

LA MEDIDA DEL CAUDAL EN LAS ACEQUIAS DE RIEGO

José María Faci González
Enrique Playán Jubillar

Unidad de Suelos y Riegos.

Servicio de Investigación Agraria

Laboratorio de Agronomía y Medio Ambiente (DGA-CSIC)

El calado aguas arriba de la caída sirve para conocer el caudal.



Medidor Parshall instalado en la entrada de agua a una parcela.

La medida del caudal en los puntos estratégicos de una red de riego es un requisito esencial y necesario para el uso eficiente del agua, tanto para los organismos encargados de la distribución del agua como para los mismos regantes en la propia explotación agraria. La importancia de la medida del agua de riego está avalada por las siguientes razones:

- Permite el control de las cantidades de agua derivadas de un canal.

- Permite una organización racional de la distribución del agua a los regantes a lo largo del canal.

- Permite al regante cuantificar y ajustar los volúmenes aplicados a las necesidades hídricas de los distintos cultivos.

- Permite al regante realizar evaluaciones del riego, conocer la problemática específica de sus parcelas y establecer las modificaciones necesarias para su mejora.

En los riegos de superficie la medida del caudal es más problemática y menos precisa que en los sistemas de riego a presión (aspersión y goteo) ya que requiere la construcción de aforadores, la lectura del nivel de agua y el empleo de fórmulas para determinar el caudal. Sin embargo, en las conducciones a presión los caudales que circulan por la red de tuberías se pueden estimar de forma más fácil y precisa a partir de las propias características hidráulicas de las instalaciones e incluso se pueden medir directamente con contadores volumétricos instalados en puntos estratégicos de la red de riego.

En general, la medida del caudal en las acequias de riego es muy poco frecuente en la mayoría de nuestras zonas regables. En muchas ocasiones, esta ausencia de medida de caudal se suple con diversas observaciones como el nivel de agua en la acequia, marcas en las paredes de la acequia, apertura de tajaderas hasta ciertos puntos, etc.

Actualmente, el desarrollo de nuevos medidores de caudal y de programas de ordenador para su calibración facilita la posible instalación de estos medidores en muchas de nuestras zonas regables.

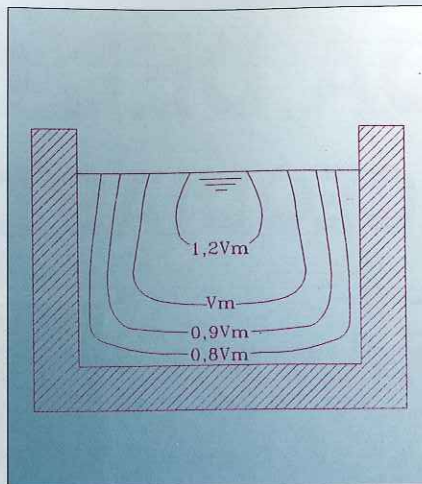
Los medidores de caudal a utilizar en las acequias de riego deben ser baratos, de fácil lectura, de fácil instalación, fiables, duraderos, autolimpiantes y robustos. Es muy conveniente que la propia escala del medidor venga expresada en medida de caudal para evitar que el regante tenga que consultar tablas de conversión o hacer cálculos. En muchas ocasiones las acequias de riego funcionan muy llenas y hay poco resguardo, por lo cual los medidores de caudal deben ser eficientes hidráulicamente, salvo en los casos en que existen desniveles en que resulta más fácil la instalación de medidores con caída libre.

MÉTODOS DE MEDIDA DE CAUDAL

Existe una gran variedad de medidores de caudal en cauces abiertos. Algunos de estos medidores son costosos y complicados y otros son muy simples y baratos. Los distintos métodos de medida de caudal se pueden agrupar en tres categorías:

1. Métodos directos, que están basados en la medida directa de volúmenes y tiempos.
2. Métodos de velocidad, que están basados en la determinación de la velocidad media del agua y de la sección mojada.
3. Métodos que emplean constricciones y están basados en el cambio de régimen de flujo.

En este trabajo se discuten en primer lugar algunos aspectos relacionados con las unidades utilizadas para medir volumen y caudal en el riego. En segundo lugar, se presenta una breve descripción de diversos métodos de medida de caudal en acequias de riego que son relativamente baratos y sencillos de aplicar y que solamente producen una moderada exactitud en la medida; se indican sus características, ventajas, limitaciones y adaptabili-



Distribución de isóneas de velocidad en la sección de una acequia rectangular.

dad a distintas situaciones, sin entrar en la formulación matemática de sus ecuaciones de descarga, que se puede encontrar en los textos de hidráulica. Por último, se presenta una lista de las equivalencias entre las unidades de volumen y caudal de mayor interés.

UNIDADES DE VOLUMEN

Las unidades de volumen más utilizadas en riego son: el litro (l), el metro cúbico (m³) y el hectómetro cúbico (hm³).

Un litro es el volumen comprendido en un cubo de un decímetro de lado.

Un metro cúbico es el volumen comprendido en un cubo de un metro de lado.

Un hectómetro cúbico es el volumen comprendido en un cubo de 100 metros de lado.

En algunos casos, se utiliza la hectárea metro (ha.m), que representa el volumen formado por un paralelepípedo de base una hectárea (10.000 m²) y de 1 m de altura.

En muchas ocasiones, la dosis o volumen de riego aplicado se expresa como una altura de agua en mm y representa el volumen de esa altura de agua sobre el área considerada. Por ejemplo, una dosis de riego de 60 mm aplicada a una parcela de 1 ha equivale a una dosis de 600 m³/ha, correspondiente al volumen del paralelepípedo formado por los 10.000 m² de la hectárea y los 60 mm (0,06 m) de altura. La ventaja de expresar los volúmenes de riego en altura de agua es que estas últimas son independientes del área a considerar.

UNIDADES DE CAUDAL

Las unidades de caudal son combinaciones de las unidades de volumen con las de tiempo. Las más utilizadas son:

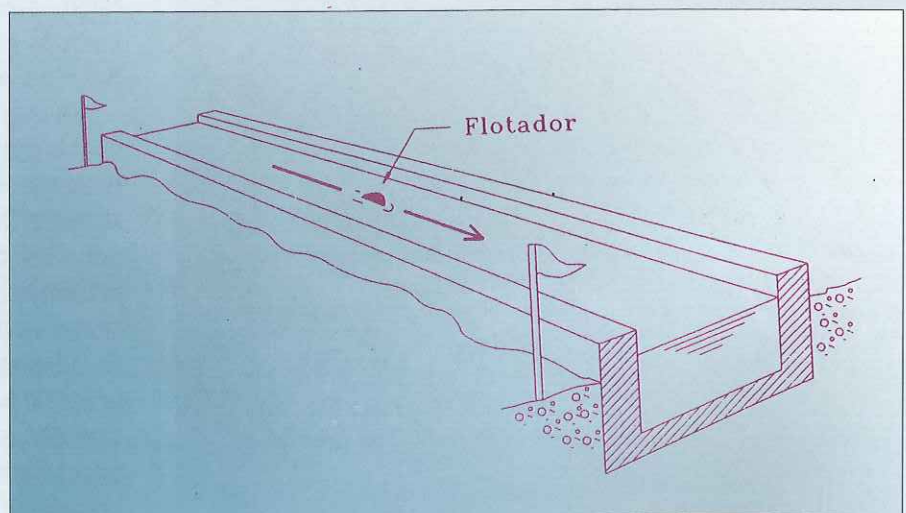
- Litros por segundo (l/s).
- Litros por minuto (l/min).
- Litros por hora (l/h).
- Metros cúbicos por segundo (m³/s).
- Metros cúbicos por hora (m³/h).

En algunas comunidades de regantes, una medida muy utilizada es metros cúbicos en 24 horas (m³/24 h); esta unidad se origina por la forma en que se distribuye el agua a los regantes, en turnos de 24 horas.

DETERMINACIÓN DE LA DOSIS DE RIEGO APLICADA

El volumen de riego aplicado a una parcela se calcula a partir del cau-

Esquema de la medida de la velocidad por el método del flotador.



dal que entra a la parcela y del tiempo de aplicación. La dosis aplicada se calcula dividiendo el volumen aplicado por la superficie de la parcela.

Por ejemplo, para calcular la dosis de riego aplicada a una parcela de 0,7 ha con un caudal de 90 l/s que se riega durante 2 horas haremos lo siguiente:

$$\text{Volumen aplicado} = 90 \text{ l/s} \times 2 \text{ h} \times 3.600 \text{ s/h} = 648.000 \text{ l} = 648 \text{ m}^3.$$

$$\text{Dosis aplicada por ha} = \frac{648 \text{ m}^3}{0,7 \text{ ha}} = 925 \text{ m}^3/\text{ha} \text{ que equivale a } 92,5 \text{ mm}.$$

MÉTODOS DIRECTOS DE MEDIDA DE CAUDAL

El método más sencillo de medida de caudal es la medida del tiempo de llenado de un recipiente de volumen conocido. Este método es muy simple y fiable y sólo requiere un depósito y un reloj o cronómetro, pero sólo se puede utilizar para la medida de pequeños caudales (hasta 1,5 l/s, aproximadamente).

La precisión en la medida del caudal depende de la precisión en las medidas del tiempo de llenado y del volumen. La precisión de la medida aumenta al aumentar el tiempo de medida.

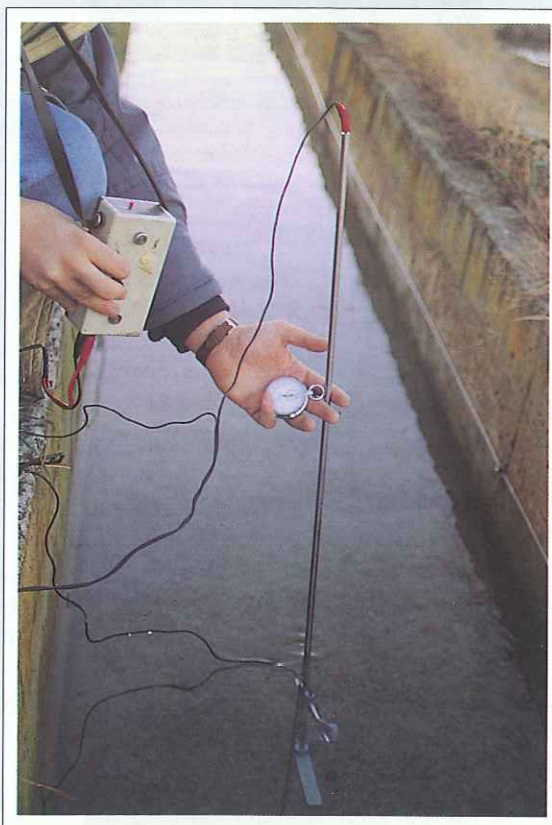
En la práctica del riego, este sistema directo es utilizado en la medida del caudal en surcos y en la medida de la descarga de aspersores, microaspersores y goteros. También se utiliza para medir el caudal que entra o sale de un depósito mediante la medida del cambio de nivel en el mismo durante un tiempo determinado. Para usar este último procedimiento es necesario conocer previamente las dimensiones del depósito.

A veces se utilizan contadores volumétricos que dan directamente el caudal instantáneo y el volumen acumulado que va pasando a través del mismo. Estos contadores se instalan en tramos de tubería de sección conocida por la que pasa todo el caudal del canal de riego.

Los medidores consisten en una hélice conectada a un registrador que indica el caudal instantáneo y el volumen acumulado que pasa a través del mismo. La velocidad de giro de la hélice (número de revoluciones por minuto) es proporcional a la velocidad media del agua y al caudal, ya

que la sección es constante. Hay dos requisitos que se deben cumplir para su correcto funcionamiento:

1. La tubería debe estar totalmente llena.
2. El caudal debe superar el límite inferior de funcionamiento del aparato.



Medida del caudal en acequia con molinete.

MÉTODOS BASADOS EN LA MEDIDA DE LA VELOCIDAD

En estos métodos, el caudal que pasa por una acequia de riego se calcula como el producto de la velocidad media por la sección transversal al flujo de agua. En su utilización hay que tener especial precaución en la determinación de la velocidad media, ya que debido a la presencia de una superficie libre de agua y a la fricción de las paredes, la velocidad del agua no es constante en toda la sección (Bos, 1978).

Método del flotador

Es un método simple que consiste en medir el tiempo que un flotador, colocado en el centro de la corriente, tarda en recorrer una distancia recta de la acequia (de 15 a 30 m). Normalmente se realizan varias pruebas para obtener el tiempo medio. La velocidad del flotador (V_f) se calcula dividiendo la distancia recorrida por el tiempo medio que el flotador tarda en recorrerla. Debido a que la velocidad del flotador en la superficie es mayor que la velocidad media (V_m), es necesario corregirla, multiplicándola por el coeficiente 0,8 (Scott y Houston, 1977):

$$V_m = 0,8 \times V_f$$

El caudal se obtiene multiplicando la velocidad media (V_m) por la sección mojada (S_m):

$$Q = V_m \times S_m$$

Como flotadores pueden utilizarse los siguientes objetos: limón, naranja, manzana, botella parcialmente llena de agua, etc.

Método del minimolinet

El minimolinet es un instrumento que tiene una hélice o rueda de cazoletas montada sobre un soporte y conectada a un registrador que mide el número de revoluciones por minuto de la hélice al introducirla en una corriente de agua.

Los minimolinetes deben ser calibrados por el fabricante para tener una buena relación entre la velocidad de giro de la hélice y la velocidad del agua en el punto de medida.

La sección de la acequia elegida para la medida debe estar situada en un tramo recto y tener una sección lo más homogénea posible a lo largo de dicho tramo.

Cuanto mayor sea el número de medidas puntuales de velocidad, mayor será la precisión en el aforo del caudal en la acequia. Cuando se quiere obtener una precisión alta en el aforo, normalmente se eligen distintas verticales en la sección y se calcula la velocidad media en cada vertical como la media de velocidades a distintas profundidades. El caudal de cada sección entre dos verticales se calcula como el producto de la sección por la media de velocidades medias en las verticales. El

caudal total se calcula como la suma de caudales entre verticales.

Una manera más rápida pero menos precisa para estimar la velocidad media es medir en el centro de la acequia al 20% y 80% de la profundidad. La media de estas velocidades es aproximadamente la velocidad media en la sección. La velocidad media de la sección se puede obtener también a partir de la medida de la velocidad en un solo punto situado en el centro de la acequia y al 60% de la profundidad bajo la superficie del agua (Scott y Houston, 1977).

MÉTODOS QUE EMPLEAN CONSTRICCIONES

Los métodos que emplean constricciones son los más utilizados en la medida del caudal en cauces abiertos. Existen muchos medidores de caudal de este tipo, tales como orificios, vertederos afilados, medidor de cresta ancha, medidores *Parshall* y medidores de garganta cortada.

En este tipo de medidores, todo el caudal que circula por la acequia pasa a través de la constricción del medidor, produciéndose un cambio del régimen del flujo de agua, y mediante una o dos simples medidas de la altura del nivel de agua se determina el caudal.

Vertederos afilados

Los vertederos afilados consisten en una pared con una escotadura de dimensiones determinadas colocada transversalmente en la acequia, de manera que todo el caudal es obligado a pasar por dicha escotadura.

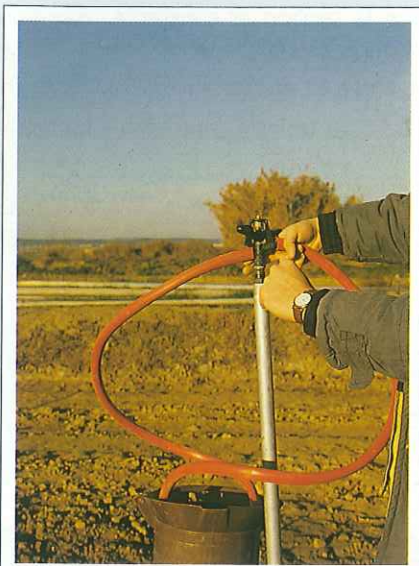
La escotadura del vertedero debe ser plana y de un espesor en el borde igual o inferior a 2 mm.

Los vertederos se clasifican de acuerdo a su forma en: rectangulares, triangulares (de $1/4 \times 90^\circ$ a 90°) y trapezoidales («*Cipoletti*») (García Lozano, 1977).

El fondo de la escotadura se denomina cresta. La diferencia de elevación entre la cresta y la superficie del agua en un punto situado aguas arriba del vertedero, a una distancia de tres o cuatro veces esa diferencia, se denomina altura de vertido.

El aumento de nivel de agua que se forma aguas arriba del vertedero se denomina remanso de vertedero.

Cuando la superficie del agua aguas abajo del vertedero se mantie-



Método directo de medida de caudal en un aspersor con un reloj y un recipiente de volumen conocido.

Los dos tramos de manguera recogen el agua que sale de las boquillas del aspersor.

ne por debajo de la cresta de forma que queda una cámara de aire entre la parte inferior de la lámina de vertido y la superficie del agua, entonces el flujo es libre. Si ocurre lo contrario, el flujo es sumergido.

Los vertederos deben funcionar con caída libre y la cámara de aire debe estar suficientemente ventilada para que no se produzcan subpresiones que originarían un aumento de la curvatura de la lámina de vertido y un aumento de la descarga del vertedero.

Si es posible, los vertederos deben instalarse al final de tramos anchos y



Contador volumétrico. El paso del agua hace girar la hélice y el caudal se registra en el contador situado en la parte superior.

profundos en la acequia, para que la velocidad de aproximación del agua al vertedero sea baja y se produzca una contracción completa de la vena líquida.

La descarga de los vertederos afilados es función de la altura de vertido, del tipo de vertedero utilizado y de las condiciones físicas de la instalación (distancia de la cresta al fondo, relación entre la anchura de la cresta y anchura de la acequia, etc.).

Estos medidores se pueden instalar en puntos de la red de acequias donde existan desniveles.

Medidor de cresta ancha

Este tipo de medidor consiste en una estructura situada en el fondo de la acequia, provista de una rampa y una cresta ancha, de forma que la contracción del flujo se realiza en el fondo de la sección (Bos et al., 1984).

Estos medidores son muy sencillos de construir en madera, hormigón o fábrica de ladrillo, producen poca pérdida de carga, pueden funcionar con valor alto de submergencia, se pueden instalar en cualquier tipo de acequia y su calibración se realiza fácilmente con un modelo matemático.

Las dimensiones del medidor deben elegirse de acuerdo al caudal normal de circulación en la acequia y el resguardo disponible.

Las dimensiones más importantes del medidor son la altura y anchura de la cresta y se debe tener especial precaución en que la superficie de la cresta forme un plano horizontal.

Una de las ventajas importantes de este medidor es que una vez construido e instalado se pueden volver a medir las dimensiones reales del medidor y mediante un programa de ordenador (BCW, 1989) se puede obtener la ecuación de descarga para ese medidor específico.

Medidores *Parshall*

Los medidores *Parshall* son unos instrumentos calibrados para la medida del caudal en cauces abiertos que han tenido una gran difusión en todo el mundo.

El medidor consiste en una sección convergente con el fondo a nivel por donde entra el agua de la acequia, una sección de garganta con el fondo con pendiente descendente y una sec-

ción divergente con el fondo con pendiente ascendente.

Estos medidores se construyen en muy distintos tamaños y en diversos materiales. Los medidores *Parshall* se clasifican por la anchura de la sección de garganta. El más pequeño tiene una anchura de garganta de 25,4 mm y el más grande de 15,25 m. Los medidores fijos se suelen construir con hormigón y los portátiles en chapa metálica o material plástico.

La construcción de estos medidores debe hacerse con mucha precaución para que todas las superficies del medidor queden en la posición correcta.

Los medidores *Parshall* pueden funcionar en flujo libre y con altos valores de submergencia pero cuando se superan ciertos límites es necesario corregir la ecuación de descarga del medidor.

Las ecuaciones de descarga y dimensiones de los aforadores *Parshall* de los distintos tamaños y las ecuaciones de corrección de la descarga en condiciones de submergencia se pueden encontrar en Bos (1978).

Medidores de garganta cortada

Este tipo de medidores está formado por una sección convergente y otra divergente. Las características más importantes de este tipo de medidor son su fondo plano y la ausencia de una sección de garganta, ya que la constricción del medidor está formada por la intersección de la sección convergente y la sección divergente del medidor (Walker y Skogerboe, 1987).

Estos medidores, al igual que los medidores *Parshall* pueden funcionar en flujo libre y con altos niveles de submergencia. Las ventajas más importantes respecto al medidor *Parshall* son:

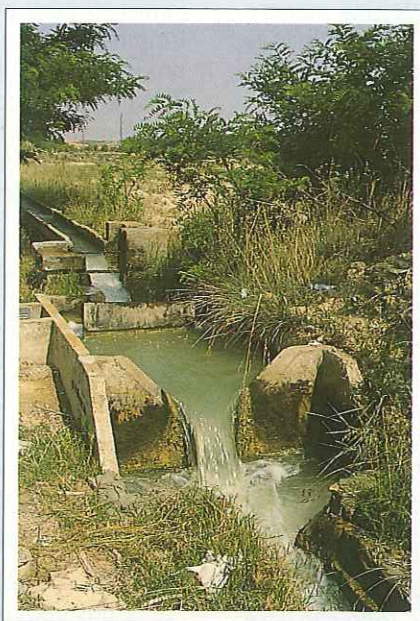
1. Mayor facilidad y fiabilidad en su construcción, ya que hay menos superficies en el medidor.
2. Su fondo plano permite su instalación en acequias de hormigón al mismo nivel que el fondo de la acequia.

Se pueden construir medidores de garganta cortada de muy diversos tamaños. Las dimensiones de estos medidores se establecen en función

LISTA DE EQUIVALENCIAS

Para convertir la Columna 1 en la Columna 2 multiplicar por:	COLUMNA 1	COLUMNA 2	Para convertir la Columna 2 en la Columna 1 multiplicar por:
VOLUMEN			
1.000	metros cúbicos (m ³)	litros (l)	0,001
1.000.000	hectómetros cúbicos (hm ³)	metros cúbicos (m ³)	0,000001
10.000	hectárea-metro (ha.m)	metros cúbicos (m ³)	0,0001
1	milímetros (mm)	litros por m ² (l/m ²)	1
10	milímetros (mm)	metros cúbicos por hectárea (m ³ /ha)	0,1
CAUDAL			
0,277777	metros cúbicos por hora (m ³ /h)	litros por segundo (l/s)	3,6
16,6666	metros cúbicos por hora (m ³ /h)	litros por minuto (l/min)	0,06
1.000	metros cúbicos por hora (m ³ /h)	litros por hora (l/h)	0,001
1.000	metros cúbicos por segundo (m ³ /s)	litros por segundo (l/s)	0,001
60.000	metros cúbicos por segundo (m ³ /s)	litros por minuto (l/min)	0,00001666
0,01666	litros por hora (l/h)	litros por minuto (l/min)	60
0,0002777	litros por hora (l/h)	litros por segundo (l/s)	3.600
60	litros por segundo (l/s)	litros por minuto (l/min)	0,01666
86,4	litros por segundo (l/s)	metros cúbicos en 24 horas (m ³ /24h)	0,011574

de la anchura de la garganta y de la longitud total del medidor. Así, la sección convergente tiene una longitud de 1/3 y la sección divergente de 2/3 de la longitud total del medidor.



Vertedero triangular construido en hormigón.

BIBLIOGRAFÍA

- BOS, M. G., 1978: *Discharge Measurement Structures*. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen, Holanda, 464 pp.
- BOS, M. G.; REPLOGLE, J. A.; CLEMMENS, A. J., 1984: *Flow measuring flumes for open channel systems*. John Wiley and Sons. New York, EE. UU., 321 pp.
- GARCÍA LOZANO, F., 1977: *Medición del agua de riego*. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Dirección General de Obras Hidráulicas, Centro de Estudios Hidrográficos, 177 pp.
- REPLOGLE, J. A.; BOS, M. G., 1982: «Flow measurement flumes. Applications to irrigation water management». En: *Advances in Irrigation*, Vol. 1, Ed. Hillel, 147-217. Academic Press, New York, EE. UU.
- SCOTT, H.; HOUSTON, C. E., 1977: *Measuring irrigation water*. Division of Agricultural Sciences, University of California, Leaflet 2956, EE. UU.
- WALKER, W. R.; SKOGERBOE, G. V., 1987: *Surface Irrigation: Theory and Practice*. Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, EE. UU. 386 pp.
- B. C. W., 1989: *Broad Crested Weir computer program for personal computers*. Utah State University, Logan, Utah, EE. UU.