

CAPÍTULO 4

Disponibilidad de agua

Autor: Dr. Hamil Uribe.

El agua es un recurso natural cada vez más escaso, tanto debido al efecto del cambio climático, como por la progresiva demanda hídrica en diferentes sectores de la economía, entre los que se cuentan el consumo humano, la industria y la agricultura, entre otros. Esto obliga a mejorar la gestión hídrica y las prácticas en el manejo del agua, siendo un aspecto fundamental la correcta cuantificación del agua. El conocimiento de la cantidad de agua disponible es fundamental para lograr una buena administración y uso eficiente de los recursos hídricos, tanto a nivel extra predial como dentro de los predios.

En la región de Magallanes existen recursos hídricos superficiales, tanto de ríos como los denominados chorrillos, que pueden ser usados en agricultura y ganadería. Es de importancia la medición de sus caudales para lograr un adecuado dimensionamiento de las superficies de cultivos o ganadería. Por lo anterior en este capítulo se presentan diversas opciones de aforo aplicables a causes que pueden ayudar a los productores a conocer su disponibilidad de agua.

Hidrometría

Se define como la parte de la hidrología que tiene por objeto medir el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo dentro de una sección transversal de flujo. Se encarga de medir, registrar, calcular y analizar los volúmenes de agua que circulan en una sección transversal de un río, estero, canal, tubería o chorrillo.

Importancia de medir el agua

Se pueden obtener grandes beneficios de una buena selección y aplicación de los métodos de medición de agua, como por ejemplo una adecuada asignación de los recursos hídricos y un correcto dimensionamiento de las superficies para riego o ganadería..



Conceptos importantes

Existen varios conceptos importantes de conocer para entender la medición de flujos de agua.

Volumen

Es la propiedad física que mide el espacio que ocupa un cuerpo. Como el agua es un fluido que toma la forma del recipiente que la contiene, se puede expresar en unidades volumétricas, como litros (l) para volúmenes pequeños, metros cúbicos (m^3) para acumuladores o micro embalses o millones de metros cúbicos (Hm^3) si se refiere a grandes embalses.

Velocidad (V)

Se define como la distancia recorrida en un tiempo determinado. Sus unidades son kilómetros por hora (k/h) o millas por hora (mi/h) en el caso de vehículos, aviones, bicicletas o caminantes. Para flujos de agua se prefiere metros por segundo (m/s). Notar que el flujo cada molécula de agua que pasa por una sección se mueve en una dirección, que es la misma dirección de su velocidad y que en la sección, las velocidades de las moléculas generalmente son diferentes de acuerdo a su ubicación (Figura 24). Notar que la velocidad se reduce a medida que se acerca a las paredes, fondo y en menor medida a la superficie y se logra un punto de máxima velocidad en el centro, a cierta profundidad.

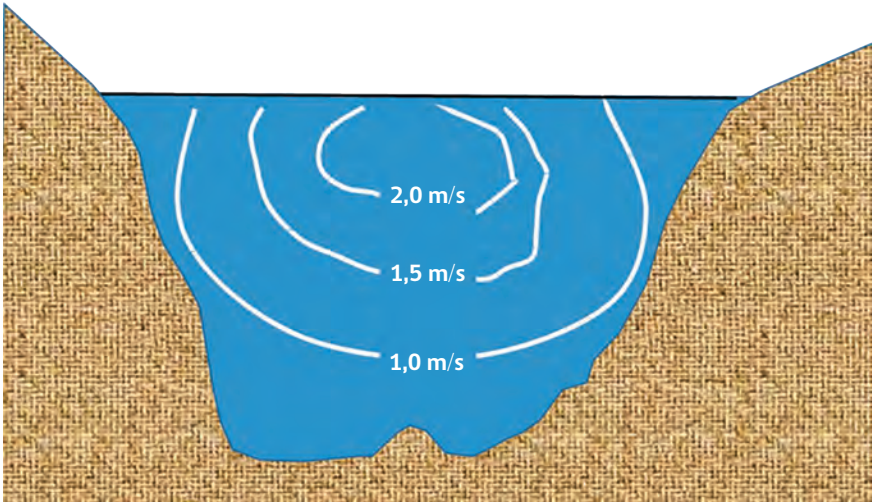


Figura 24. Distribución de las velocidades de flujo en la sección de escurrimiento.
(Elaboración propia).

Con el conjunto de velocidades de la sección se puede obtener una velocidad media (V_m), representativa del flujo en su totalidad.

Caudal (Q)

Corresponde al volumen de agua que pasa por una sección transversal al flujo por unidad de tiempo, se puede expresar en litros por segundo (l/s) en caso de tuberías o canales pequeños o en metros cúbicos por segundo (m^3/s) para canales medianos y grandes.

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

Donde:

Q: Caudal
V: volumen
T: tiempo

El Q también se puede calcular si se conoce la velocidad media (V_m) y el área de la sección transversal como:

$$Q = A \times V_m$$

Donde:

Q: Caudal

V_m : Velocidad media

A: Área de la sección transversal

Flujo en canales abiertos

Los canales son cursos de agua, en contacto con la atmósfera, sin presión. Pueden ser naturales o artificiales. El movimiento del agua es gracias a su propio peso, aprovechando la fuerza de la gravedad y está determinado por la geometría del mismo. En el caso de canales naturales es posible asociar su forma a un canal artificial regular para aplicar ecuaciones hidráulicas.

Forma de los canales

Para analizar el funcionamiento de los canales su geometría es un aspecto fundamental. En la Figura 25, se presentan las dimensiones principales que se deben conocer.

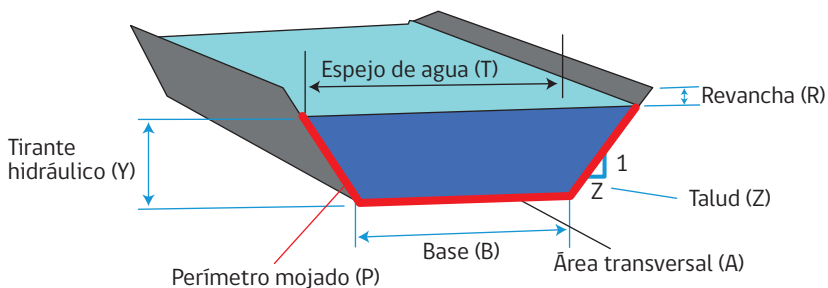


Figura 25. Principales dimensiones de los canales. (Elaboración propia)

Otros aspectos que no aparecen en la figura son:

Pendiente (i): es la pendiente longitudinal de la rasante de fondo del canal.

Radio hidráulico (Rh): es el cociente del área hidráulica y el perímetro mojado.

$$R_h = \frac{A}{P}$$

Talud (Z): Medida de la inclinación de la pared lateral. Z es el valor de la proyección horizontal cuando la vertical es 1. Depende del tipo de material en que se construya el canal, a fin de evitar su destrucción se determina un talud adecuado.

Coefficiente de rugosidad (n): depende del tipo de material en que se aloje el canal o su revestimiento (Cuadro 3).

Cuadro 3. Coeficientes de rugosidad de Manning.

Canal	Coef. Manning (N)
Sin revestir:	
Excavado en tierra	0,022 - 0,030
En roca lisa	0,030 - 0,040
Lecho pedregoso	0,030 - 0,040
Roca con salientes	0,035 - 0,050
Revestidos:	
Revestido en hormigón	0,013 - 0,016
Suelo - cemento	0,013 - 0,016
Hormigón proyectado	0,013 - 0,016
Hormigón prefabricado	0,013 - 0,020
Ladrillos	0,013 - 0,018
Mampostería piedras	0,018 - 0,025
Membrana descubierta	0,010 - 0,020
Membrana cubierta	0,015 - 0,025
Asfalto	0,013 - 0,018
Metal (Acero liso)	0,010 - 0,016
Metal (Acero corrugado)	0,020 - 0,030
Madera	0,010 - 0,015

Cálculos en canales

El movimiento del agua en canales ocurre desde un punto más alto (mayor nivel de energía) hacia uno más bajo. Los factores que gobiernan el flujo son la geometría de la sección de escurrimiento del canal, la pendiente y la rugosidad de las paredes. La expresión más utilizada para calcular el caudal a partir de las variables antes mencionadas es la ecuación de Manning:

$$Q = \frac{\sqrt{i}}{n} \times A \times R_h^{2/3}$$

Donde:

Q: Caudal (m³/s).

i: Pendiente del canal (m/m).

A: Área de la sección de escurrimiento (m²).

Rh: Radio hidráulico de la sección de escurrimiento (m)

n: Coeficiente de rugosidad de Manning.

Las paredes y fondo del canal pueden ser de distintos materiales (Cuadro 3), lo que junto al estado de mantenimiento de las mismas determina el coeficiente de rugosidad de Manning, relacionado a la mayor o menor dificultad para el escurrimiento del agua. Para definir los valores de dicho coeficiente se puede utilizar el Cuadro 3.

Medición de flujos de agua.

La medición del caudal de un río, canal o tubería se denomina aforo y existen técnicas adecuadas a distintas situaciones, dependiendo del lugar, geografía, topografía, etc. Las mediciones están sujetas a errores, los que se deben minimizar usando el método de aforo correcto.

Existen diversas opciones para aforar en canales abiertos, y la selección dependerá del tamaño del flujo y del curso de agua, rugosidad de las paredes y fondo, grado de turbulencia, nivel técnico de los operadores, capacidad de inversión, requerimientos de datos por los usuarios como frecuencia de medición, precisión y exactitud.

Los conceptos de hidráulica empleados en el aforo de agua superficial se basan en las relaciones entre la altura del escurrimiento y el caudal, o en mediciones de velocidad del agua. La mayoría de los equipos miden el flujo en forma indirecta y se dividen en los que miden velocidad (V) o altura de la carga de agua (H). Una vez medidos estos valores se utilizan gráficos, tablas o ecuaciones para obtener el caudal (Q).

Los métodos de aforo se clasifican en a) directos y b) indirectos, siendo estos últimos los más aplicables para la medición en canales o chorrillos. Los métodos directos son los que miden en forma directa el volumen que escurre por unidad de tiempo, como por ejemplo el método volumétrico, en el cual se recibe el agua en un receptáculo y se toma el tiempo que tardó en alcanzar cierto volumen (Figura 26).

$$Q = \frac{v}{t}$$

Donde:

Q = Caudal o Gasto.

v = Velocidad.

t = tiempo de llenado del recipiente.

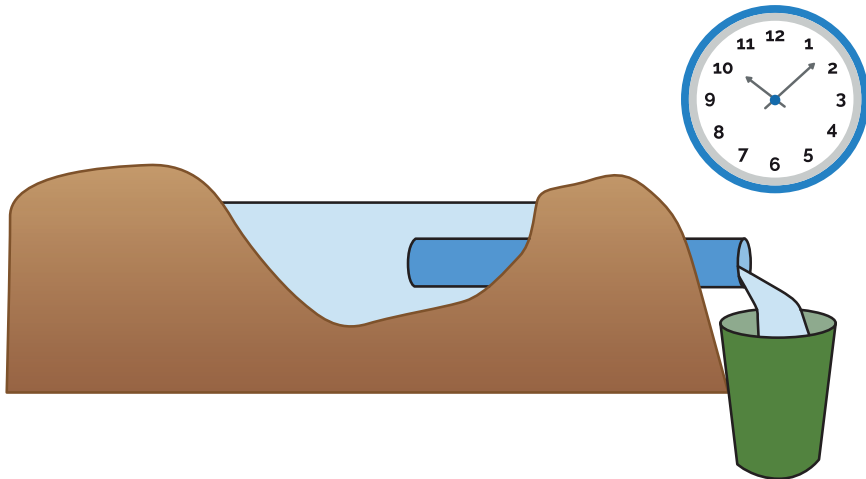


Figura 26. Medición de aforo volumétrico. (Elaboración propia).

Los métodos indirectos determinan el caudal a través de la medición de otras variables, como altura de escurrimiento del agua, velocidad o presiones.

Aforo mediante relaciones área-velocidad

El caudal se relaciona al área de la sección perpendicular a la corriente y a la velocidad media del flujo y hay métodos indirectos que se basan en estas relaciones según la ecuación:

$$Q = A \times Vm$$

Donde:

Q : Caudal

Vm : Velocidad media

A : Área de la sección transversal

Los métodos más comunes de relaciones área-velocidad son el método del flotador y el uso de molinetes. En ambos métodos se mide la sección transversal al flujo (A) y se estima la velocidad media (Vm).

Medición del área

Se recomienda un levantamiento topográfico de la sección transversal, dividida en franjas verticales de igual ancho (a), cuyo número depende del ancho total del canal (Figura 27).

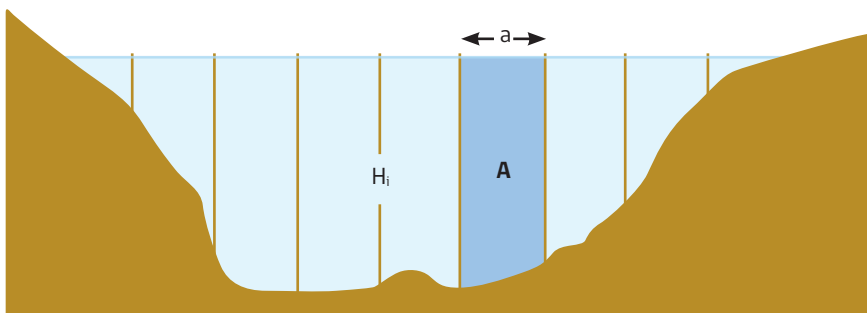


Figura 27. Sección transversal para el método área-velocidad. (Elaboración propia).

El número de franjas (n) depende del ancho del cauce. Para canales de hasta 1 m de ancho n=4; de 1 a 2 m n=6; de 2 a 4 m n=10; de 4 a 8 m n=16 y de 8 a 10 m n=20.

El cálculo del área (A) de cada franja es:

$$A = a \times h$$

Donde

h: altura promedio entre los h_i que limitan el área (m)

a: Ancho de la franja (m)

A: Área de la franja (m²)

El área total del canal es la suma de todas las áreas de las franjas.

Método del flotador

Es un método simple, que no requiere infraestructura ni equipos especiales. Entrega caudales estimados a muy bajo costo.

La Figura 28 muestra el funcionamiento del método. Se trata de medir el tiempo que tarda un flotador (corcho, pelota de ping pong, etc.) en recorrer una distancia, normalmente de 10 m. El tramo considerado debe ser regular, recto y sin obstáculos.

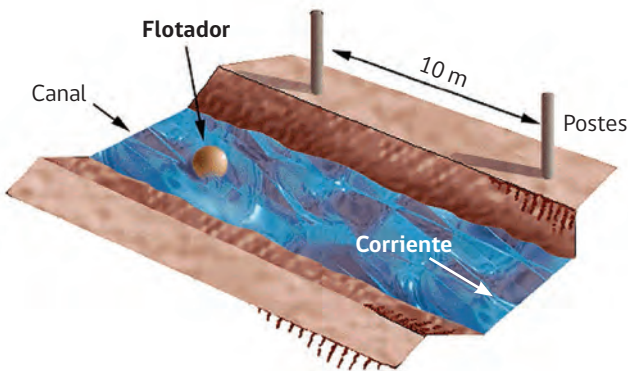


Figura 28. Medición de caudal mediante el método del flotador. Fuente: Maldonado, 2001.

La velocidad del flotador (V_f) se calcula como:

$$V_f = \frac{d}{t}$$

Donde

d : distancia (10 m)

t : tiempo en recorrer los 10 m (s)

La ecuación que se utiliza para calcular el caudal es:

$$Q = 0,8 \times Ac \times V_f$$

Donde:

Q : Caudal (m^3/s)

V_f : Velocidad del flotador (m/s)

Ac : Área de la sección transversal total (m^2)

Generalmente el caudal Q se expresa en litros por segundo (l/s) o en metros cúbicos por segundo m^3/s .

Ejemplo: Se afora un chorrillo de 0,75 m^2 de sección de flujo. El flotador demora 20 s en recorrer 10 m.

Distancia recorrida = 10 metros.

Tiempo = 20 segundos

Área de la sección = 0,75 m^2

Velocidad del flotador = $10/20 = 0,5$ m/s

Caudal = $0,8 \times 0,75 \times 0,5 = 0,3$ m^3/s

Método del Molinete

Los molinetes hidráulicos son aparatos que permiten medir la velocidad del agua en un punto de la sección. Realizando mediciones en diferentes puntos a lo ancho y alto de la sección, se obtiene una mejor estimación del caudal. Los molinetes cuentan con hélices o cazoletas que giran gracias al impulso del agua. Existe una relación lineal entre la velocidad del agua y la velocidad de giro

del molinete, de forma que contando el número de revoluciones por unidad de tiempo del molinete se estima la velocidad del agua.

Para lograr un valor de caudal de buena calidad se deben seguir ciertas recomendaciones: sección transversal regular, fácil acceso, tramo recto y sin obstáculos.

Los puntos de medición se obtienen a partir de franjas (Figura 27), en las cuales se mide a una, dos o tres alturas dependiendo del alto de la franja (h_i). El criterio se presenta en el cuadro 4.

Cuadro 4. Alturas donde medir la velocidad según altura en las franjas (H_i)

H_i (m)	Medida de la velocidad en sub-sección
$h \leq 0.2m$	0.6 h_i
$0.2 < h \leq 0.5m$	0.2 h_i y 0.6 h_i
$h > 0.5m$	0.2 h_i ; 0.6 h_i y 0.8 h_i

Una vez medidas las velocidades a cada altura de una franja (una, dos o tres, según cuadro 4) se calcula el promedio, que corresponde a la Vm_i de la franja. Conocida el área (A_i) de la franja es posible estimar el caudal que está pasando por dicha franja:

$$Q_i = A_i \times Vm_i$$

Donde:

Q_i : Caudal en la sección i

Vm_i : Velocidad media en la franja i

A_i : Área de la franja vertical i

El caudal total de canal se obtiene sumando los caudales (Q_i) de todas las franjas:

$$Q_T = \sum_{i=1}^n Q_i$$

Métodos de relación escala-gasto

Este método se basa en la obtención de una ecuación aplicable a un tramo del curso de agua, siempre que sus características hidráulicas se mantengan estables. Para desarrollar la ecuación se realizan aforos con un molinete calibrado u otro equipo, a distintas alturas de flujo, asociando a cada caudal medido una altura de escurrimiento. La ecuación que representa el caudal en función de la altura de escurrimientos es de la forma:

$$Q = a * h^b$$

Donde:

Q = Gasto del canal (m³/s)

h = Carga hidráulica (m)

a y b = Parámetros de la ecuación, adimensionales

Los parámetros a y b se pueden obtener mediante de regresión.



Bibliografía

Domínguez, Francisco J. 1999. Sexta edición. Editorial Universitaria. Chile. (773p).

French, Richard H. 1988. Hidráulica de canales abiertos. McGraw-Hill/ Interamericana de México, S.A. de C.V., México. (724p).

Hammer, M. and Mackickan, K. 1981. Hydrology and quality of water resources. John Wiley and Sons, USA. (486p).

Jara R., Jorge; Edmundo Villarroel S.; y Alejandro Valenzuela A., 1988. Análisis matemático de la eficiencia de conducción en canales. Agro-Ciencia 4(2):153-157.

Linsley, R. 1988. Hidrología para ingenieros. Mc Graw Hill, México. (386p).

Linsley, R.; N. Kohler and J.L. Paulhus. 1983. (2a. Ed.). Hidrología para Ingenieros. Graw Hill Book, Co. USA. (398p).

Maldonado I., Isaac (Ed) 2001. Riego y Drenaje Guía del Extensionista. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Chillán, Chile. Boletín de Bolsillo N°1. (328 p).

Uribe, Hamil, 2019. Métodos de medición de agua en canales de riego. Boletín INIA N° 412, 106p, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Villa Alegre, Chile. ISSN 0717-4829.

U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation. 2001. Water Measurement Manual. Revised reprinted. Washington DC. (317p).

Villón Béjar, Máximo. Hidráulica de Canales. 2007. Segunda Edición: Editorial Villón, Lima-Perú. (508p).