, D.F. Teléfono 5574 8310.

La Edición consta de 500 ejemplares, y su cuidado estuvo a cargo de la
Subcoordinación de Editorial y Gráfica.



CENTRO DE CONOCIMIENTO DEL AGUA

PAPELETA DE DEVOLUCIÓN

El lector se obliga a devolver este libro a la fecha del vencimiento del préstamo señalado en el último sello.

--	--	--

F0.C6.3.08



09934