

GUÍA DE AFOROS EN CANALES ABIERTOS

CI5101: HIDROLOGÍA Semestre primavera 2014

Profesores: James McPhee T. Auxiliar: Sebastián Fernández M.

El objetivo de una salida a terreno es poder estimar ciertos procesos hidrológicos e hidrogeológicos vistos en la teoría. En el desarrollo de las clases de cátedra, se han estudiado procesos físicos que luego han sido modelados en los laboratorios. Los datos de entrada de todo modelo hidrológico se estiman mediante diversas técnicas e instrumentos. La actividad de hoy tiene como objetivo estimar algunos de esos datos de entrada, con instrumentos específicos que se detallan a continuación.

1 MEDICIÓN DE CAUDAL

Desde hace varios siglos el ser humano ha tenido la necesidad de medir el comportamiento físico del agua en movimiento o en reposo. Es por ello que ha inventado muchos aparatos que registran la velocidad, la presión, la temperatura y el caudal.

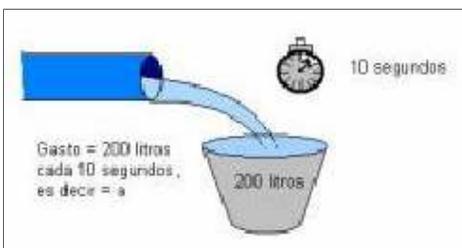
Una de las variables que más interesan es esta última, el caudal, puesto que a través de él se cuantifican consumos, se evalúa la disponibilidad del recurso hídrico y se planifica la respectiva gestión de la cuenca.

El caudal, Q , se define como el volumen de agua, V , que pasa por una sección en un determinado tiempo, t , es decir:

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

Aforar es medir un caudal. Para realizar un aforo en un sistema hidráulico, se puede **medir directamente** el volumen, en un recipiente y el tiempo, con un cronómetro.

Este método volumétrico es el más recomendable, sin embargo a veces es difícil de aplicar, solamente resulta útil para caudales pequeños y donde las características físicas lo permitan.



Debido a lo anterior, han surgido los **métodos indirectos**, que como su nombre lo señala miden otras variables físicas distintas del caudal, como por ejemplo la velocidad o la altura piezométrica, para luego, aplicando los principios hidráulicos, obtener dicho caudal.

Los métodos de medición indirectos de caudales se pueden agrupar en tres tipos: Área- Velocidad, Altura Piezométrica y por medio de trazadores. A continuación se describen los métodos:

1.1 Método Área - Velocidad

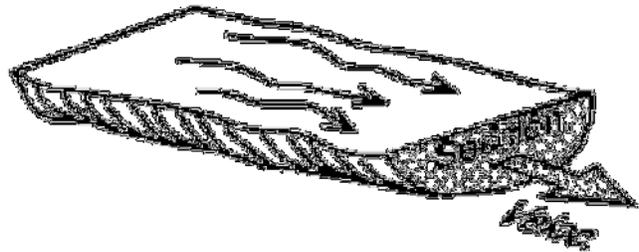
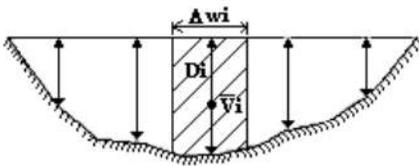
En este método se utiliza la ecuación de continuidad.

El caudal en una sección transversal de área A está dado por:

$$Q = \iint V \cdot dA,$$

En donde la integral se aproxima sumando los caudales incrementales calculados para cada medición i , ($i=1, 2, \dots, n$), de velocidad $i V$ y profundidad D_i . Las mediciones representan valores promedio a lo largo de un ancho $i \Delta w_i$ del cauce, luego el caudal se calcula como:

$$Q = \sum V_i D_i \Delta w_i$$



Por su parte, la velocidad $i V_i$, en un punto, se puede medir, por ejemplo, con alguno de los siguientes dispositivos: flotador y reloj, molinetes y sensores de inducción magnética.

Con el flotador y el reloj se toman lecturas del tiempo que recorre un cuerpo que avanza flotando sobre el agua. El molinete registra el número de vueltas que impone el efecto dinámico del agua y se relaciona esta frecuencia de giro con la velocidad. El sensor de inducción magnética basa su funcionamiento en la ley de Faraday que dice que si un medio electroconductor se desplaza en un campo magnético, una tensión inducirá dicho conductor; por lo tanto la tensión es proporcionalmente lineal a la velocidad del conductor eléctrico (corriente de agua).



Figura 1: Sensor de inducción magnética

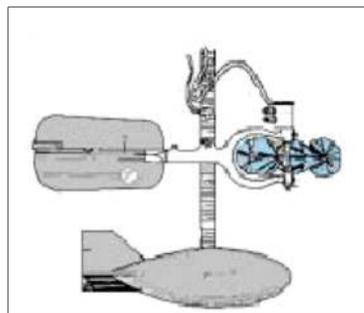


Figura 2: Molinete



Figura 3: Flujómetro

Al usar uno u otro aparato de medición es necesario tener siempre presente la posibilidad de generar errores en las mediciones, debido a que un pequeño error inicial se puede propagar y repercutir en el dato final.

1.2 Método de la altura piezométrica

El otro método indirecto para medir el caudal que tiene una corriente de agua, es el que expresa este caudal como una función de la altura piezométrica. La relación es muy sencilla, siendo del tipo potencial:

$$Q = Ch_p^z$$

En donde,

Q: caudal

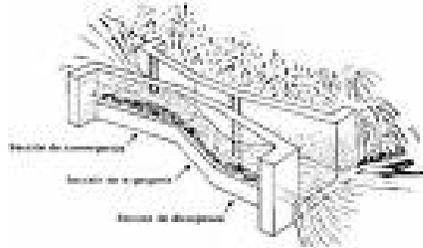
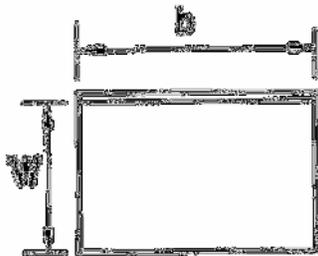
C: coeficiente de descarga

h_p : altura piezométrica

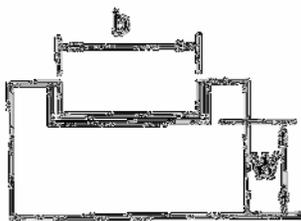
z: exponente

Tanto el coeficiente C como el exponente z, dependen de las características geométricas del dispositivo de medición que se trate.

Figura 4: Dispositivos para medición de caudal



Son varios los dispositivos que utilizan esta relación, como por ejemplo: vertederos, Canaletas Parshall y sensores de nivel, entre otros.



Existen en el mercado equipos que son más sofisticados, en donde las lecturas de las alturas o cargas piezométricas se realizan por medio de celdas de presión (transductores) y equipos ultrasónicos, que por un lado mejoran las mediciones notablemente, pero por otro resultan muchísimo más costosos.



Hay varios requerimientos para la instalación física de estos equipos de medición, que dependen de cada dispositivo en particular. En canales de superficie libre, la altura piezométrica debe medirse en lugares donde la altura de velocidad sea despreciable, lo cual se logra donde el agua escurre con flujo subcrítico o donde el agua se encuentra estancada.

1.3 Método con trazador

Este tipo de medición se utiliza cuando las condiciones de la corriente dificultan el uso de otros métodos, ya sea por la geometría de la caja del río o por su turbulencia. Se basa en la inyección de una sustancia reconocible y que es medida aguas abajo. Comúnmente se utiliza sal (NaCl) o trazadores fluorescentes (rodamina).

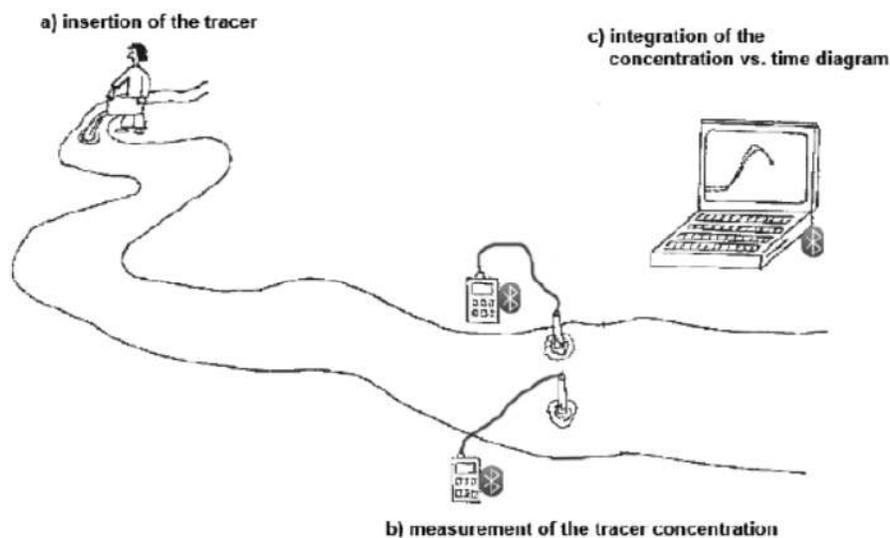
Para una buena aplicación de este método se deben tener las siguientes consideraciones:

- Flujo constante durante la medición.
- Conductividad base constante durante la medición.
- Distribución homogénea del trazador en la sección transversal del punto de medición.
- Todo el trazador inyectado debe pasar a través de la sección trasversal donde se está midiendo.

En caso de inyectar sal, se emplea un sensor de conductividad, el lo cual debe ser previamente calibrado de forma tal de conocer la conductividad base del río.

Posterior a ello se procede a incorporar el trazador a la corriente del río. Se debe procurar una buena mezcla de la sustancia, por ello, deben evitarse las aguas detenidas (pozas), flujos con baja turbulencia y zonas con mucha vegetación.

Figura 5: Esquema medición con trazador



Para asegurar una buena mezcla, el trazador es disuelto previamente. Una vez incorporado al flujo empieza el proceso de medición, registrándose una curva como la de la Figura 6. Por tanto, la masa M de trazador inyectada corresponde al área sombreada, la cual queda expresada por:

$$M = \int_{t_0}^{t_E} Q C(t) dt - \int_{t_0}^{t_E} Q C_0 dt$$

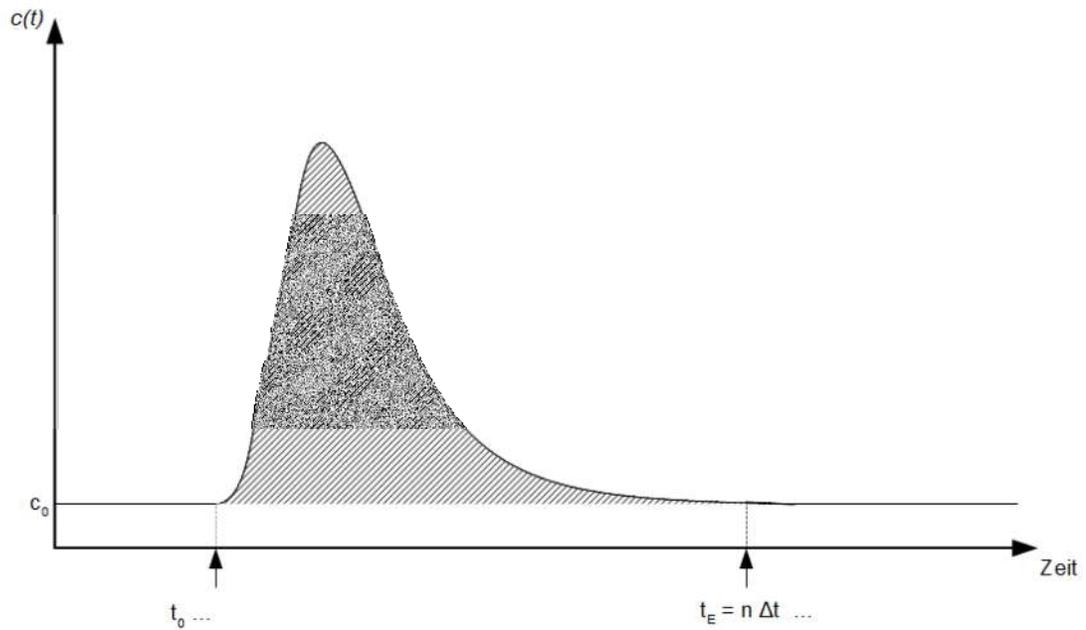
Esta expresión puede aproximarse mediante sumatorias de concentraciones medidas a intervalos regulares Δt :

$$M = \sum_{i=0}^n Q C(t_0 + i \Delta t) \Delta t - \sum_{i=0}^n Q C_0 \Delta t$$

A partir de lo cual se puede despejar el caudal:

$$Q = \frac{M}{\sum_{i=0}^n [C(t_0 + i \Delta t) - C_0] \Delta t}$$

Figura 6: Curva de concentración



2 EXPERIENCIA PRÁCTICA

Objetivos de la experiencia

- Aprender a utilizar en terreno distintos equipos para realizar aforos: molinetes, canaleta Parshall, y por medio de trazadores; verificando el funcionamiento correcto de los medidores existentes, según el procedimiento de aforo.
- Estimar el caudal circundante en el cauce.
- Evaluar e interpretar adecuadamente los datos de medición proporcionados por cada uno de los diferentes dispositivos y poder correlacionar las lecturas obtenidas a través de las diferentes metodologías.

Materiales y Métodos

Los materiales que se usarán en esta experiencia son los siguientes:

- Molinete
- Flujómetro
- Canaleta Parshall de 6"
- Sensor de conductividad diseñado para aforos químicos}
- Equipos de topografía para caracterizar batimetría del cauce.

2.1 Método del molinete:

El molinete es un instrumento que tiene una hélice o rueda de cazoletas, que gira al introducirla en una corriente de agua. El de tipo de taza cónica gira sobre un eje vertical y el de tipo hélice gira sobre un eje horizontal. En ambos casos la velocidad de rotación es proporcional a la velocidad de la corriente; se cuenta el número de revoluciones en un tiempo dado.

Los molinetes pueden ir montados en soportes o suspendidos de cables. Antes de ser usados en el campo, deben ser calibrados por el fabricante para determinar la relación entre la velocidad de rotación de la hélice y la velocidad del agua.

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

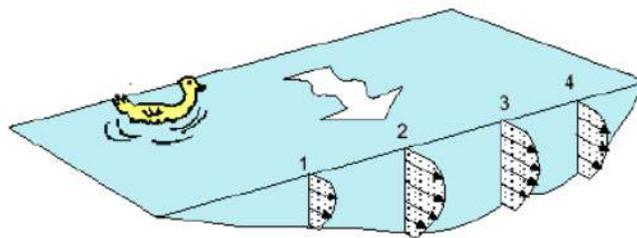
Un molinete mide la velocidad en un único punto, es por esto que, para calcular el caudal total se deben realizar varias mediciones.



Según sea el grado de precisión que se quiera obtener en el aforo, se tomarán mayor o menor número de puntos de medida en la sección. Cuando se pretende obtener una alta precisión, se elegirán mayor número de verticales en la sección y se calculará la velocidad media en cada vertical. Para cada sección entre dos verticales de medida, el área se calcula como el producto del promedio del alto por el ancho, y la velocidad media como el promedio de las velocidades medias en las verticales. El caudal de cada sección resulta directamente como el producto del área y la velocidad media, mientras que el caudal total se calcula como la suma de los caudales entre verticales.

Determinación de la velocidad media en la vertical:

La velocidad media del agua en cada vertical puede determinarse mediante los siguientes métodos, dependiendo del tiempo disponible y teniendo en consideración el ancho, la profundidad del agua, las condiciones del lecho, los cambios de nivel, así como la precisión con que se desea operar:



Método de los puntos

Se deben realizar distintas observaciones de velocidad en cada vertical dependiendo de la profundidad del curso del agua. Para secciones de poca profundidad (menores a 60 cm) se realizan observaciones en cada vertical colocando el molinete a 0,6 de la profundidad total por debajo de la superficie libre.

Para profundidades superiores, generalmente, se mide la velocidad a 0,2 y luego a 0,8 de la profundidad de la superficie libre y se usa el promedio de las dos medidas como la velocidad media en la vertical. En la Tabla

2.1 se resumen los antecedentes necesarios para el cálculo de la velocidad media de acuerdo a la profundidad del cauce:

Tabla 2.1: Puntos de medición y estimación de velocidad media en una superficie de agua.

Número de mediciones	Profundidad del curso de agua H [cm]	Puntos de observación (medidos desde la superficie libre)	Velocidad media
1	30 - 60	0.6H	$V_{med} = V_{0.6}$
2	60 - 300	0.2 y 0.8H	$V_{med} = 0.5 \cdot (V_{0.2} + V_{0.8})$
3	300 - 600	0.2, 0.6 y 0.8H	$V_{med} = 0.25 \cdot (V_{0.2} + 2 \cdot V_{0.6} + V_{0.8})$
5	+600	30 cm, 0.2, 0.6, 0.8H y 30 cm sobre el fondo	$V_{med} = 0.1 \cdot (V_{sup} + 3 \cdot V_{0.2} + 2 \cdot V_{0.6} + 3 \cdot V_{0.8} + V_{fon}^d)$

Método de múltiples puntos:

Consiste en medir velocidades en muchas posiciones de la vertical para definir el perfil de velocidad bastante bien y así calcular una velocidad media lo suficientemente exacta. El método es muy preciso, dependiendo del número de puntos de referencia medidos para el perfil, pero requiere de mucho tiempo.

Método superficial:

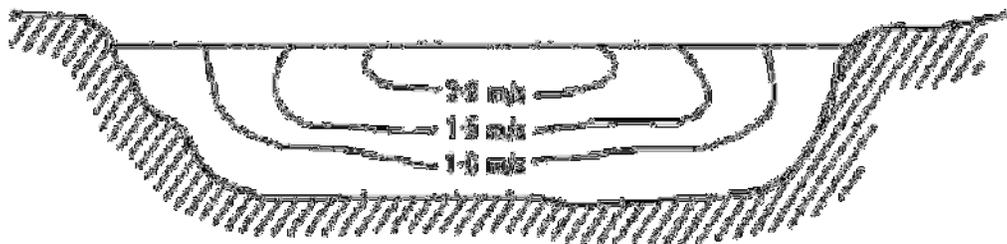
Implica medir la velocidad cerca de la superficie libre y después multiplicarla por un coeficiente que va desde 0,85 a 0,95, dependiendo de la profundidad del agua, de la velocidad, y de la naturaleza del río o canal. La dificultad de determinar el coeficiente exacto limita la utilidad y la exactitud de este método. En general, se utiliza para medir la velocidad en crecidas, en donde no se recomienda efectuar un aforo convencional, para proteger los equipos hidrométricos.

Método de integración:

En este método el molinete es sumergido y elevado a lo largo de toda la vertical a una velocidad uniforme. La velocidad de ascenso o descenso del molinete no deberá ser superior al 5% de la velocidad media del flujo en toda la sección transversal y en todo caso deberá estar comprendida entre 0.04 y 0.10 m/s. Se determina el número de revoluciones por segundo. En cada vertical se realizan dos ciclos completos y, si los resultados difieren de más de 10%, se repite la medición.

Curvas Isotáquicas:

Consiste en trazar líneas de igual velocidad en el perfil del cauce y obtener la velocidad media de la sección por integración directa.



Se deben escoger las secciones a aforar, teniendo presente que:

- La sección elegida debe estar situada en un tramo recto y ser lo más homogénea posible a lo largo de dicho tramo.
- Verificar que la sección sea adecuada para el tamaño del molinete.
- Examinar las obstrucciones presentes en la sección y en caso de ser necesario remover las piedras pesadas que puedan dificultar una correcta medición. Todo esto debe ser realizado antes de comenzar el aforo, para así no alterar las condiciones del flujo.

Una vez escogido el sitio de medición se debe colocar un lazo de un extremo a otro para marcar bien la perpendicularidad al cauce.

Para realizar esta medición es necesario tener la relación entre la velocidad de rotación de la hélice del Molinete y la velocidad del agua, la cual está dada por el fabricante y se resume en la siguiente tabla:

TABLA DE CONVERSIÓN PARA MEDIDOR DE CAUDAL N° 522
Velocidad en m/s

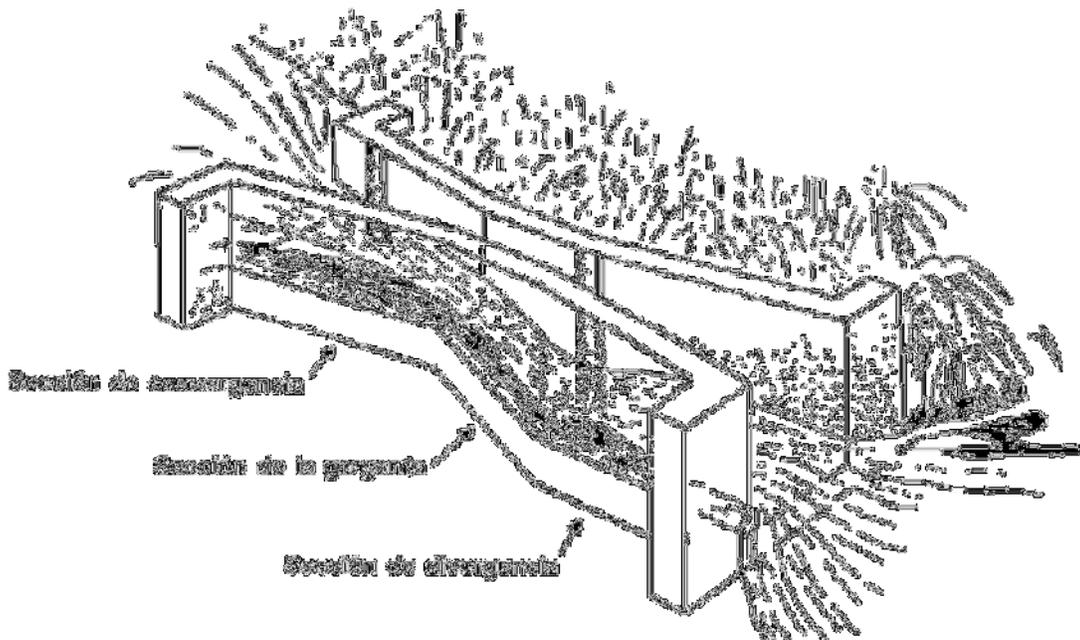
Time In. Secs.	1 Rev.	2 Rev.	3 Rev.	5 Rev.	10 Rev.	20 Rev.	30 Rev.	40 Rev.	50 Rev.	60 Rev.	70 Rev.	80 Rev.	90 Rev.	100 Rev.	150 Rev.	200 Rev.	Time In. Secs.
40	0.027	0.048	0.064	0.099	0.177	0.349	0.512	0.680	0.857	1.018	1.189	1.356	1.527	1.695	2.542	3.389	40
41	0.027	0.048	0.067	0.099	0.174	0.339	0.500	0.664	0.825	0.994	1.160	1.323	1.486	1.655	2.481	3.327	41
42	0.027	0.042	0.057	0.081	0.171	0.325	0.489	0.659	0.828	0.999	1.174	1.342	1.509	1.676	2.423	3.270	42
43	0.027	0.041	0.051	0.070	0.163	0.321	0.475	0.634	0.793	0.948	1.105	1.262	1.420	1.578	2.358	3.154	43
44	0.027	0.039	0.049	0.063	0.157	0.314	0.463	0.618	0.770	0.927	1.083	1.241	1.397	1.555	2.290	3.059	44
45	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	45
46	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	46
47	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	47
48	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	48
49	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	49
50	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	50
51	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	51
52	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	52
53	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	53
54	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	54
55	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	55
56	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	56
57	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	57
58	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	58
59	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	59
60	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	60
61	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	61
62	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	62
63	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	63
64	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	64
65	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	65
66	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	66
67	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	67
68	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	68
69	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	69
70	0.027	0.039	0.049	0.063	0.156	0.313	0.463	0.618	0.770	0.924	1.080	1.237	1.394	1.552	2.289	3.058	70

Esta tabla es aplicable únicamente para mediciones con el molinete de velocidad tipo 522. Cuando se emplea otro tipo de molinete con otro tipo de velocidad se debe aplicar la correspondiente tabla de conversión.

2.2 Método de la Canaleta Parshall

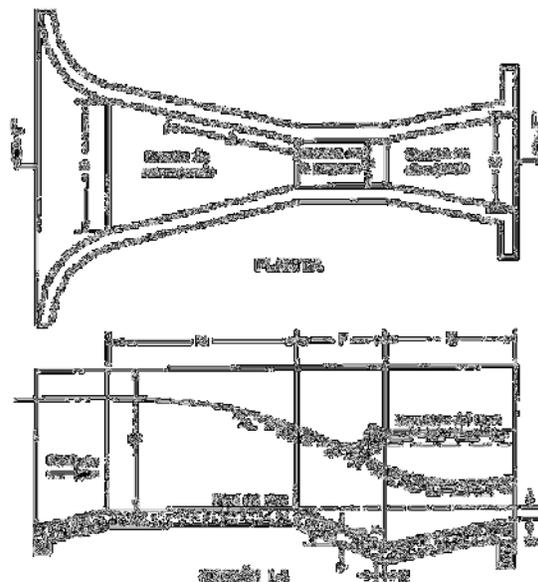
Los aforadores Parshall son instrumentos calibrados para la medida del caudal en cauces abiertos. Se describe técnicamente como un aforador de profundidad crítica. Sus principales ventajas son que sólo existe una pequeña pérdida de carga a través del aforador, que deja pasar fácilmente sedimentos o desechos, que no necesita condiciones especiales de acceso o una poza de amortiguación y que tampoco necesita correcciones para una sumergencia de hasta un 60%. En consecuencia, es adecuado para la medición del caudal en canales de riego o en corrientes naturales con una pendiente suave.

El medidor consiste en una sección convergente con el fondo a nivel, una sección de garganta con el fondo con pendiente descendente y una sección divergente con el fondo con pendiente ascendente. Gracias a ello el agua escurre a velocidad crítica a través de la garganta.



La sección control del medidor está situada cerca del final de la sección convergente. Los aforadores Parshall están calibrados para una altura piezométrica (h_a), medida en un lugar definido de la sección convergente. La altura piezométrica de aguas abajo (h_b) se mide en la sección de la garganta.

Los aforadores Parshall se construyen de muy diversos tamaños y se clasifican según sea la anchura en la sección de garganta. El Parshall más pequeño tiene una anchura de garganta de 1 pulgada (25,4 mm) y el más grande de 50 pies (15.250 mm.).



La ecuación de descarga es de la forma:

$$Q = K h_a^u$$

Donde:

K = coeficiente que depende del ancho de la garganta

u = coeficiente que varía entre 1,522 y 1,60.

h_a = altura piezométrica en la sección de control A

Cuando la relación de sumergencia (h_b/h_a) excede el valor de 0,60 en medidores de 3, 6 y 9 pulgadas, entonces la descarga del medidor se reduce debido a la sumergencia. Bajo estas condiciones, las ecuaciones de descarga de los aforadores no son válidas y deben ser reducidas en la variación de la descarga debido a la sumergencia (Q_E). El caudal corregido (Q_s) será: $Q_s = Q \cdot Q_E$; Q_E = reducción de descarga debido a sumergencia.

Para aforar con una canaleta Parshall, se deben tener presente los siguientes pasos:

- Adecuar el terreno con palas e instrumentos disponibles para instalar la canaleta propiamente tal.
- Encauzar el flujo de tal forma que toda el agua sea captada por la canaleta
- Cerciorarse de que la canaleta esté horizontal, vale decir, no presente una inclinación que pueda cambiar la altura del flujo.

Una vez cumplidos los puntos anteriores se debe medir la altura de agua en la regla de la canaleta.



Las fórmulas del fabricante para obtener el caudal en base al uso de la canaleta Parshall están dadas por:

Canaleta Parshall de 6": $Q(l / s) = 381,2H^{1.580}$

En donde H es la altura medida en metros.

3 INFORME DE TERRENO

Se debe realizar un informe explicativo de las experiencias, que incluya una breve introducción con objetivos, materiales, metodología empleada en terreno, cálculos, resultados presentados como tablas o gráficos, y conclusiones.