



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**CALIBRACIÓN DE UN MOLINETE DE ASPAS PARA LA REALIZACIÓN DE
UN AFORO POR VADEO DE UN CAUCE PEQUEÑO**

Didier Eduardo Fernández Alvarado
Asesorado por el Ing. Alan Cosillo Pinto

Guatemala, febrero de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CALIBRACIÓN DE UN MOLINETE DE ASPAS PARA LA REALIZACIÓN DE
UN AFORO POR VADEO DE UN CAUCE PEQUEÑO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

DIDIER EDUARDO FERNÁNDEZ ALVARADO

ASESORADO POR EL ING. ALAN COSILLO PINTO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, FEBRERO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santlzo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
EXAMINADOR	Ing. Marco Antonio García Díaz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CALIBRACIÓN DE UN MOLINETE DE ASPAS PARA LA REALIZACIÓN DE UN AFORO POR VADEO DE UN CAUCE PEQUEÑO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 3 de enero de 2016.



Didier Eduardo Fernández Alvarado

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 21 de Septiembre de 2018

Ingeniero

Luis Manuel Sandoval Mendoza

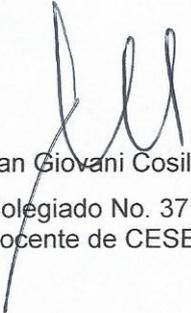
Jefe del Departamento de Hidráulica

Facultad de Ingeniería

Después de revisar el trabajo de graduación del estudiante Didier Eduardo Fernández Alvarado, quien se identifica con carné No. 2011-22836, titulado CALIBRACIÓN DE UN MOLINETE DE ASPAS PARA LA REALIZACIÓN DE UN AFORO POR VADEO DE UN CAUCE PEQUEÑO, y haber hecho las correcciones necesarias al mismo, lo doy por aprobado y lo autorizo para continuar con el proceso correspondiente.

Sin otro particular, me despido atentamente.

"ID y Enseñad a Todos"



Ing. Alan Giovanni Cosillo Pinto

Colegiado No. 3717
Docente de CESEM



Guatemala, 18 de Octubre de 2018

Ingeniero

Hugo Leonel Montenegro Franco

Director Escuela de Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero

Le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado **“CALIBRACIÓN DE UN MOLINETE DE ASPAS PARA LA REALIZACIÓN DE UN AFORO POR VADEO DE UN CAUCE PEQUEÑO”**, desarrollado por el estudiante de ingeniería civil Didier Eduardo Fernández Alvarado, quien contó con la asesoría del ingeniero Alan Giovani Cosillo Pinto.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y habiendo cumplido con los objetivos doy mi aprobación al mismo, solicitando darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me despido atentamente.



Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
Jefe del Departamento de Hidráulica



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Alan Cosillo Pinto y Coordinador del Departamento de Hidráulica Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza, al trabajo de graduación del estudiante Didier Eduardo Fernández Alvarado CALIBRACIÓN DE UN MOLINETE DE ASPAS PARA LA REALIZACIÓN DE UN AFORO POR VADEO DE UN CAUCE PEQUEÑO da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
DIRECTOR
FACULTAD DE INGENIERÍA

Guatemala, febrero 2019

/mmm.

Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua



Universidad de San Carlos
de Guatemala

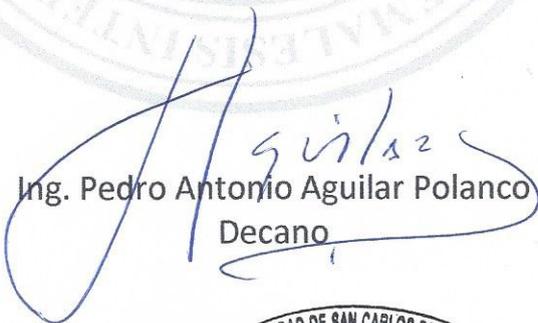


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 057.2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **CALIBRACIÓN DE UN MOLINETE DE ASPAS PARA LA REALIZACIÓN DE UN AFORO POR VADEO DE UN CAUCE PEQUEÑO**, presentado por el estudiante universitario: **Didier Eduardo Fernández Alvarado**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, febrero de 2019

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- | | |
|------------------------------|---|
| Dios | Por permitirme terminar mis estudios profesionales. |
| Mis padres y hermano | Mis padres Jorge Fernández y Glendy Alvarado, y mi hermano Jorge Alejandro Fernández, por darme la fuerza y el apoyo necesarios para seguir adelante y terminar mi carrera. |
| Mi familia | Por siempre mostrarme su cariño y apoyo durante mi carrera. |
| Mis primos y mi novia | Por su cariño, amistad y apoyo durante mi carrera. |

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por permitirme ser parte de esta gran institución académica y culminar mis estudios.

Facultad de Ingeniería

Por enseñarme lo necesario para poder ser un ingeniero profesional.

Mi asesor

Ing. Alan Cosillo, por ayudarme con el desarrollo de mi tesis.

**Laboratorio de
hidráulica**

A todo el personal encargado, por el apoyo en el desarrollo de mi tesis.

**Ing. Jorge Eduardo
Fernández Cardona**

Por su apoyo en la revisión de mi tesis.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. AFOROS	1
1.1. Selección del sitio de aforo.....	1
1.1.1. Ubicación.....	2
1.1.2. Acceso.....	2
1.1.3. Estructura	2
1.2. Medición de velocidades	3
1.2.1. Medidor tipo Woltmann.....	3
1.2.2. Medidor de hélice o propela	4
1.2.3. Medidor tipo turbina	5
1.2.4. Medidor tipo molinete	6
1.2.5. Medidor tipo molinete a calibrar en este estudio.....	7
1.3. Tipos de aforo.....	8
1.3.1. Aforo volumétrico.....	8
1.3.2. Orificios.....	10
1.3.3. Vertederos	12
1.3.4. Aforo con compuertas.....	15
1.3.5. Aforo con flotador	17
1.3.6. Aforadores de resalto	18

1.3.7.	Aforo con trazadores	19
1.3.8.	Aforo con limnímetros o limnógrafos	21
1.3.9.	Área-velocidad	23
1.3.10.	Aforo por vadeo	24
1.3.11.	Aforo con molinete	28
1.3.11.1.	Método de los cinco 5 puntos.....	30
1.3.11.2.	Método de 0,6 de la profundidad.....	30
2.	MOLINETES	33
2.1.	¿Qué es un molinete?	33
2.1.1.	Principio hidráulico	34
2.1.2.	Requerimientos de instalación física	34
2.2.	Tipos de molinetes	34
2.2.1.	Según su eje	35
2.2.1.1.	Eje vertical.....	35
2.2.1.2.	Eje horizontal.....	35
2.2.2.	Según su sistema de sujeción.....	36
2.2.2.1.	Sistema de barras	36
2.2.2.2.	Sistema de cable y contrapeso	37
2.2.2.3.	Sistema de torno y botalón.....	38
2.3.	Descripción del equipo	39
2.4.	Cálculo de caudales con molinetes (método por vadeo).....	43
2.4.1.	Método de la sección media.....	44
2.4.2.	Método de la semisección	45
3.	CALIBRACIÓN DE MOLINETE	49
3.1.	Calibración de la superficie de medición	52
3.2.	Toma de datos con molinete	60
3.3.	Método de calibración del molinete	63

3.3.1.	Determinación de la recta de ajuste por mínimos cuadrados	66
3.3.1.1.	Coeficiente de determinación	68
3.3.2.	Determinación de la recta de ajuste por medio de Excel.....	71
3.4.	Ecuación de ajuste para depósito aforador	73
4.	AFORO CON EL MOLINETE METODO POR VADEO	75
4.1.	Aforo en San Juan Gascón, río Pensativo.....	75
4.2.	Aforo en Alotenango II, río Guacalate	80
	CONCLUSIONES	87
	RECOMENDACIONES.....	89
	BIBLIOGRAFÍA.....	91
	ANEXOS.....	93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Medidor tipo Woltmann	4
2.	Medidor de hélice	5
3.	Medidor tipo turbina.....	6
4.	Molinete.....	7
5.	Molinete para calibrar	8
6.	Aforo volumétrico	10
7.	Aforo en orificios	11
8.	Ecuación de caudales para vertederos pared delgada	13
9.	Vertedero triangular.....	14
10.	Vertedero rectangular.....	14
11.	Vertedero trapezoidal	15
12.	Aforo con compuerta	16
13.	Aforo con flotador	18
14.	Aforador de resalto Parshall.....	19
15.	Aforo con trazadores	21
16.	Aforo con limnómetro y limnógrafo.....	22
17.	Estación limnigráfica	22
18.	Limnómetro estación Alotenango II, río Guacalate.....	23
19.	Aforo por vadeo.....	26
20.	Aforo con molinete, en Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.....	28
21.	Distribución de velocidades en una corriente	29
22.	Molinete de eje vertical.....	35

23.	Molinete de eje horizontal	36
24.	Molinete con sistema de barras	37
25.	Molinete, sistema de cable y contrapeso	38
26.	Molinete eje horizontal con hélices de bronce	39
27.	Hélice 1 a la izquierda y hélice 2 a la derecha	40
28.	Hélice para el molinete	40
29.	Barra que sostiene al molinete	41
30.	Contador de revoluciones de las hélices / a la izquierda Ing. Alan Cosillo y a la derecha Didier Fernández	42
31.	Interruptores del contador de revoluciones	43
32.	Método sección media	44
33.	Método de semisección	45
34.	Canal de calibración OTT Hydromet	51
35.	Canal de calibración de molinetes	52
36.	Canal Laboratorio de Hidráulica Facultad de Ingeniería	53
37.	Sistema para elevación de la pendiente en el canal	54
38.	Características de la bomba	55
39.	Bomba del canal Facultad de Ingeniería / a la izquierda Ing. Alan Cosillo y a la derecha Didier Fernández	56
40.	Vista superior externa del cisterna	57
41.	Piezómetro medidor en depósito aforador	58
42.	Depósito aforador Laboratorio Hidráulica / en la fotografía Didier Fernández	59
43.	Sistema de conteo de vueltas	61
44.	Instalación de hélices del molinete	62
45.	Gráfica velocidad de cauce versus velocidad hélice 1	65
46.	Gráfica velocidad de cauce versus velocidad hélice 2	65
47.	Curva de ajuste hélice 1 por Excel	71
48.	Curva de ajuste hélice 2 por Excel	72

49.	Ecuación de ajuste para depósito aforador	74
50.	Mapa de ubicación de aforo por vadeo, río Pensativo	76
51.	Lugar de realización del aforo	77
52.	Perfil del cauce.....	78
53.	Aforo del cauce en punto de aforo, río Pensativo / a la izquierda Ing. Jorge Fernández y a la derecha Didier Fernández	79
54.	Aforo en Estación Alotenango II, río Guacalate	81
55.	Limnímetros en estación de aforo Alotenango II	82
56.	Sección cauce en estación Alotenango II.....	83
57.	Método por vadeo en estación Alotenango II	83
58.	Método por vadeo en Alotenango II	84

TABLAS

I.	Datos para método por vadeo una lectura a 0,6 h	27
II.	Datos para método por vadeo tres lecturas	27
III.	Altura de molinete	33
IV.	Toma de datos aforo por vadeo	46
V.	Determinar el caudal en un aforo por vadeo	48
VI.	Ecuaciones de calibración de algunos molinetes	50
VII.	Calibración de superficie de medición.....	60
VIII.	Medición hélice 1	63
IX.	Medición hélice 2	63
X.	Velocidad del cauce VS velocidad hélice 1	64
XI.	Velocidad del cauce VS velocidad hélice 2	64
XII.	Promedio de velocidades	67
XIII.	Sumatorias de hélice 1 para encontrar b1 y b0	67
XIV.	Sumatorias de hélice 2 para encontrar b1 y b0.....	68
XV.	Ecuación final de ajuste	68

XVI.	Suma de cuadrados hélice 1	70
XVII.	Suma de cuadrados hélice 2	70
XVIII.	Coeficientes de determinación.....	70
XIX.	Datos aforos, río Pensativo.....	77
XX.	Caudal total, río Pensativo	80
XXI.	Datos medidos en estación Alotenango II.....	82
XXII.	Calculo del caudal en aforo Alotenango II	85
XXIII.	Aforos de Insivumeh en Alotenango II	85

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área o medida de la extensión de una superficie
Qp	Caudal de una sección parcial.
Q	Caudal o cantidad de volumen en movimiento en un tiempo determinado.
cm	Centímetro (Unidad de medida métrica para longitud).
r²	Coeficiente de determinación.
r1²(%)	Coeficiente de determinación de la primera hélice del molinete expresado en porcentaje.
r2²(%)	Coeficiente de determinación de la segunda hélice del molinete expresado en porcentaje.
C	Coeficiente de gasto de una compuerta hidráulica.
μ	Coeficiente de gasto de un vertedero hidráulico.
ds	Distancia horizontal entre dos puntos.
y1	Ecuación de la recta de ajuste de la hélice 1 del molinete.
y2	Ecuación de la recta de ajuste de la hélice 2 del molinete.
L	Litro (unidad de medida volumétrica).
L/s	Litros por segundo (unidad de medida de caudal).
B	Longitud de la base de menor dimensión de la sección transversal de un vertedero Cipolletti.
g	Medida de la aceleración de la gravedad de la Tierra.

hn	Medida de la altura del tirante de flujo en un punto específico.
H	Medida de la altura del tirante de flujo en un vertedero hidráulico.
h	Medida de la diferencia de alturas del tirante del flujo antes y después de una compuerta hidráulica.
hp	Medida de la altura promedio del tirante de un flujo de dos puntos contiguos.
m/s	Metros por segundo (Unidad de medida de velocidad).
m²	Metros cuadrados (Unidad de medida métrica para área).
m³/s	Metros cúbicos por segundo (Unidad de medida de caudal).
y	Representación de la variable dependiente en la ecuación de una recta.
x	Representación de la variable independiente en la ecuación de una recta.
Rev	Revoluciones (unidad de medida de distancia).
Rev/s	Revoluciones por segundo (unidad de medida de velocidad).
s	Segundo (unidad de medida de tiempo).
dm	Suma de las distancias medias horizontales entre un punto y los dos puntos a cada uno de sus costados.
SCE	Sumatoria de cuadrados debida al error.
SCT	Sumatoria de cuadrados total.
t	Tiempo.

rpm	Unidad de frecuencia que se usa para expresar velocidad angular. Número de rotaciones o vueltas por minuto alrededor de un eje.
b1	Valor de la pendiente de la recta de una gráfica.
b0	Valor de la variable dependiente en el cual la recta de una gráfica intersecta el eje de las ordenadas.
xi	Valor numérico de la variable independiente.
yi	Valor numérico de la variable dependiente.
\bar{x}	Valor promedio de todas las variables independientes.
\bar{y}	Valor promedio de todas las variables dependientes.
V	Velocidad.
vn	Velocidad de flujo en un punto.
vp	Velocidad promedio entre dos secciones de un flujo.
x1	Velocidad promedio de la hélice 1 del molinete.
x2	Velocidad promedio de la hélice 2 del molinete.
yc	Velocidad promedio del flujo.
Vol.	Volumen.

GLOSARIO

Aforo	Acción de aforar. Medición del caudal de una corriente.
Área transversal	Es el área de la superficie presentada por un corte perpendicular a la longitud de un cuerpo.
Calibración	La calibración es el proceso de comparar los valores obtenidos por un instrumento de medición con la medida correspondiente de un patrón de referencia.
Canal Parshall	Sistema aplicado para la medición de caudales en canales abiertos.
Carga	Medida específica de la presión del líquido por encima de una superficie de referencia.
Carrete bridado	Pieza cilíndrica con bridas a los costados para la unión de dos o más elementos similares.
Caudal	Cantidad de agua que transporta una corriente en un tiempo determinado.
Caudal parcial	Uno de varios caudales medidos.

Compuerta	Consta de una placa móvil que modifica el paso de un flujo y ayuda a determinar su caudal.
Ecuación lineal	Es una igualdad que involucra una o más variables a la primera potencia y no contiene productos entre las variables.
Gasto	Véase caudal.
Helicoidal	Que tiene forma de hélice.
Hidráulica	Parte de la mecánica que estudia el equilibrio y el movimiento de los fluidos.
Incógnita	Es un elemento constitutivo de una expresión matemática, donde se representa un valor desconocido.
Línea transversal	Es aquella que tiene la particularidad de atravesar, al menos, otra línea o más, real o imaginaria.
Ordenada	Distancia que hay, en un plano, entre un punto y un eje horizontal, medida en la dirección de un eje vertical.
Parámetro	Variable que aparece en una ecuación cuyo valor se fija a voluntad.

Pérdida de carga	Es la pérdida de presión que se produce en un fluido debido a la fricción de las partículas del fluido entre sí y contra las paredes del medio que las conduce.
Pérdida piezométrica	Pérdida de la presión de un fluido.
Piezómetro	Instrumento que se utiliza para medir la presión de poros o nivel del agua en perforaciones, estanques a presión, etc.
Propela	Mecanismo compuesto por varias palas o aspas ladeadas que al girar con fuerza alrededor de un eje desplazan el fluido en el que están.
Régimen de flujo	Clasificación de un flujo definida por la combinación del efecto de gravedad y del efecto de viscosidad.
Relación lineal	La relación que se produce cuando cantidades variables son directamente proporcionales entre sí.
Revolución	Una vuelta completa de un cuerpo giratorio.
Rotor	Componente que gira en una máquina eléctrica, sea ésta un motor o un generador eléctrico.
Sección transversal	Véase área transversal.
Tirante de flujo	Es la distancia vertical del punto más bajo de la sección del canal a la superficie libre del agua.

Trapezoidal	Que tiene forma de trapecio.
Válvula de compuerta	Es una válvula que abre mediante el levantamiento de una compuerta o cuchilla permitiendo así el paso del fluido.
Vertedero	Estructura hidráulica destinada a propiciar el pase, libre o controlado, del agua en los escurrimientos superficiales.
Vertedero de Cipolletti	Vertedero de pared delgada con una escotadura trapezoidal de base horizontal y lados con una inclinación hacia el exterior de una unidad en horizontal por cuatro en vertical.

RESUMEN

La medición de la rapidez y el caudal de un flujo con el uso del molinete es uno de los métodos más precisos en la actualidad. Esto debido a que, con una buena utilización del mismo, se pueden obtener medidas muy exactas en diferentes puntos del cauce en estudio. Lo que permite al final, obtener un conjunto de datos estos reducen considerablemente el porcentaje de error. Debido a que el mismo método toma en consideración muchos factores que influyen en la rapidez y por tanto en el caudal, como por ejemplo, la altura a la que se obtiene la medición del molinete a partir del fondo del flujo, la cual por cierto no es la misma en cada una de las alturas del mismo. Es por ello que la calibración de los molinetes forma parte fundamental de la precisión y exactitud que al final pueda tener dicho instrumento de medición.

El ingeniero Alan Cosillo Pinto se dio a la tarea de fabricar su propio molinete de hélice vertical, y fue necesario calibrar el mismo buscando obtener una excelente precisión. Dicho instrumento consta de tres hélices intercambiables, las cuales dos están hechas en Guatemala e inspiradas en hélices de barco. También se le instaló un sistema electrónico de conteo de revoluciones, fabricado por el estudiante de ingeniería eléctrica Julio Roberto Luna Reynoso. A continuación la descripción de la calibración del molinete y muchos otros factores y variables a tomar en cuenta cuando se realiza todo el procedimiento.

OBJETIVOS

General

Determinar el procedimiento para la calibración de un molinete de aspas.

Específicos

1. Analizar qué es un molinete de aspas y qué tipos existen.
2. Realizar un aforo por vadeo con un molinete de aspas.
3. Determinar la precisión del molinete de aspas ya calibrado.
4. Incentivar la investigación y desarrollo de herramientas e instrumentos útiles para cualquier tipo de medición.

INTRODUCCIÓN

Los molinetes son herramientas que sirven para aforar un cauce, pero en su mayoría ya vienen calibrados para su uso. En el presente caso se está calibrando un equipo nuevo diseñado y construido en Guatemala por el Ingeniero Alan Cosillo, también tiene incorporado un cuenta vueltas diseñado por dicho profesional. La calibración de este instrumento es el objetivo del presente trabajo de graduación.

La calibración es un procedimiento relativamente sencillo, aunque hay que tener en cuenta que se debe realizar de manera precisa, de esto dependerá la exactitud y la precisión que posea el molinete. Para comprobar esto se realizará una comprobación de los datos con un sistema de calibración por volumen en un canal donde se puede controlar el caudal del flujo.

Los datos obtenidos por ambos métodos se tabularán y compararán, obteniendo la precisión del mismo, tomando como referencia los datos obtenidos del sistema digital incorporado. El aforo por vadeo será el método utilizado ya que se cuenta con el equipo necesario y se buscará aprovecharlo al máximo.

1. AFOROS

Un aforo se realiza con la finalidad de medir el caudal de un líquido que pasa a través de una sección determinada de un canal o tubería. Existen diferentes métodos para su medición, los cuales dependen de las condiciones y características del canal y de la precisión requerida. Para realizar un buen aforo se debe de establecer ciertas condiciones en el tramo seleccionado del canal.

Para algunos tipos de aforos se hace necesario medir la velocidad de la corriente, esta se puede realizar por diferentes métodos y por diferentes instrumentos, entre los cuales se encuentran los molinetes. Estos molinetes a la vez poseen diferentes características dependiendo del tipo.

1.1. Selección del sitio de aforo

La calibración de secciones transversales en la mayoría de ocasiones se hace en un ambiente controlado para evitar que muchos factores físicos como el viento y el clima afecten los resultados finales. Para calibrar una sección transversal es necesario instalar una escala carga-gasto y el lugar en donde se realizará la medición debe reunir una serie de condiciones óptimas de hidráulica y operación del equipo a utilizar.

En cuanto a condiciones óptimas de hidráulica se refiere, la geometría de la sección a analizar debe ser constante, el flujo que circula debe ser de régimen normal y por último debe estar ubicada lo más lejano posible de otras estructuras que puedan provocar algún cambio al flujo de agua que circula.

Para elegir un tramo de aforo se deberá de cumplir con las condiciones óptimas del sitio en cuanto a ubicación, acceso, y presencia de estructuras.

1.1.1. Ubicación

De la ubicación depende el tipo de aforo que se vaya a realizar; las condiciones del lugar dan algunas limitantes para utilizar el equipo. El régimen de flujo de la ubicación debe ser normal. Para seleccionar una sección de aforo deben tenerse en cuenta algunos factores importantes, pero el más importante es tener la certeza de que la forma de la sección no cambia en el tiempo, es decir que se trata de un tramo de río o arroyo que no sufre socavación y no está en proceso de sedimentación.

1.1.2. Acceso

Lo más recomendable es que la estación de aforo se encuentre en lugares próximos y accesibles, en donde no se tenga ningún problema en transportar todo el equipo necesario para realizar nuestro aforo.

1.1.3. Estructura

Cuando exista una estructura sobre el cauce se deberá analizar si es posible utilizarla o prescindir de la misma debido a veces puede provocar remolinos o turbulencia en la corriente de agua.

Si se va seleccionar varios tramos de aforos se deberá verificar que todas las estaciones tengan características muy similares para evitar que los resultados finales tengan mucha discrepancia.

1.2. Medición de velocidades

Los métodos de medición de corrientes más comunes y prácticos de utilizar son los medidores de velocidad, que son instrumentos creados para obtener la rapidez de un cauce en relación a la toma de datos, directamente de la corriente que se está analizando.

Antes de utilizar cualquier instrumento de medición es necesario saber qué tipo de medidor de velocidad se va a utilizar. Para ello se debe tomar en cuenta una serie de factores importantes que influirán en los resultados finales. El error más común en el que se incurre es pensar que el aparato que se va utilizar debe tomar en cuenta únicamente las dimensiones de la sección a analizar, pero esto no es así, se deben tomar en cuenta también otros factores como la exactitud, el rango de caudales, pérdidas piezométricas en el flujo, el costo, el mantenimiento, etc.

1.2.1. Medidor tipo Woltmann

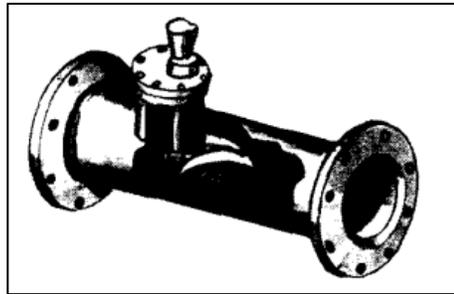
Es un medidor de hélice que posee una elevada precisión con una pérdida de carga muy pequeña, teniendo siempre el cuidado de instalarlo de manera correcta y escoger el sitio adecuado para que el mismo pueda operar de manera óptima. Sin embargo tiene piezas especiales en los costados que ocasionan pequeñas turbulencias en la corriente por lo que afecta un poco la precisión del medidor.

Existen dos tipos: el horizontal y el vertical. Estos medidores cuentan con una turbina tipo helicoidal, poseen diámetros desde dos pulgadas hasta veinte pulgadas, van dentro de un carrete bridado, pueden operar con una

temperatura máxima de cuarenta grados centígrados y no soportan presiones mayores a diez kilogramos por centímetro cuadrado.

Se recomienda utilizarlo en flujos con bajo contenido de sólidos en suspensión.

Figura 1. **Medidor tipo Woltmann**

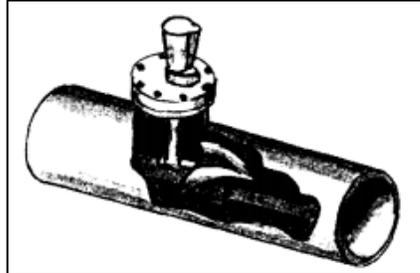


Fuente: RUÍZ APARICIO, Ángel. *Medidores de velocidad (hélice, turbina y molinete)*. p. 4.

1.2.2. Medidor de hélice o propela

Es un medidor que consta de aspas, una caja sellada y la cabeza del medidor, junto con un registro y una caja de acoplamiento local para conectar, si se requiere, un equipo de medición extra.

Figura 2. **Medidor de hélice**



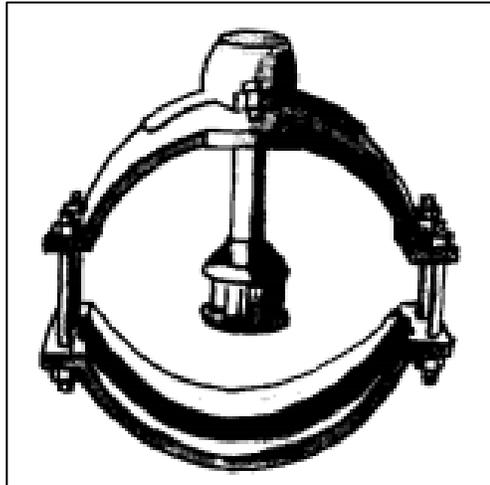
Fuente: RUÍZ APARICIO, Ángel. *Medidores de velocidad (hélice, turbina y molinete)*. p. 4.

1.2.3. Medidor tipo turbina

Este medidor posee una variante de los demás instrumentos, posee un sensor de la velocidad del agua conformado por una rueda en forma de turbina y funciona con el mismo principio que el medidor de hélice. Este medidor relaciona el empuje que provoca la corriente con el número de vueltas que cuenta el sensor.

Este aparato cuenta con un rotor, la transmisión puede ser mecánica o magnética y su señal puede ser local o remota.

Figura 3. **Medidor tipo turbina**



Fuente: RUÍZ APARICIO, Ángel. *Medidores de velocidad (hélice, turbina y molinete)*. p. 5.

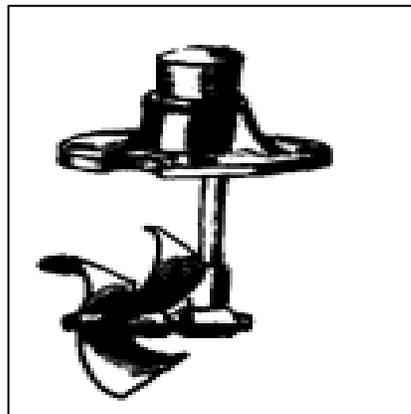
1.2.4. Medidor tipo molinete

Este medidor puede utilizarse tanto en conducciones a presión como en conductos a superficie libre. Al igual que el medidor de hélice, relaciona las vueltas que da una rueda provista de una especie de conos o copas con la velocidad del cauce que se está analizando.

El funcionamiento de este medidor es un poco complejo, la rueda que lleva posee unas copas, que al chocar con el agua, ejerce una fuerza que ocasiona un movimiento de rotación, siendo directamente proporcional a la velocidad del agua. Al conocer el número de revoluciones y el tiempo en darlas, se determina la velocidad del flujo con la ayuda de una tabla de calibración específica para cada molinete que no está configurado de la misma manera.

La determinación de la velocidad con este medidor se realiza escuchando las revoluciones a través de pulsos que se pueden escuchar a través de una especie de auriculares, cada pulso significa una determinada cantidad de revoluciones según como este calibrado el molinete.

Figura 4. **Molinete**



Fuente: RUÍZ APARICIO, Ángel. *Medidores de velocidad (hélice, turbina y molinete)*. p. 5.

1.2.5. Medidor tipo molinete a calibrar en este estudio

En el presente trabajo de graduación se estará calibrando un medidor tipo molinete de eje horizontal, que fue fabricado por el Ingeniero Alan Cosillo. Se calibrarán dos hélices, una elaborada en el país y otra de bronce utilizado por embarcaciones a escala y adaptadas a este molinete. La calibración se hace necesaria para determinar las características del instrumento y poder dar datos de velocidad en forma precisa.

Figura 5. **Molinete para calibrar**



Fuente: elaboración propia.

1.3. Tipos de aforo

Existen muchos métodos de aforo muy funcionales y prácticos, unos más que otros. El tipo dependerá del volumen a medir, de la exactitud y precisión que busquemos y de las condiciones bajo las cuales se busca medir los caudales en el cauce.

1.3.1. Aforo volumétrico

Este método es de los más sencillos, pues solo se necesita saber el tiempo en que un curso de agua tarda en llenar un recipiente de volumen conocido y posteriormente utilizar la fórmula básica del caudal.

$$Q = \frac{Vol.}{t} \quad [Ec. 1.1]$$

Donde:

Vol. = volumen en m³

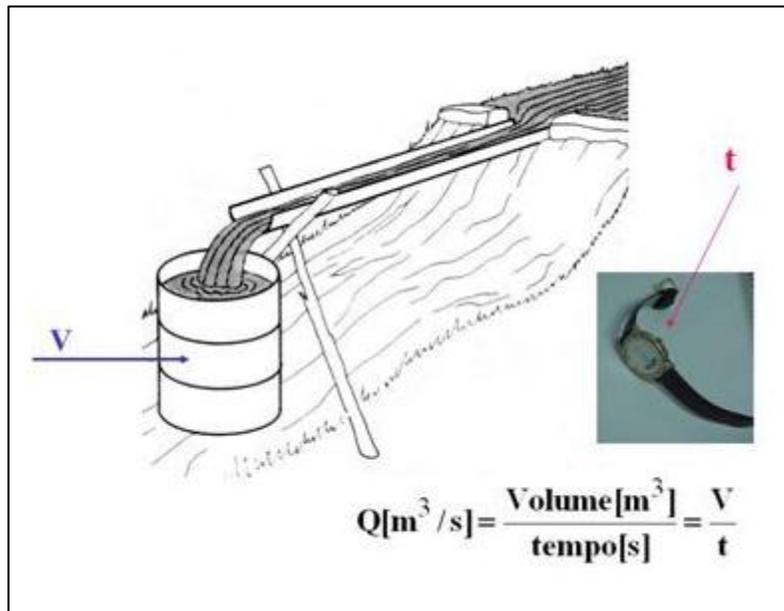
t = tiempo en segundos

Q = caudal en m³/segundo

Hay que tomar en cuenta que mientras más grande sea el depósito en donde se realizará el aforo, la prueba será más precisa. Es recomendable que el nivel del agua suba lentamente para determinar exactamente el momento en que se llena, además es mejor utilizar tiempos mayores a los sesenta segundos.

Este tipo de aforos se utilizan generalmente en ensayos de bombeo, de perforaciones o de pozos para determinar el rendimiento de los mismos. También se utiliza para aforar los nacimientos de agua para abastecimiento de poblaciones. Es muy importante también un suelo firme y nivelado para que se pueda determinar exactamente cuando el recipiente fue llenado en su totalidad.

Figura 6. **Aforo volumétrico**



Fuente: *Aforo volumétrico*. <https://www.google.com.gt/search?q=aforo+volumetrico>. Consulta: 8 de agosto de 2018.

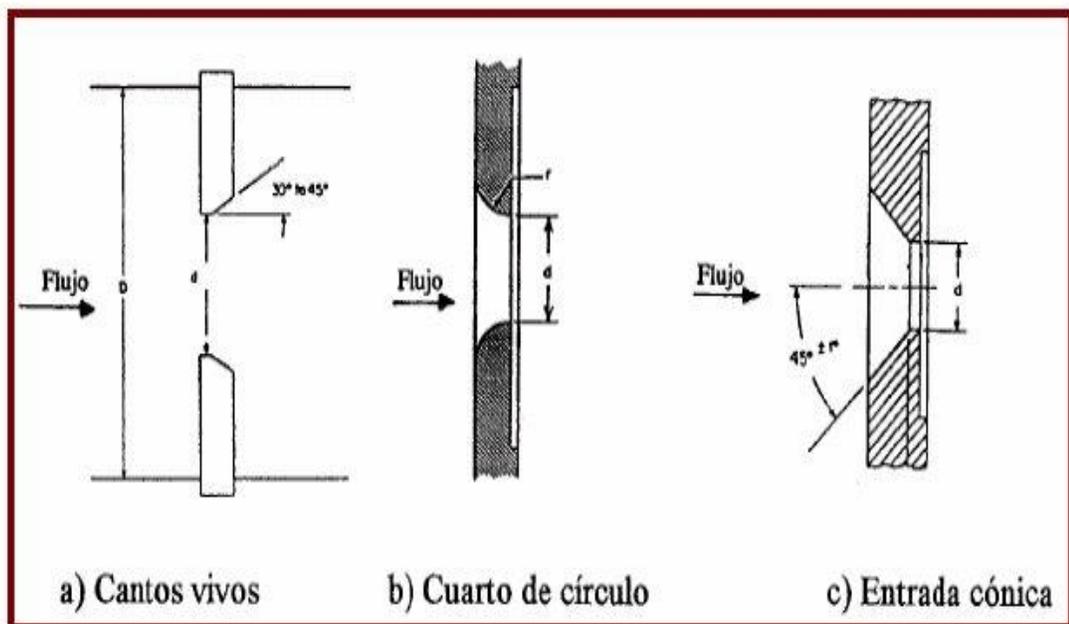
1.3.2. **Orificios**

Son perforaciones de forma regular y perímetro cerrado, colocados por debajo de la superficie libre del agua en depósitos o almacenamientos, tanques, canales o tuberías.

El objetivo del orificio es descargar un caudal que se desea calcular, suponiendo que el nivel del fluido en el recipiente permanece constante por efecto de la entrada de un caudal idéntico al que sale; o bien porque posea un volumen muy grande. Además, el único contacto entre el líquido y la pared debe ser una arista biselada; esto es, el orificio de pared delgada.

La clasificación se realiza de acuerdo a las condiciones de trabajo, es decir, descargando libremente, ahogados parcialmente o sumergidos o a presión en el interior de una tubería. De la misma manera la clasificación puede realizarse de acuerdo con su forma, circular, cuadrada, rectangular, etcétera.

Figura 7. **Aforo en orificios**



Fuente: *Aforos en orificios*. <https://www.google.com.gt/search?q=imagenes+aforos+en+orificios>.
 Consulta: 29 de julio de 2018.

Caudal a partir de orificios

$$Q = CA(2gh)^{\frac{1}{2}} \quad [\text{Ec. 1.2}]$$

Donde:

Q = caudal (m³/s)

C = coeficiente

A = área (m²)

g = gravedad (m/s²)

h = tirante de agua (m)

1.3.3. Vertederos

Pueden ser de cresta ancha o delgada y pueden trabajar en flujo de descarga libre, sumergido, ahogada. La ecuación general de los vertederos es:

$$Q = K L H N \quad [\text{Ec. 1.3}]$$

Donde:

Q = caudal (m³/s)

K, N = coeficiente

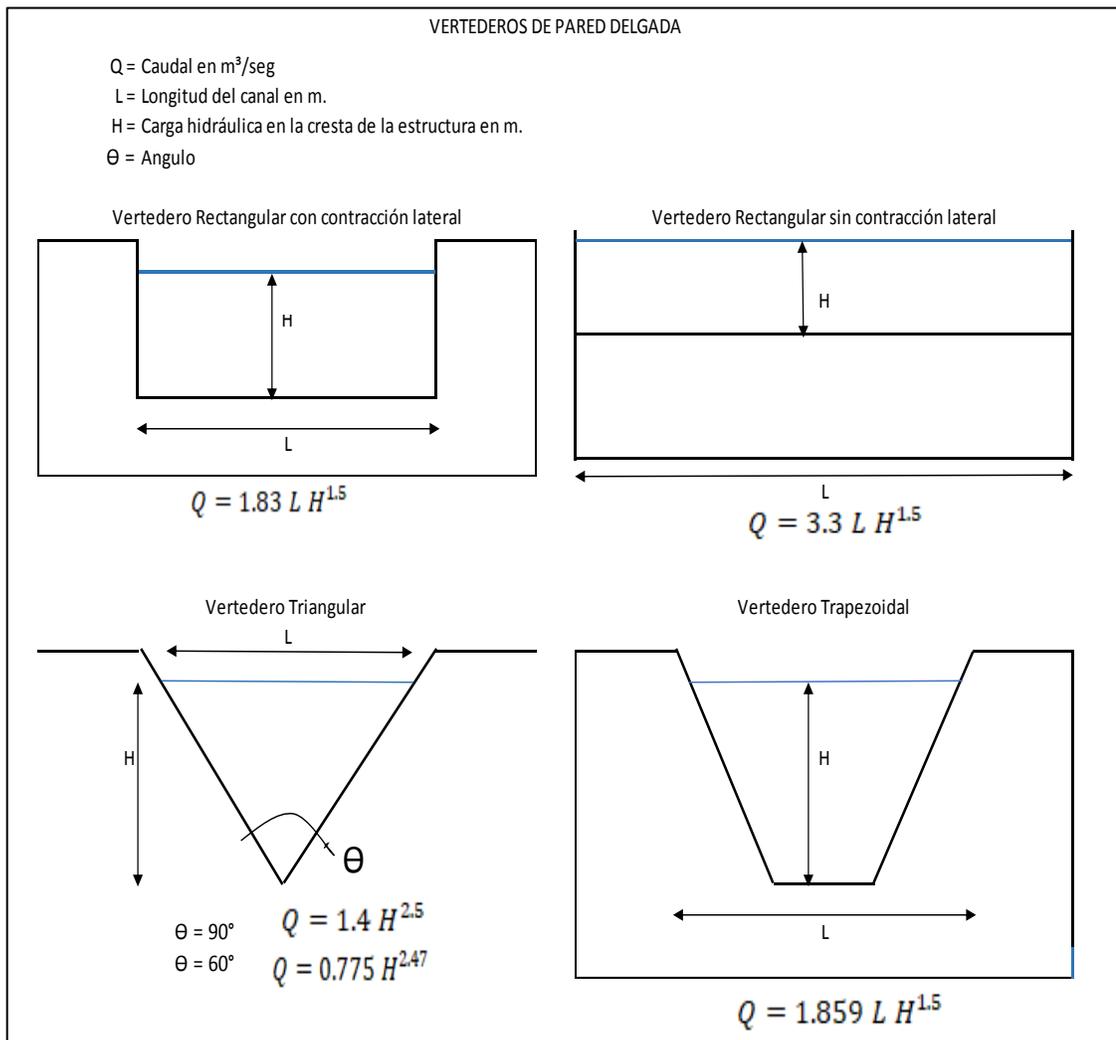
L = longitud de cresta (m)

H = tirante de agua (m)

Son muy comunes en la actualidad, pueden ser de diferentes formas y tamaños. Debido a su simplicidad son los más usados en el área agrícola, en riego específicamente. Básicamente es una sección transversal de área conocida sobre la cual pasa un flujo de agua.

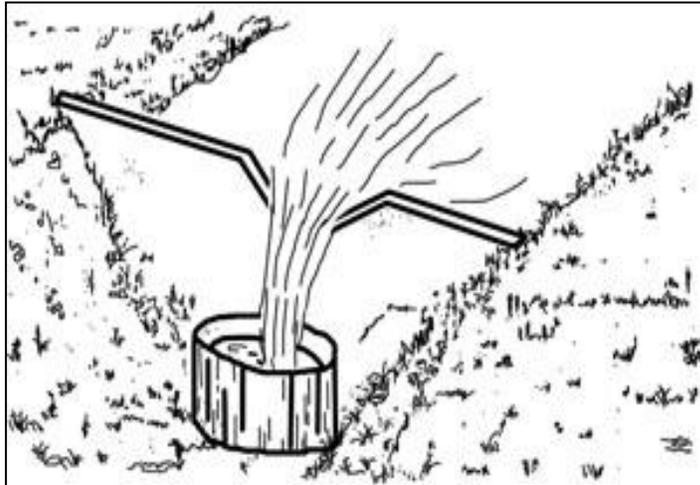
Existen varias formas de vertederos, los más comunes son rectangulares, triangulares y trapezoidales. Este último el más utilizado llamado también vertedero de Cipoletti.

Figura 8. Ecuación de caudales para vertederos pared delgada



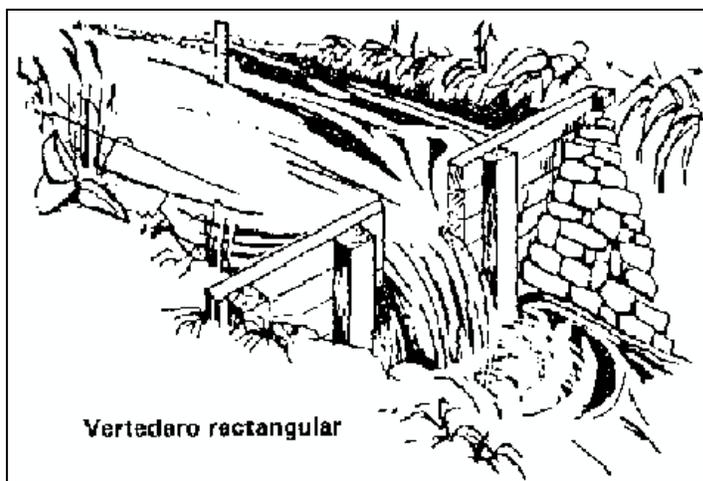
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Figura 9. **Vertedero triangular**



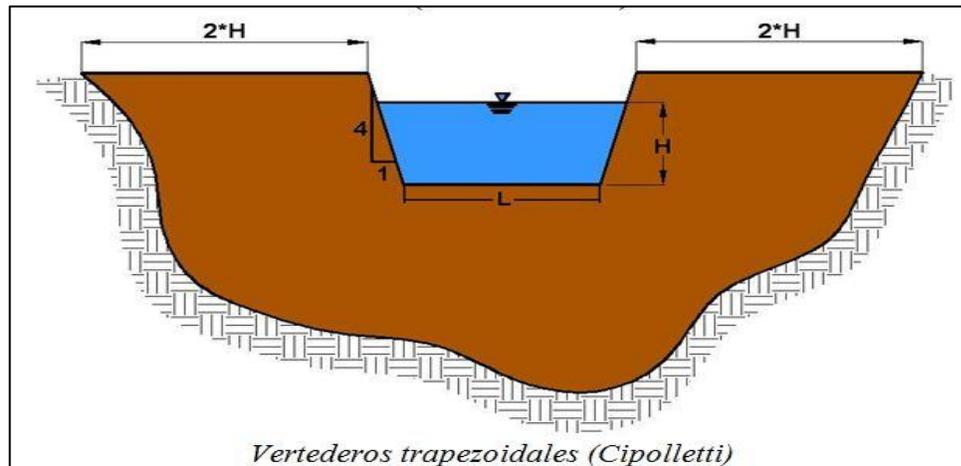
Fuente: *Guía de orientación en saneamiento básico para alcaldías de municipios rurales y pequeñas comunidades*. <https://www.google.com.gt/search?q=imagenes+de+aforos>. Consulta: 29 de julio de 2018.

Figura 10. **Vertedero rectangular**



Fuente: Neet Escuela. *Vertederos hidráulicos*. <https://neetescuela.org/vertederos-hidraulicos/>. Consulta: 29 de julio de 2018.

Figura 11. **Vertedero trapezoidal**



Fuente: Universidad técnica de Manabí. *Tumbaco*. <http://jorge-tumbaco.blogspot.com/2016/>.

Consulta: 29 de julio de 2018.

1.3.4. **Aforo con compuertas**

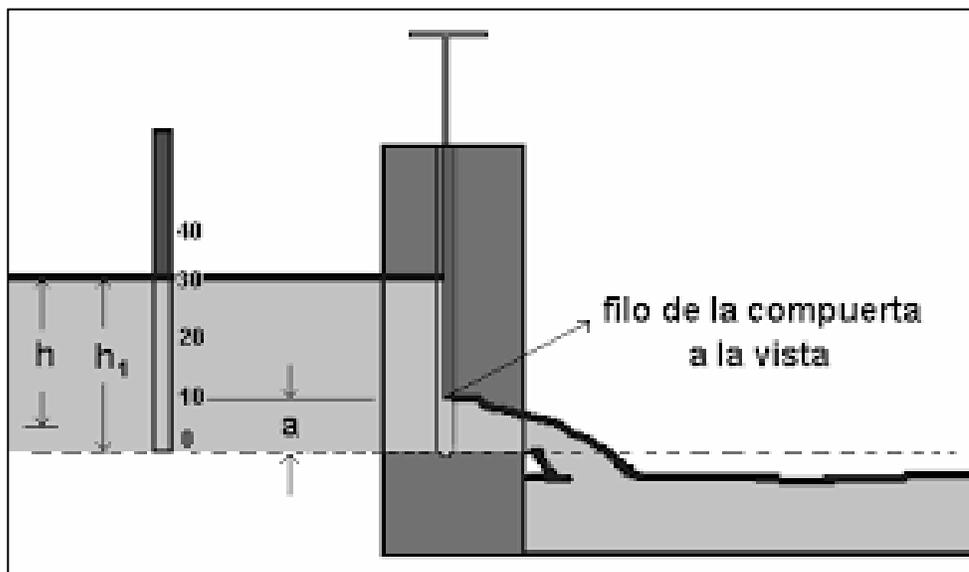
Consiste de una placa móvil, plana o curva, que al levantarse permite medir el caudal que atraviesa cualquier obra hidráulica de gran envergadura, a la vez que regula la descarga producida.

Tiene una abertura que se hace entre el piso de un canal y el borde inferior de la compuerta, por lo que su ancho coincide con el del canal para que el flujo pueda considerarse bidimensional. El caudal de una compuerta y las características hidráulicas de su descarga se pueden conocer a partir de cualquier método de aforo. Las diferentes formas de las compuertas dependen de su aplicación, el tipo de compuerta a utilizar dependerá principalmente del tamaño y forma de la abertura, de la carga estática, del espacio disponible, del mecanismo de apertura y de las condiciones particulares de operación.

Para aforar de esta manera es necesario saber la velocidad con que pasa el flujo a través de la compuerta. Esta rapidez depende de la carga o altura de agua y para ello debemos determinar si la compuerta trabaja libre o sumergida

Una compuerta trabaja libre cuando el nivel de la superficie del flujo de salida es menor que el punto más bajo de la apertura de la misma. Y es de manera contraria, si trabaja de manera sumergida, el nivel del agua en la salida es superior al nivel inferior de la compuerta.

Figura 12. **Aforo con compuerta**



Fuente: *Aforo con compuerta*. <https://www.google.com.gt/search?q=imagenes+de+aforos>.

Consulta: 29 de julio de 2018.

La fórmula básica para calcular el caudal es determinando la velocidad y luego aplicando la Ecuación 1.6:

$$V = C * \sqrt{2 * g * h} \quad [\text{Ec. 1.4}]$$

Donde:

C = constante

G = gravedad

h = altura

1.3.5. Aforo con flotador

Este método se utiliza cuando no se dispone de equipos de medición; para medir la velocidad del agua, se usa un flotador y con él se mide la velocidad superficial del agua; pudiendo utilizarse como flotador, un pequeño pedazo de madera, corcho o una pequeña botella lastrada.

$$Q = C \times A \times v \quad [\text{Ec. 1.5}]$$

Donde:

C: factor de corrección

v : velocidad = e / t (m / seg)

e : espacio recorrido por el flotador (m)

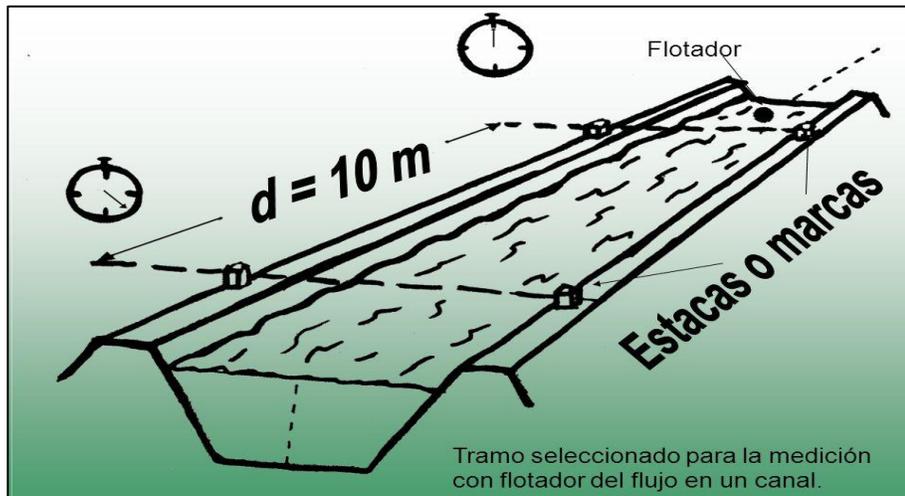
t : tiempo de recorrido del espacio «e» por el flotador (seg)

A : área de la sección transversal (m²)

Q : caudal (m³/seg)

Los valores de caudal obtenidos por medio de este método son aproximados, por lo que requieren ser reajustados por medio de factores empíricos de corrección (C), que dependen del tipo de arroyo y del tipo de precisión que se requiera.

Figura 13. Aforo con flotador



Fuente: Flotador. <https://www.google.com.gt/search?q=aforo+con+flotador>. Consulta: 29 de julio de 2018.

1.3.6. Aforadores de resalto

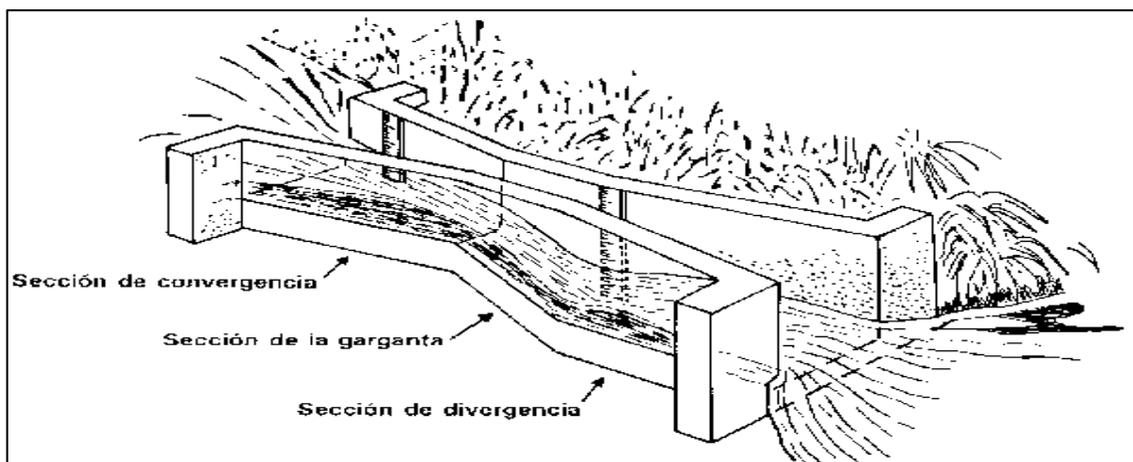
El más común es el canal Parshall, debido a que no se ve afectado por muchos factores tales como los sedimentos o por la velocidad del cauce que se está midiendo.

Es una canaleta que sigue el principio de Venturi para el aforo del flujo en canales abiertos (donde se provoca la contracción hay mayor velocidad del agua y menor altura de la misma), constituida por tres secciones principales:

Una sección convergente o de contracción, localizada en su extremo aguas arriba, que conduce a una sección contraída o garganta (de ancho W) y una última sección divergente o de expansión aguas abajo siendo sus paredes en los tres casos verticales.

Este tipo de estructuras funciona muy bien tanto para caudales grandes (canales principales) como para acequias, estando las dimensiones estandarizadas por tablas con cada una de sus secciones. Una ventaja decisiva de la canaleta Parshall consiste en la posibilidad que trabaje con mínima pérdida de carga. Esto hace que se pueda emplear en canales relativamente poco profundos con pendiente escasa (para darse una idea, esta canaleta requiere 4 veces menos diferencia de altura de agua que un vertedero).

Figura 14. **Aforador de resalto Parshall**



Fuente: Dibujado a partir de Scott y Houston 1959.

<http://www.fao.org/docrep/T0848S/t0848s06.htm>. Consulta: 29 de julio de 2018.

1.3.7. **Aforo con trazadores**

Los trazadores pueden ser de tres tipos, químicos, fluorescentes y radiactivos. Esta técnica se usa cuando no se puede aplicar otros métodos más convencionales sobre todo en corrientes muy anchas o en ríos torrenciales.

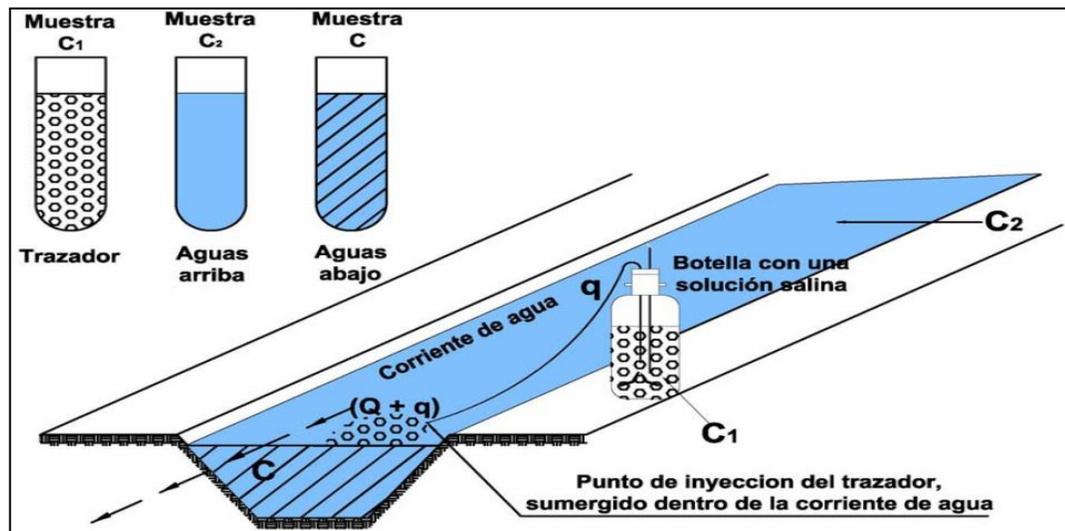
Los Químicos más utilizados como trazadores son la sal común y el dicromato de sodio, Entre los fluorescentes el más usado es la rodamina y entre los materiales radioactivos el yodo 132, bromo 82 y el sodio son los más comunes.

En Proyectos y apuntes teórico-prácticos de Ingeniera Civil se indica que la sal común puede detectarse con un error de 1 % para concentraciones de 10 ppm (partes por millón), el dicromato de sodio puede detectarse a concentraciones 0,2 ppm y los trazadores fluorescentes con concentraciones de 1/1011. Se indica también que los trazadores radioactivos se detectan en concentraciones muy bajas de 1/1014. Su utilización requiere personal muy especializado debido a la manipulación especial de los trazadores.

Los trazadores se implementan de dos maneras, Inyectando rápidamente un volumen de trazador, método conocido como de integración o inyectando a caudal constante.

El método consiste en agregar el trazador durante un tiempo determinado al flujo en estudio. Posteriormente se toman muestras aguas abajo en donde se considere que el trazador se haya disuelto, para determinar la cantidad del mismo por unidad de volumen.

Figura 15. Aforo con trazadores



Fuente: La cueva del ingeniero civil. *Métodos de aforo*.

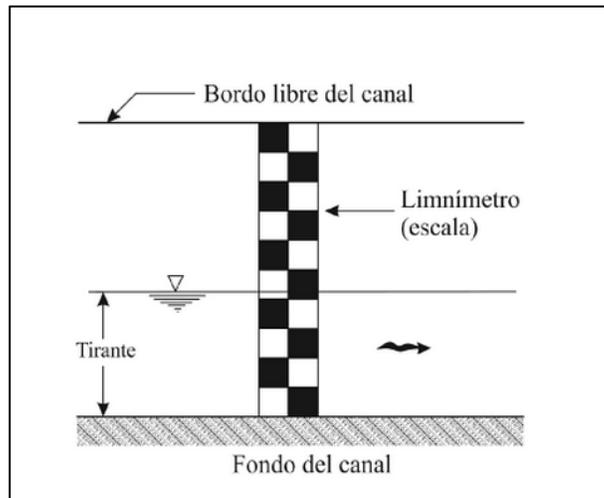
<https://www.cuevadelcivil.com/2011/02/metodos-de-aforo-directo.html>. Consulta: 29 de julio de 2018.

1.3.8. Aforo con limnímetros o limnógrafos

Es una escala, generalmente graduada en centímetros, que se encuentra en una de las paredes del cauce, esta puede ser de cemento. En la misma se determina la altura del tirante del flujo y se obtiene así el caudal.

Previamente se calibra realizando mediciones con un molinete durante todo el año en épocas de estiaje y de avenidas a diferentes alturas y puntos, cada vez que se realiza una medición se toma la altura del tirante para posteriormente solo visualizar la misma en el limnómetro y determinar así el caudal.

Figura 16. **Aforo con limnómetro y limnógrafo**



Fuente: *Limnómetro*. <https://www.emaze.com/@ALTQFTLI/LIMNIMETRO>. Consulta: 8 de agosto de 2018.

Figura 17. **Estación limnigráfica**



Fuente: *Aforo*. <https://www.google.com.gt/search?q=aforo+con+limn>. Consulta: 29 de julio de 2018.

Figura 18. **Limnómetro estación Alotenango II, río Guacalate**



Fuente: elaboración propia.

1.3.9. Área-velocidad

Es uno de los métodos más utilizados; para determinar el caudal se requiere medir el área de la sección transversal del flujo de agua y la velocidad media, se aplica la siguiente fórmula:

$$Q = A \times V \quad [\text{Ec. 1.6}]$$

Donde:

Q = caudal del agua (m³/seg)

A = área de la sección transversal (m²)

V = velocidad media del agua (m/seg)

Generalmente, el caudal (Q) se expresa en litros por segundo (l / s) o metros cúbicos por segundo (m³/seg).

La dificultad principal es determinar la velocidad media porque varía en los diferentes puntos de la sección hidráulica. Generalmente se utiliza la ecuación de Manning como una de las más aceptadas por los ingenieros.

$$V = \frac{1}{n} * R_h^{2/3} * S^{1/2} \quad [\text{Ec. 1.7}]$$

Donde:

R_h = radio hidráulico

S = pendiente en porcentaje

n = coeficiente de rugosidad de Manning

1.3.10. Aforo por vadeo

Se lo utiliza en ríos de escasa profundidad y velocidad, y casi siempre en canales y acequias. El equipo utilizado normalmente es un molinete suspendido por barra. Es un método muy recomendado porque permite que el operador, una vez que identificó el punto de medición, puede recorrer y detectar cualquier cambio del fondo al detalle, aunque el agua sea turbia.

Para determinar la distancia horizontal se tiende una cinta métrica común de margen a margen, de tal manera que el aforador, donde considere necesario, ubique la vertical directamente leyendo de la cinta (es la progresiva de esa vertical): Por convención, y para uniformizar criterios, se afora desde la margen izquierda (M.I.) hacia la margen derecha (M.D.). Se las identifica en terreno mirando hacia aguas abajo.

Para efectuar correctamente esta operación se debe tratar de:

- Orientar bien el molinete.
- Determinar con cuidado las distancias horizontales (controlar que esté bien tensa la cinta métrica).
- Que la barra no se hunda en el fondo y que se mantenga la verticalidad.
- Situarse lo más lejos posible del molinete (hacia aguas abajo y a un costado de la hélice) para que no se distorsione la corriente de agua.

Lo conveniente es que sea un equipo de 2 personas y como máximo 3. Uno o dos que vadeen con el aparato y el otro que vaya anotando en una planilla de aforos por cada vertical: la progresiva, la profundidad y los datos que arroje el molinete (revoluciones y tiempos), de acuerdo al método de lectura elegido.

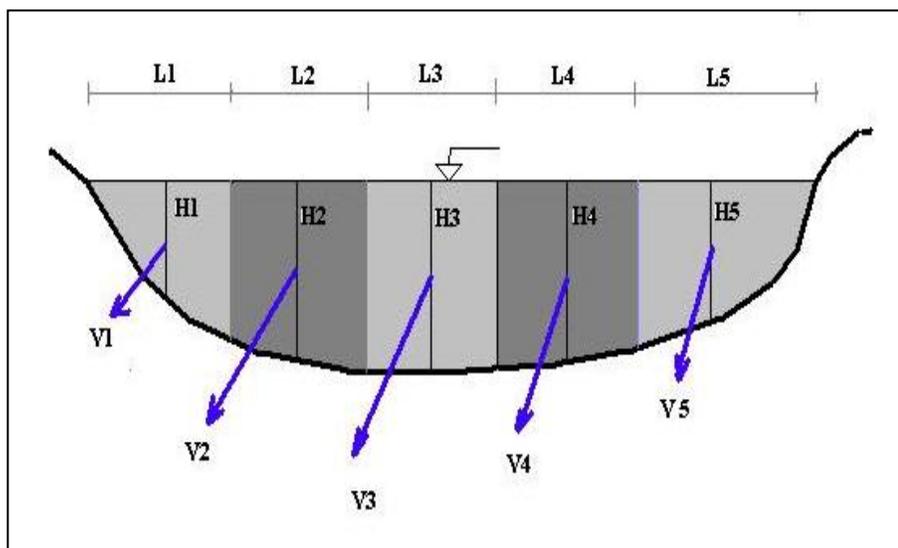
La velocidad media es el valor único medido o el valor promedio de las dos velocidades observadas en cada estación. En ambas orillas del río (estaciones en los extremos) se utiliza $1/3$ de la velocidad registrada en las estaciones adyacentes.

El ancho correspondiente a cada estación es la diferencia entre las distancias a los puntos medios entre cada estación, con excepción de los extremos donde se utiliza el punto medio entre la estación adyacente y la estación de la orilla. Al final la suma de todos los anchos debe ser igual al espejo o ancho total de la sección transversal del río.

El área de cada sección es igual a la profundidad multiplicada por el ancho. En las orillas sin profundidad se utiliza la mitad de la profundidad de la estación adyacente.

El caudal en cada sección es el producto del área por la velocidad media y el caudal total será la sumatoria de los caudales encontrados en cada sección.

Figura 19. **Aforo por vadeo**



Fuente: *Aforos*. <https://www.google.com.gt/search?q=imagenes+de+aforos>. Consulta: 25 de febrero de 2018.

El procedimiento matemático para el cálculo por este método se realiza en el capítulo 2, sección 2.6.2 donde ya se toma en cuenta el aforo midiendo las velocidades utilizando un molinete. La tabla que se debe utilizar para la toma de datos en un aforo por vadeo es la siguiente.

Para solamente una lectura a 0,6 h.

Tabla I. **Datos para método por vadeo una lectura a 0,6 h**

Estación	Distancia m	Profundidad h m	0,6 h m	Revoluciones cantidad	Tiempo seg
1	0				
n	n				

Fuente: elaboración propia.

Para tres lecturas a 0,2 h, 0,6 h y a 0,8 h.

Tabla II. **Datos para método por vadeo tres lecturas**

Estación	Distancia	Profundidad h m	0,2 h	Revoluciones Cantidad	Tiempo
			0,6 h		
	m		0,8 h		seg
1	0				
2					
3					
n	n				

Fuente: elaboración propia.

1.3.11. Aforo con molinete

Al hacer uso del molinete hidrométrico para determinar la velocidad en distintos puntos de la sección, permite lograr la mejor aproximación a los valores reales de este parámetro.

El equipo de medición cuenta las revoluciones que efectúa una hélice al sumergirla en la corriente a una profundidad prefijada. Midiendo el tiempo de trabajo de la hélice en cada punto se obtiene un valor de revoluciones/seg que a través de una ecuación de calibración permite obtener la velocidad en m/seg.

Figura 20. **Aforo con molinete, en Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

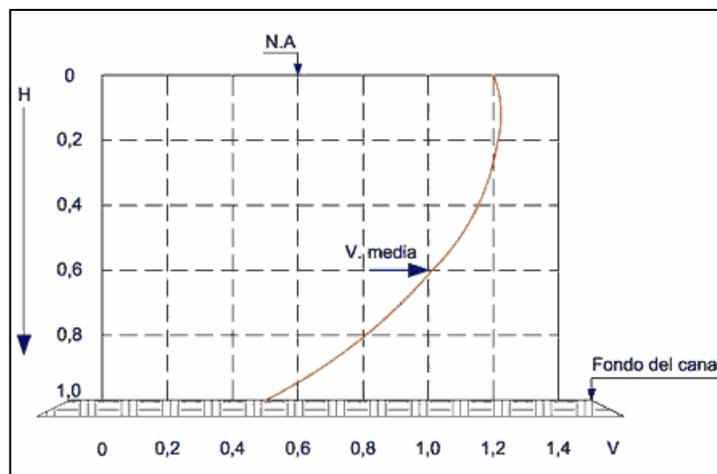
El procedimiento de medición consiste en:

Determinar sobre la sección de aforos una línea transversal al escurrimiento, materializada con un cable tensado de ambos extremos. A partir de la línea transversal determinar las verticales de medición separadas a distancias generalmente regulares entre sí.

Luego se mide en varios puntos de cada vertical la velocidad de la corriente utilizando el molinete hidrométrico y desarrollando este procedimiento hasta completar la sección total de medición.

Debe luego calcularse la velocidad media en cada vertical aplicando los dos criterios mencionados, partiendo de la concepción general de que la distribución de la velocidad en una vertical adopta gráficamente forma parabólica con valores decrecientes hacia el fondo del cauce.

Figura 21. **Distribución de velocidades en una corriente**



Fuente: Distribución de velocidad en canales. <https://www.google.com.gt/search?q=distribucion+de+velocidades+en+canales>. Consulta: 8 de agosto de 2018.

La profundidad en cada vertical se identifica con h y las mediciones se hacen en fracciones de la profundidad total, tomándolas desde la superficie hacia el fondo.

1.3.11.1. Método de los cinco 5 puntos

Se utiliza cuando la distribución de velocidades es muy irregular porque da muy buenos resultados. Se basa en tomar las mediciones de velocidad en los siguientes puntos:

- Lo más cerca posible de la superficie (V_s)
- A 0,2 ($V_{0,2}$), a 0,6 ($V_{0,6}$), y a 0,8 ($V_{0,8}$) de la profundidad total h
- En el fondo (V_f)

La Velocidad media V_m se calcula de la siguiente manera:

$$V_m = \frac{V_s + 3 V_{0,2} + 2 V_{0,6} + V_f}{10} \quad [\text{Ec. 1.8}]$$

1.3.11.2. Método de 0,6 de la profundidad

En este caso se admite que la velocidad medida al 60 % de la profundidad (0,6 h) es igual a la velocidad media en la vertical. Este método se emplea cuando hay bajas profundidades, cuando no hay tiempo para efectuar más mediciones, crecidas de rápida evolución o debido a obstrucciones que no permiten variar la profundidad de medición.

Para calcular el caudal se divide la sección de aforo en subsecciones que tienen por profundidad la de la vertical considerada y como ancho la suma de la mitad de la distancia (semidistancia), a las verticales adyacentes:

$$Q_i = V_i h_i \left[\frac{b_{i-1}}{2} + \frac{b_{i+1}}{2} \right] \quad [\text{Ec. 1.9}]$$

$$Q = \sum Q_i \quad [\text{Ec. 1.10}]$$

Las velocidades se determinan de acuerdo a la ecuación de calibración del molinete, las cuales se determinarán en el capítulo 3. La ecuación para el cálculo de la velocidad tiene la forma de la recta.

$$v = m * rps + b \quad [\text{Ec. 1.11}]$$

Donde:

V = velocidad

m = pendiente de la recta

rps = revoluciones por segundo de las hélices del molinete

b = intercepto sobre eje y

2. MOLINETES

2.1. ¿Qué es un molinete?

Instrumento utilizado para medir la velocidad del agua que consta de una serie de aspas que giran en torno a un eje horizontal o vertical, este proporciona un número de revoluciones en un tiempo determinado.

Están básicamente compuestos por: una hélice o rotor, un interruptor mecánico eléctrico, un sistema de señal acústico-sonoro o eléctrico-digital y un sistema de sujeción. Cada molinete debe poseer un certificado de calibración en este se encuentra la fórmula para determinar la velocidad de un cauce y los mismos son calibrados en laboratorios especiales de hidráulica.

Es recomendable realizar mediciones en diferentes puntos del flujo y a diferentes profundidades, por lo que la siguiente tabla puede dar una idea de cómo realizar las mediciones.

Tabla III. **Altura de molinete**

Tirante de agua "Ta" (cm)	Profundidad del molinete
Ta < 15	Ta / 2
15 < Ta < 45	0,6Ta
Ta > 45	0,2Ta y 0,8Ta o 0,2Ta, 0,6Ta y 0,8Ta

Fuente: Ministerio de Agricultura. *Manual de hidrometría*. p. 6.

Existen dos tipos de molinetes según su eje: eje vertical y el de eje horizontal. Según su sistema de sujeción estos pueden ser: de barras, cable y contrapeso o torno y botalón.

2.1.1. Principio hidráulico

El molinete se fundamenta en la expresión de la ecuación 1.6. Pero en el caso de los molinetes la velocidad se determina en distintos puntos trabajando sobre la misma sección transversal. Este instrumento contabiliza las revoluciones de la hélice al ser sumergida en el flujo de agua. La velocidad se obtiene mediante la realización de una curva de calibración, esta relaciona las revoluciones que realiza por cada segundo contra la velocidad.

2.1.2. Requerimientos de instalación física

Se deberá tener un área libre de turbulencias que puedan afectar el resultado de la medición de las revoluciones. El sistema de sujeción del molinete deberá estar lo más fijo posible, ya que con una pequeña inclinación del mismo los resultados finales varían y el molinete perderá su precisión.

El operador que manejará el equipo debe estar lo suficientemente capacitado para colocar los instrumentos de manera correcta, también necesitará de la ayuda de más personal debido a que se necesita utilizar múltiples instrumentos de medición.

2.2. Tipos de molinetes

A continuación se describen los tipos de molinete que se pueden utilizar.

2.2.1. Según su eje

A continuación, se describen los molinetes según su eje.

2.2.1.1. Eje vertical

Estos molinetes operan a velocidades más bajas, las aspas están mejor protegidas contra agua con muchos residuos sólidos. También el rotor se puede reparar en campo sin afectar la calibración.

Figura 22. Molinete de eje vertical



Fuente: *Molinete hidráulico*. <http://es.slideshare.net/AngyMile02/molinete-hidraulico>. Consulta: 8 de agosto de 2017.

2.2.1.2. Eje horizontal

Debido a que existe simetría con el flujo, el rotor perjudica el flujo. Por la forma en que está colocado el rotor es menos probable que se enrede con algún tipo de desechos que arrastre la corriente.

Figura 23. **Molinete de eje horizontal**



Fuente: *Molinete hidráulico*. <http://es.slideshare.net/AngyMile02/molinete-hidraulico>. Consulta: 29 de agosto de 2017.

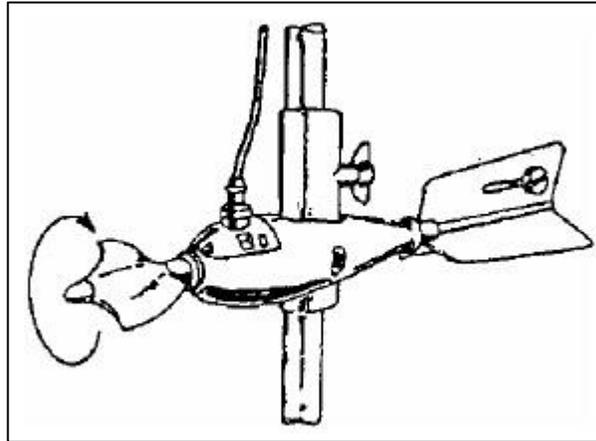
2.2.2. Según su sistema de sujeción

A continuación, se describen los molinetes según su sistema de ejecución.

2.2.2.1. Sistema de barras

Las barras están compuestas por tramos de un metro de longitud, graduadas a cada centímetro, normalmente de acero inoxidable o de aluminio, que unidas con tornillos, permiten trabajar con hasta cinco tramos, o cinco metros.

Figura 24. **Molinete con sistema de barras**

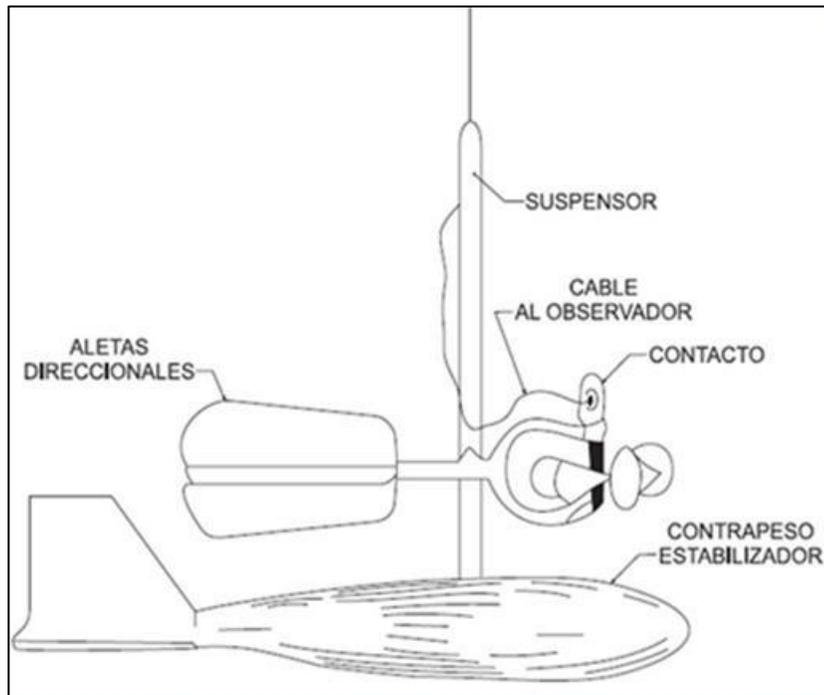


Fuente: *Método del molinete hidráulico*. <http://www.cuevadelcivil.com/2011/02/metodo-del-molinete-hidrometrico.html>. Consulta: 29 de agosto de 2017.

2.2.2.2. Sistema de cable y contrapeso

Se utiliza cuando es difícil trabajar con el sistema de barras. Se le complementa con una barra con una cola estabilizadora que hace que el molinete se mantenga paralelo al flujo. Los contrapesos pueden variar según el molinete.

Figura 25. **Molinete, sistema de cable y contrapeso**



Fuente: OCHOA, Alfredo. *Sistema de cable y contrapeso*. <http://slideplayer.es/slide/3871783/>.

Consulta: 29 de agosto de 2017.

2.2.2.3. Sistema de torno y botalón

Se utiliza en corrientes que son de alturas considerables o rápidas y tampoco puede ser utilizado el sistema de barras. Se requiere también de un contrapeso, pero de mayor magnitud, entre veinticinco y cien kilogramos.

2.3. Descripción del equipo

El equipo que se utilizará consiste en un molinete de eje horizontal con una hélice de bronce y una de aluminio, utilizando un contador de vueltas electrónico para cada medición.

El molinete tiene un largo de 13" (33 cms) y un diámetro de 2 $\frac{3}{4}$ " (7 cms).

Figura 26. **Molinete eje horizontal con hélices de bronce**



Fuente: elaboración propia.

Las hélices de cada molinete están conformadas por 3 aspas cuyas revoluciones son medidas por medio de un contador electrónico.

Figura 27. **Hélice 1 a la izquierda y hélice 2 a la derecha**



Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Hélice para el molinete**



Fuente: elaboración propia.

El molinete se coloca verticalmente a la altura que se determine según el tirante y es sostenido por medio de un tubo de aluminio de aproximadamente un metro de altura.

Figura 29. **Barra que sostiene al molinete**



Fuente: elaboración propia.

El contador de revoluciones posee tres interruptores, el primero que cambia del modo automático al manual, el segundo apaga o enciende el circuito de conteo automático y el tercero es el de apagado y encendido general.

Figura 30. **Contador de revoluciones de las hélices / a la izquierda Ing. Alan Cosillo y a la derecha Didier Fernández**



Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Interruptores del contador de revoluciones**



Fuente: elaboración propia.

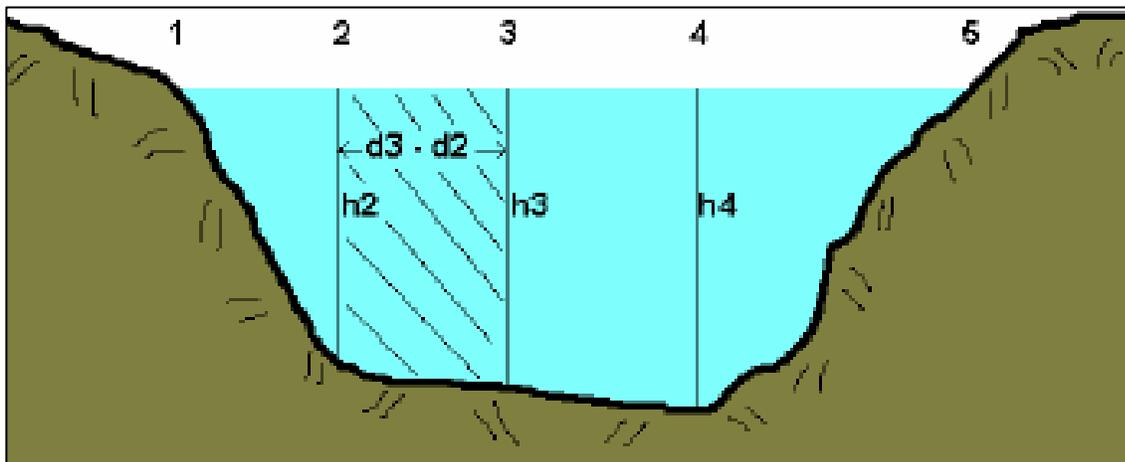
2.4. Cálculo de caudales con molinetes (método por vadeo)

Cuando se realiza el cálculo de un caudal con un molinete es necesario obtener la sección transversal del cauce en estudio, ya que la velocidad del flujo se obtendrá del molinete. A continuación, se describen los dos métodos más prácticos para el cálculo de la sección transversal y el caudal siguiendo el método por vadeo descrito en la sección 1.3.10 del capítulo anterior.

2.4.1. Método de la sección media

Es necesario tener una línea perpendicular al flujo del cauce, esta debe ir de orilla a orilla del mismo. A partir de esta línea se obtienen distancias horizontales a partir de una de las orillas hacia el punto donde se va a realizar la medición o mediciones, dividiendo así en pequeños rectángulos toda el área transversal. Mientras más distancias horizontales y mediciones se hagan, más preciso será el caudal.

Figura 32. Método sección media



Fuente: BASÁN NICKISCH, Mario. *Curso de aforadores de corrientes de agua*. p. 54.

El caudal parcial que pasa entre cada sección rectangular en que se divide toda el área transversal del cauce se calcula a partir de $Q = A \times V$, por lo que el área vendría dada por la distancia horizontal entre cada sección, multiplicada por la altura promedio en ambos extremos del rectángulo. Al obtener el área, ésta se multiplica por la velocidad promedio de cada extremo de la misma, obteniendo así el caudal parcial de dicha sección.

Caudal parcial de una sección:

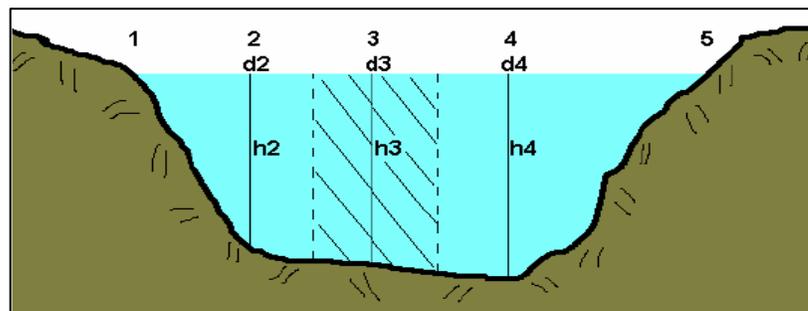
$$Q_p = (d_s * h_p) * v_p \quad [\text{Ec. 2.1}]$$

Es recomendable que las distancias horizontales a las orillas sean pequeñas, para que los caudales en esas sean insignificantes, debido a que en estas áreas la sección es más irregular. El caudal total del cauce en estudio es la suma de todos los caudales parciales.

2.4.2. Método de la semisección

Este método también trabaja con caudales parciales. La metodología divide en secciones de igual distancia horizontal a través de la línea transversal del cauce, pero el área afectada por cada caudal medido en cada punto en que se divide el flujo está representada por un rectángulo de base igual a la suma de las dos distancias medias entre cada punto y de altura igual a la profundidad del río en ese punto. En ambas orillas del río (estaciones en los extremos) se utiliza 1/3 de la velocidad registrada en las estaciones adyacentes.

Figura 33. Método de semisección



Fuente: BASÁN NICKISCH, Mario. *Curso de aforadores de corrientes de agua*. p.56.

El caudal parcial de cada sección vendría dado por el área del rectángulo que se forma entre la mitad de cada sección multiplicado por la altura del cauce medido en el medio de dicho rectángulo, como en la siguiente ecuación.

Caudal parcial de una sección:

$$Q_p = dm * hn * vn \quad [\text{Ec. 2.2}]$$

El caudal total será la sumatoria de los caudales encontrados en cada sección.

Las siguientes tablas ejemplifican un aforo por vadeo con el método de la semisección y medición de velocidades a 0,2 h y a 0,8 h. La primera etapa del proceso considera la toma de datos a lo ancho de la sección, midiendo alturas y velocidades.

Tabla IV. **Toma de datos aforo por vadeo**

Estación m	Profundidad m	Lectura m	Velocidad m/seg
3.00	0.28	-----	0.000
3.75	0.32	0.13	0.329
		0.37	0.448
4.50	0.46	0.09	0.397
		0.45	0.430
5.00	0.56	0.11	0.370
		0.55	0.468
6.50	0.69	0.14	0.443
		0.60	0.527
7.00	0.75	0.15	0.428
		0.58	0.458
7.75	0.73	0.15	0.357
		0.50	0.428
8.75	0.62	0.12	0.352
		0.42	0.458
10.00	0.52	0.10	0.329
		0.33	0.448
10.50	0.41	0.08	0.302
12.75	0.33	0.13	0.410
14.00	0	-----	0.000

Fuente: *Ejemplo de aforo por vadeo*. <https://civilgeeks.com/2011/08/16/ejemplo-de-aforo-por-vadeo/>. Consulta: 10 de julio de 2018.

Para la estación a 4,50 m, su altura es 0,46 m, por lo que la velocidad se midió a 0,8 h y a 0,2 h así:

$$0,8h = 0,8 * 0,46 = 0,37$$

$$0,2h = 0,2 * 0,46 = 0,09$$

Luego se calcula la velocidad media de cada estación de la siguiente forma y tomando como ejemplo la estación a 4,5 m.

$$V_m = (0,37 + 0,09) / 2 = 0,4225 \text{ m/seg}$$

El ancho "b" se determina de la siguiente forma:

$$b_0 = [E_0 + (E_1 - E_0) / 2] - [E_{-1} + (E_0 - E_{-1}) / 2] \quad [\text{Ec. 2.3}]$$

$$b_0 = [4,5 + (5 - 4,5) / 2] - [3,75 + (4,5 - 3,75) / 2] = 0,625 \text{ m}$$

El área es entonces:

$$A = b * h \quad [\text{Ec. 2.4}]$$

$$A = 0,625 * 0,46 \quad A = 0,2875 \text{ m}^2$$

EL caudal según la ecuación 1.6 es:

$$Q = 0,2875 * 0,4225 \quad Q = 0,1215 \text{ m}^3/\text{seg}$$

El caudal total que es la suma de parcial de cada estación, que para nuestro ejemplo es 2,1407 m³/seg.

Tabla V. **Determinar el caudal en un aforo por vadeo**

Estación	Profundidad	Velocidad	Ancho	Area	Caudal
m	m	m/seg	m	m ²	m ³ /seg
3.00	0.28	0.1097	0.375	0.1500	0.0115
3.75	0.32	0.3290	0.750	0.2400	0.0790
4.50	0.46	0.4225	0.625	0.2875	0.1215
5.00	0.56	0.4000	1.000	0.5600	0.2240
6.50	0.69	0.4555	1.000	0.6900	0.3143
7.00	0.75	0.4775	0.625	0.4688	0.2239
7.75	0.73	0.4075	0.875	0.6388	0.2603
8.75	0.62	0.3900	1.125	0.6975	0.2720
10.00	0.52	0.3935	0.875	0.4550	0.1790
10.50	0.41	0.3750	1.375	0.5638	0.2114
12.75	0.33	0.4100	1.750	0.5775	0.2368
14.00	0.00	0.1367	0.625	0.0516	0.0070
Σ			11.0000	5.3805	2.1407

Fuente: *Ejemplo de aforo por vadeo*. <https://civilgeeks.com/2011/08/16/ejemplo-de-aforo-por-vadeo/>. Consulta: 10 de julio de 2018.

3. CALIBRACIÓN DE MOLINETE

Para la calibración de molinetes, la acepción más adecuada para la acción de calibrar es ajustar, con la mayor exactitud posible, las indicaciones de un instrumento de medida con respecto a un patrón de referencia. De esta manera, la calibración de un molinete es el acto de encontrar a qué velocidad corresponde el número de giros de la rueda de copas.

Primeramente, el operador introduce el aparato al agua y lo coloca en una posición determinada previamente. Después de unos momentos, el operador escucha una serie de sonidos que se relacionan con el número de giros que da el rotor al ser movido por la corriente de agua. Se cuantifica la cantidad de sonidos durante un tiempo, se consulta una tabla entrando con el número de giros en el tiempo ya mencionado y se encuentra la velocidad del agua que genera ese número de giros. También se aplica una ecuación para determinar la velocidad. Tanto la ecuación como la tabla son el producto de la calibración.

Los molinetes se deben calibrar para saber qué velocidad corresponde a un cierto número de giros de la rueda de copas. La calibración es indispensable dado que cada molinete es diferente, cada uno tiene diferente resistencia al giro por el empuje del agua y cada uno se usa de distinta manera. Así que dado el tipo de molinete y el tiempo de uso, se deben calibrar al inicio de su operación y cada cierto tiempo después de su uso normal o después de alguna falla o desperfecto.

A continuación, se presenta la ecuación de calibración de algunos tipos de molinetes como el medidor Price que es un molinete de cazoletas o de eje

vertical adoptado oficialmente por La División de Recursos Hidráulicos del Departamento de Geología de Estados Unidos, para el aforo de corrientes y el molinete Gurley muy usado en los estudios hidrométricos realizados en México. El medidor Hoff es un molinete tipo hélice o de eje horizontal

Tabla VI. **Ecuaciones de calibración de algunos molinetes**

Modelo de molinete	Ecuación de calibración
Molinetes de cazoletas:	
Gurley - 622	$v = 0.690904 \cdot rps + 0.014694$
SIW - 017	$v = 0.658 \cdot rps + 0.0090$
Price - 622	$v = 0.6735 \cdot rps + 0.0091$
Molinete tipo hélice:	
Medidor Hoff	$v = 0.296 \cdot rps$

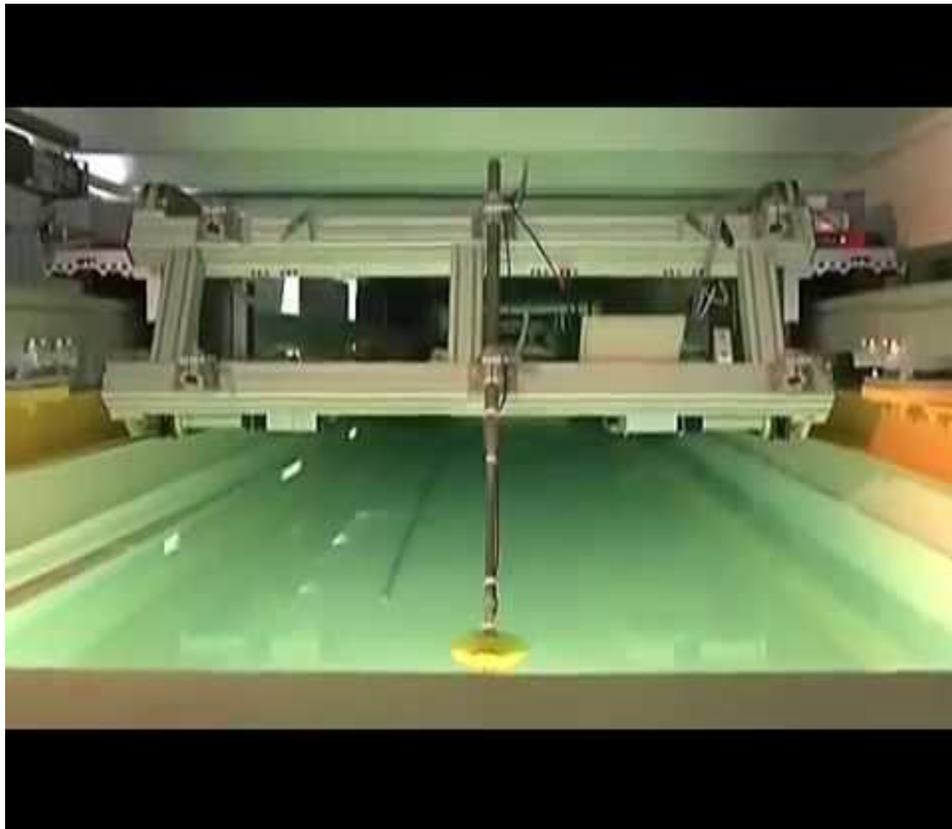
Fuente: BRIONES SÁNCHEZ, Gerson, GARCÍA CASILLAS, Ignacio. *Ecuaciones de calibración para algunos modelos de molinetes*. p. 112.

En el laboratorio de calibración se recomienda calibrar los molinetes cada 6 meses cuando se tiene un uso normal de los mismos. El desajuste del medidor sucederá inevitablemente después de un tiempo de uso normal y con mayor razón después de un desperfecto y obviamente cuando sale de su fabricación no estará calibrado

Existen calibradores que funcionan con alta tecnología como el canal de calibración OTT Hydromet (Alemania), de 50 metros de longitud, este realiza la

calibración individual de las hélices de los molinetes hidrométricos, siguiendo la norma ISO 3455.

Figura 34. **Canal de calibración OTT Hydromet**



Fuente: *Ott Hydromet*. <https://www.google.com.gt/search?q=canal+ott+hydromet&rlz>. Consulta: 10 de julio de 2018.

ISO 3455: 2007 especifica el procedimiento de calibración de los medidores de corriente del tipo de elemento giratorio así como del tipo de sensor estacionario (tipo electromagnético) en tanques abiertos rectos. También especifica los tipos de tanque, clasificación del equipo y equipo que se utilizará y el método de presentación de los resultados.

El procedimiento no tiene en cuenta ninguna diferencia posible existente entre el comportamiento de un medidor de corriente que se mueve en agua inmóvil y el de un medidor de corriente fijo en flujo turbulento.

Figura 35. **Canal de calibración de molinetes**



Fuente: *Laboratorios de hidráulica*. <https://sites.google.com/a/unal.edu.co/dica/laboratorios/hidraulica>. Consulta: 10 de julio de 2018.

3.1. Calibración de la superficie de medición

Se deberán conocer todos los parámetros necesarios de la superficie en donde se obtendrán los datos de medición del molinete. Dichos datos deberán ser la altura del tirante del flujo, el ancho de la sección transversal y el caudal del mismo.

Para los datos que se obtengan sean fiables, las estaciones de medición deben estar calibradas. El presente ensayo se realizó en el canal artificial del departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, este se calibra constantemente. Las características del laboratorio son las siguientes:

- Canal: construido con láminas de acrílico transparente, con espesor de 5 mm, reforzado en vértices y uniones con una estructura de acero. La sección transversal del canal tiene dimensiones internas de 31 centímetros en su base por una altura de 37.5 centímetros, tiene una longitud de 7 metros y una capacidad de transportar caudal entre 5 y 30 l/seg.

Figura 36. **Canal Laboratorio de Hidráulica Facultad de Ingeniería**



Fuente: elaboración propia.

El canal posee un sistema especial para variar la pendiente. Este sistema es del tipo gato de tijera, es decir, que es un sistema de funcionamiento mecánico. Para el caso de la presente tesis, no ha sido necesaria la utilización de este sistema debido a que el análisis se realizó para una pendiente cero en el canal.

Figura 37. **Sistema para elevación de la pendiente en el canal**



Fuente: elaboración propia.

- Sistema de bombeo: este sistema abastece el canal por medio de una bomba centrífuga de 20 HP marca Westinghouse con capacidad para un caudal máximo de 30 l/seg. Estos datos se obtienen en una placa de metal color gris que se encuentra remachada sobre la bomba color amarillo (ver fig. 38).

Figura 38. Características de la bomba



Fuente: elaboración propia.

La bomba succiona del depósito de almacenamiento a través de una tubería Hg de 8" de diámetro y de la bomba hacia el canal el impulso lo realiza a través de una tubería también de Hg de 6" de diámetro.

Figura 39. **Bomba del canal Facultad de Ingeniería / a la izquierda Ing. Alan Cosillo y a la derecha Didier Fernández**



Fuente: elaboración propia.

- Depósito de almacenamiento (cisterna): el agua se almacena en un depósito con capacidad para $4,12 \text{ m}^3$ para una altura de $0,66 \text{ m}$, un ancho de 1 m y $6,38 \text{ m}$ de largo, al cual se encuentra bajo el nivel de piso. Su capacidad de rebalse se encuentra a $0,78 \text{ m}$ de altura para $4,98 \text{ m}^3$ de capacidad. El depósito posee un volumen muerto de $1,33 \text{ m}^3$ y su

altura máxima es de 0,99 m. De este depósito se succiona el caudal necesario por medio de una tubería de HG de 8" de diámetro.

Figura 40. **Vista superior externa del cisterna**



Fuente: elaboración propia.

Se observa en la figura 39 la parte superior externa del depósito de almacenamiento con la tubería de succión de 8" Hg hacia la bomba y un canal que devuelve el agua a la cisterna para su recirculación y reutilización.

- Válvula de compuerta: el canal posee una válvula de compuerta que se puede ir graduando para aumentar o disminuir el caudal.
- Deposito aforador: para determinar el caudal que fluye sobre el canal, éste cuenta con un depósito de metal al final del mismo con capacidad de 530 litros, en donde posee un piezómetro que marca una altura determinada.

Figura 41. **Piezómetro medidor en depósito aforador**



Fuente: elaboración propia.

Con esta medida es posible determinar el volumen del estanque a través de una tabla proporcionada por el departamento de Hidráulica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala (Usac), (ver anexo).

Con esto únicamente es necesario tomar el tiempo en que el estanque se llena a la altura tomada del piezómetro y se obtiene el caudal del canal y por tanto también la velocidad, a través de la ecuación 1.1.

Figura 42. **Depósito aforador Laboratorio Hidráulica / en la fotografía
Didier Fernández**



Fuente: elaboración propia.

- Cronómetro y cinta métrica: para la toma de tiempos y medición de alturas para cada ensayo realizado.

Con el equipo de laboratorio ya descrito se procedió a realizar las mediciones respectivas para la calibración de la superficie de medición. Los parámetros a medir y necesarios para la calibración son el tirante del flujo, el ancho de la sección transversal y el caudal.

Para el logro de la calibración, se realizaron seis ensayos y en cada uno de ellos se midieron los parámetros ya indicados cuyo objetivo final es el cálculo de la velocidad, despejando la misma a través de la ecuación 1.6. Estas mediciones y el cálculo de la velocidad se presentan en la siguiente tabla.

Tabla VII. **Calibración de superficie de medición**

Altura tirante (cm)	Ancho canal (cm)	Área (m ²)	Tiempo llenado (s)	Altura estanque (cm)	Vol. estanque (L)	Caudal (L/s)	Caudal (m ³ /s)	Vel. (m/s)
9,500	31,000	0,029	35,220	17,800	177,320	5,035	0,005	0,171
10,300	31,000	0,032	19,370	17,600	175,930	9,083	0,009	0,284
12,100	31,000	0,038	16,600	25,500	230,870	13,908	0,014	0,371
14,000	31,000	0,043	13,160	18,500	182,180	13,843	0,014	0,319
19,400	31,000	0,060	9,190	23,800	219,020	23,832	0,024	0,396
19,800	31,000	0,061	8,720	24,800	225,990	25,916	0,026	0,422

Fuente: elaboración propia.

3.2. Toma de datos con molinete

Para la toma de medidas con un molinete existen varios métodos, los cuales varían en cuánto a precisión. El método más aconsejable es tomar datos a tres alturas diferentes, al veinte, sesenta y ochenta por ciento de la misma. Pero debido a que la altura del tirante de agua en el canal es relativamente pequeña sólo se tomaron datos al sesenta por ciento del mismo, la teoría indica que en este porcentaje se encuentra aproximadamente la velocidad promedio de un cauce.

Figura 43. **Sistema de conteo de vueltas**



Fuente: elaboración propia.

También es importante que el tiempo de cada medición supere los sesenta segundos, es lo más aconsejable para que la toma de datos sea más precisa. El molinete descrito en la sección 2.5. cuenta con dos hélices una de aluminio y otra de bronce construida para un modelo de barco. El sistema de conteo se enciende cada 52 vueltas, es decir que el número de revoluciones contadas se debe de multiplicar por 52.

Figura 44. **Instalación de hélices del molinete**



Fuente: elaboración propia.

Entonces, para elaborar la tabla de datos se realizaron seis ensayos para cada una de las dos hélices, colocando el molinete a una altura correspondiente al 60 % de la altura total del tirante y contando el tiempo por cada 10 revoluciones. Los resultados son los siguientes:

Tabla VIII. **Medición hélice 1**

Hélice 1					
Medición	Altura tirante (cm)	Altura molinete (cm)	Revoluciones (Rev)	Tiempo (s)	Rev/s
1	9,50	5,700	10,000	190,090	0,053
2	10,30	6,180	10,000	85,050	0,118
3	12,10	7,260	10,000	85,310	0,117
4	14,00	8,400	10,000	73,590	0,136
5	19,40	11,640	10,000	62,780	0,159
6	19,80	11,880	10,000	58,440	0,171

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Medición hélice 2**

Hélice 2					
Medición	Altura Tirante (cm)	Altura molinete (cm)	Revoluciones (Rev)	Tiempo (s)	Rev/s
1	9,50	5,700	10,000	187,930	0,053
2	10,30	6,180	10,000	104,190	0,096
3	12,10	7,260	10,000	93,560	0,107
4	14,00	8,400	10,000	84,310	0,119
5	19,40	11,640	10,000	70,470	0,142
6	19,80	11,880	10,000	66,250	0,151

Fuente: elaboración propia.

3.3. **Método de calibración del molinete**

Para calibrar un molinete es necesario encontrar una ecuación que relacione la velocidad del mismo con la del cauce en estudio. Al realizar una gráfica de velocidad del cauce versus la velocidad de la hélice del molinete, se puede observar que los datos se comportan de forma lineal aproximadamente.

Es posible determinar la ecuación de una recta de ajuste. Este ajuste puede realizarse por el método de mínimos cuadrados o directamente por medio de Excel.

La velocidad del cauce se calculó en la tabla III y la velocidad del molinete se estableció en las tablas VIII y IX para las hélices 1 y 2 respectivamente. A continuación, las tablas X y XI resumen las velocidades del cauce y las rps de cada una de los dos hélices del molinete.

Tabla X. Velocidad del cauce VS velocidad hélice 1

Vel.cauce m/s	0,171	0,284	0,371	0,319	0,396	0,422
Vel molinete rps	0,053	0,118	0,117	0,136	0,159	0,171

Fuente: elaboración propia.

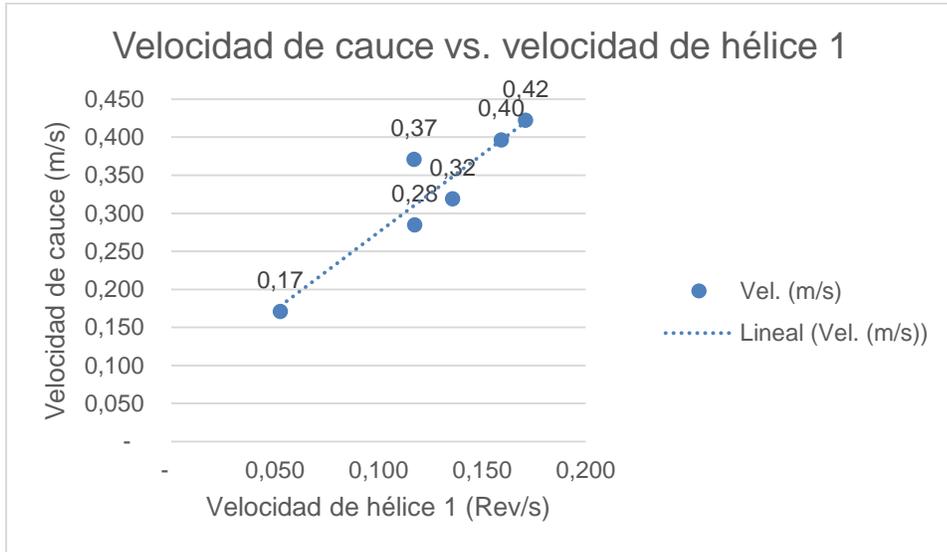
Tabla XI. Velocidad del cauce VS velocidad hélice 2

Vel.cauce m/s	0,171	0,284	0,371	0,319	0,396	0,422
Vel molinete rps	0,053	0,096	0,107	0,119	0,142	0,151

Fuente: elaboración propia.

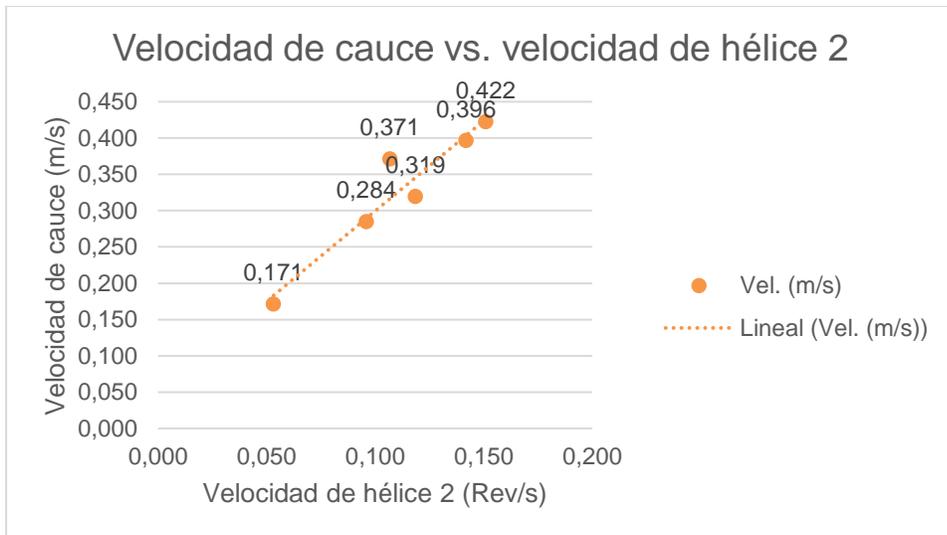
Se elaboran las gráficas de velocidad de cauce versus velocidad de hélice para observar la tendencia del conjunto de pares de datos. La gráfica para las hélices 1 y 2 se presentan en las figuras 40 y 41.

Figura 45. **Gráfica velocidad de cauce versus velocidad hélice 1**



Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **Gráfica velocidad de cauce versus velocidad hélice 2**



Fuente: elaboración propia.

3.3.1. Determinación de la recta de ajuste por mínimos cuadrados

Una recta de ajuste es una ecuación lineal que representa de manera aproximada el comportamiento de un conjunto de datos dispersos en ordenadas y abscisas. La ecuación viene dada por:

Ecuación de ajuste de la recta:

$$y = b_0 + (b_1 * x) \quad [\text{Ec. 3.1}]$$

Para encontrar b_0 y de b_1 se utiliza el método de los mínimos cuadrados, este consiste en encontrar los valores que hagan mínima la suma de los cuadrados de las desviaciones entre los valores observados de variable dependiente y los valores estimados de la misma. Al aplicar este método encontramos las siguientes ecuaciones:

Parámetro b_1 :

$$b_1 = \frac{\sum[(x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})]}{\sum[(x_i - \bar{x})^2]} \quad [\text{Ec. 3.2}]$$

Parámetro b_0 :

$$b_0 = \bar{y} - (b_1 * \bar{x}) \quad [\text{Ec. 3.3}]$$

Para iniciar a calcular las incógnitas de la ecuación de la recta es necesario encontrar las velocidades promedio de las hélices y del cauce.

Nótese que la rapidez promedio del flujo es el mismo para cuando se ensayaron las dos hélices.

Tabla XII. Promedio de velocidades

Promedio de velocidades		
Velocidad hélice 1 (x_1)	0,126	rev/s
Velocidad hélice 2 (x_2)	0,111	rev/s
Velocidad cauce (y_c)	0,327	m/s

Fuente: elaboración propia.

Al tener las velocidades promedio, se procede a calcular los valores finales de los parámetros b_1 y b_0 . Como se indica en la ecuación 7, la primera incógnita se calcula dividiendo la sumatoria de la multiplicación de la diferencia de cada velocidad tomada y la promedio de la hélice y del cauce, dentro del cuadrado de la diferencia de cada rapidez de la hélice y la promedio. Luego la ecuación 8, determina que la velocidad promedio del flujo menos la multiplicación del parámetro b_1 y la rapidez promedio de la hélice, da el valor b_0 .

Tabla XIII. Sumatorias de hélice 1 para encontrar b_1 y b_0

Medición	Vel. Cauce (m/s) y_i	Vel. Hélice (rev/s) x_i	$x_i - x_1$	$y_i - y_c$	$(x_i - x_1)^2$	$(x_i - x_1) * (y_i - y_c)$
1	0,171	0,053	-0,073	-0,156	0,005	0,011
2	0,284	0,118	-0,008	-0,043	6,461E-05	3,442E-04
3	0,371	0,117	-0,008	0,043	7,050E-05	-3,652E-04
4	0,319	0,136	0,010	-0,008	1,055E-04	-8,530E-05
5	0,396	0,159	0,034	0,069	1,134E-03	0,002
6	0,422	0,171	0,045	0,095	0,002	0,004
Total					0,009	0,018
					$b_1 = 2,046$	$b_0 = 0,070$

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Sumatorias de hélice 2 para encontrar b1 y b0**

Medición	Vel. Cauce (m/s) y_i	Vel. Hélices (rev/s) x_i	$x_i - x_1$	$y_i - y_c$	$(x_i - x_1)^2$	$(x_i - x_1) \cdot (y_i - y_c)$
1	0,171	0,053	-0,058	-0,156	0,003	0,009
2	0,284	0,096	-0,015	-0,043	2,334E-04	6,542E-04
3	0,371	0,107	-0,004	0,043	1,911E-05	-1,902E-04
4	0,319	0,119	0,007	-0,008	5,409E-05	-6,108E-05
5	0,396	0,142	0,031	0,069	9,394E-04	0,002
6	0,422	0,151	0,040	0,095	0,002	0,004
Total					0,006	0,015
b1 = 2,481						b0 = 0,051

Fuente: elaboración propia.

Ya con todas las incógnitas encontradas se procede a encontrar la ecuación de la recta de ajuste. Y por tanto al final se obtiene la fórmula que relaciona la velocidad del cauce y la velocidad de la hélice del molinete.

Tabla XV. **Ecuación final de ajuste**

y_1	$0,070 + (2,046x)$
y_2	$0,051 + (2,481x)$

Fuente: elaboración propia.

3.3.1.1. **Coficiente de determinación**

Este coeficiente determina que porcentaje de la variación de los datos se puede explicar con la relación lineal entre las ordenadas y las abscisas de una gráfica. Por tanto, es importante que el mismo sea lo más cercano al cien por

ciento. Esto indicará que la ecuación lineal establecida para el conjunto de datos, si representa aproximadamente los valores reales de la misma.

Coeficiente de determinación:

$$r^2 = 1 - \frac{SCE}{SCT} \quad [\text{Ec. 3.4}]$$

El coeficiente de determinación depende de la suma de cuadrados debida al error (SCE) y de la suma de cuadrados total (SCT). El error se obtiene de la resta del valor real de la velocidad obtenida del cauce y el valor teórico resultado de la ecuación de ajuste. Con el cuadrado de la resta de las rapideces de flujo y promedio se obtiene el SCT.

Suma de cuadrados debida al error:

$$SCE = \sum (y_i - y)^2 \quad [\text{Ec. 3.5}]$$

Suma de cuadrados total:

$$SCT = \sum (y_i - y_c)^2 \quad [\text{Ec. 3.6}]$$

A continuación, se muestra la tabla de resultados de la suma de los cuadrados de las dos hélices de prueba del molinete en base a las ecuaciones antes descritas, las cuales son necesarias para determinar el coeficiente de determinación.

Tabla XVI. **Suma de cuadrados hélice 1**

Medición	Vel. Cauce (m/s) y_i	Vel. final (m/s) y	$(y_i - y)^2$	$(y_i - y_c)^2$
1	0,171	0,178	4,862E-05	0,024
2	0,284	0,311	6,960E-04	0,002
3	0,371	0,310	0,004	0,002
4	0,319	0,348	8,595E-04	6,896E-05
5	0,396	0,396	1,598E-08	0,005
6	0,422	0,420	3,506E-06	0,009
		Total	0,005	0,042
			SCE	SCT

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Suma de cuadrados hélice 2**

Medición	Vel. Cauce (m/s) y_i	Vel. final (m/s) y	$(y_i - y)^2$	$(y_i - y_c)^2$
1	0,171	0,183	1,512E-04	0,024
2	0,284	0,289	2,419E-05	0,002
3	0,371	0,316	0,003	0,002
4	0,319	0,346	7,051E-04	6,896E-05
5	0,396	0,403	4,965E-05	0,005
6	0,422	0,426	1,246E-05	0,009
		Total	0,004	0,042
			SCE	SCT

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Coeficientes de determinación**

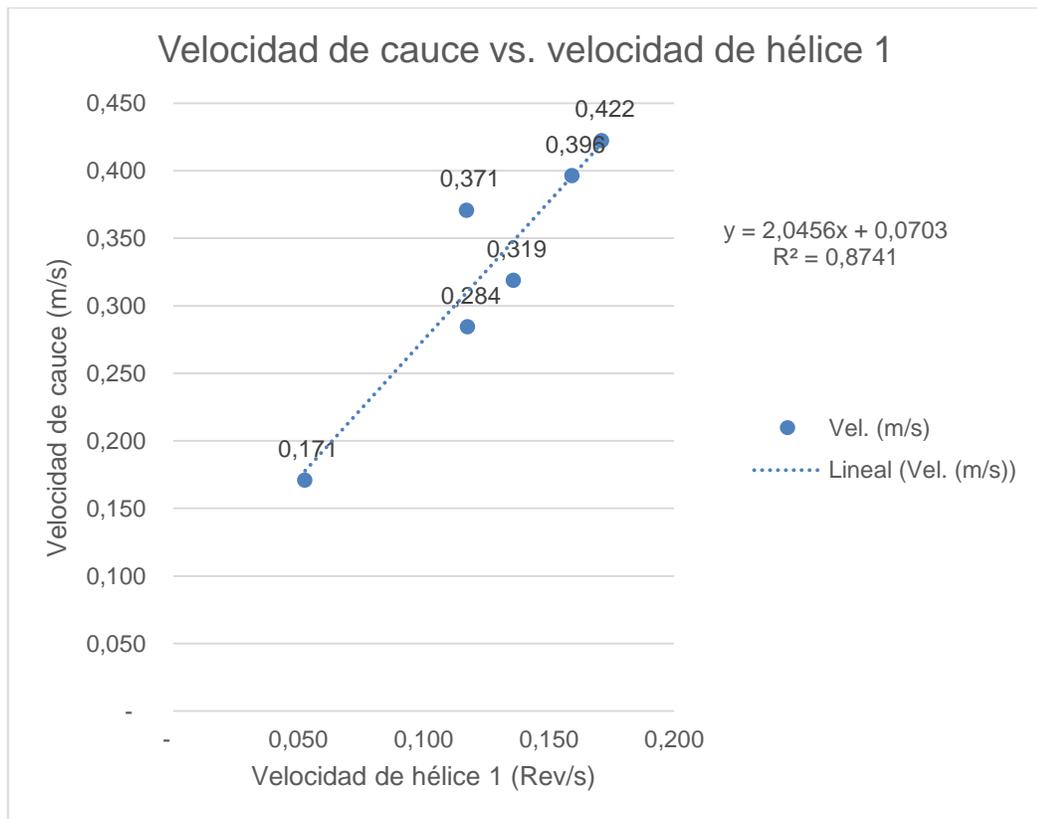
r_1^2 (%)	87,410 %
r_2^2 (%)	90,725 %

Fuente: elaboración propia.

3.3.2. Determinación de la recta de ajuste por medio de Excel

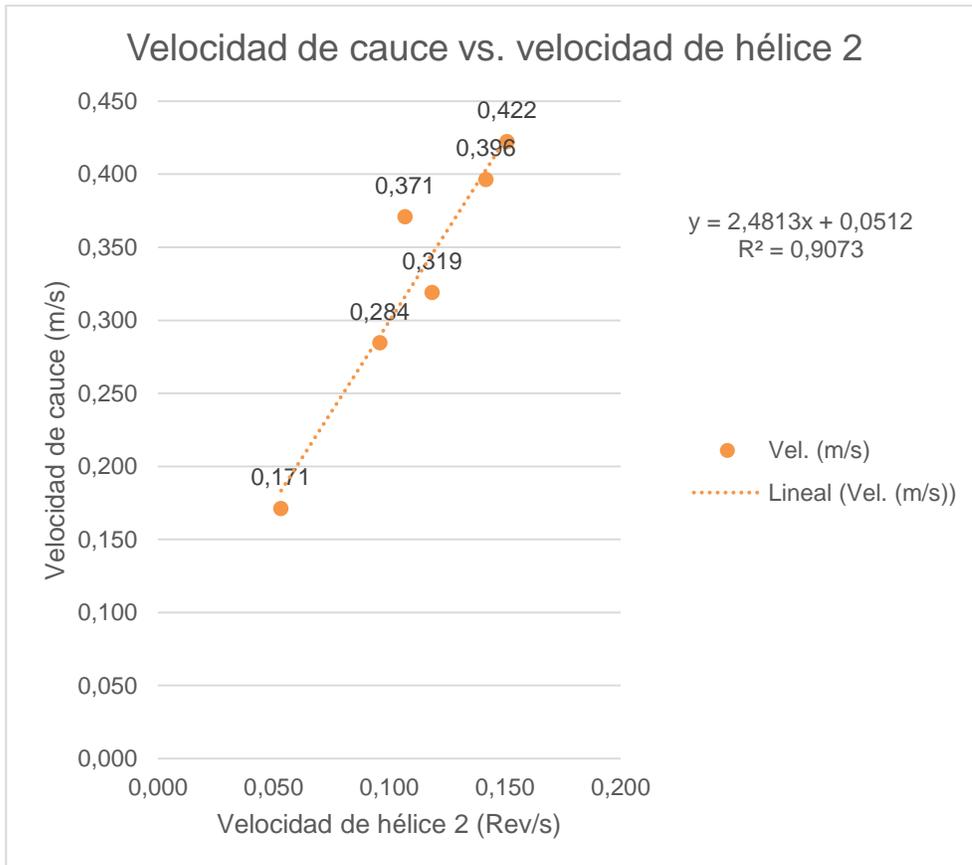
Con los datos de las velocidades medidas para cada hélice y la velocidad del cauce tabulados en las tablas V y VI respectivamente, se elabora la gráfica trazando la curva de tendencia con su respectiva ecuación de ajuste y su respectivo coeficiente de determinación r^2 .

Figura 47. Curva de ajuste hélice 1 por Excel



Fuente: elaboración propia.

Figura 48. Curva de ajuste hélice 2 por Excel



Fuente: elaboración propia.

Las ecuaciones de ajuste determinadas por Excel son:

$$V_c = 2,0456 V_1 + 0,0703 \quad [\text{Ec. 3.7}]$$

$$V_c = 2,4813 V_2 + 0,0512 \quad [\text{Ec. 3.8}]$$

Donde:

V_c = velocidad medida en el cauce

V_1 = velocidad del molinete hélice 1

V_2 = velocidad del molinete hélice 2

Las ecuaciones que se obtuvieron por el método de mínimos cuadrados manualmente son las siguientes:

$$V_c = 2,046 V_1 + 0,070 \quad [\text{Ec. 3.9}]$$

$$V_c = 2,481 V_2 + 0,051 \quad [\text{Ec. 3.10}]$$

Como se observa, la diferencia en el resultado de las ecuaciones de ajuste obtenidas puede considerarse insignificante. La única diferencia en ambos métodos es que Excel utiliza todos los decimales, por lo que quien realice el método de mínimos cuadrados utiliza la cantidad de decimales según la exactitud que desea. La ventaja de Excel es que tiene otras curvas de ajuste y es automático el ajuste.

3.4. Ecuación de ajuste para depósito aforador

Cabe mencionar también que se usó el método de mínimos cuadrados para encontrar la ecuación de ajuste para el depósito que se utiliza para aforar el canal hidráulico del laboratorio de la Facultad de Ingeniería. Quedando como resultado una ecuación de tercer grado (ecuación 3.11), debido a que es la que mejor se ajusta al conjunto de datos, los cuales se encuentran en la tabla del anexo 2. La ecuación acierta con un error de entre 0,01 % a 0,03 %, lo que se

considera bastante exacta, y elimina la necesidad de utilizar la tabla del anexo 2.

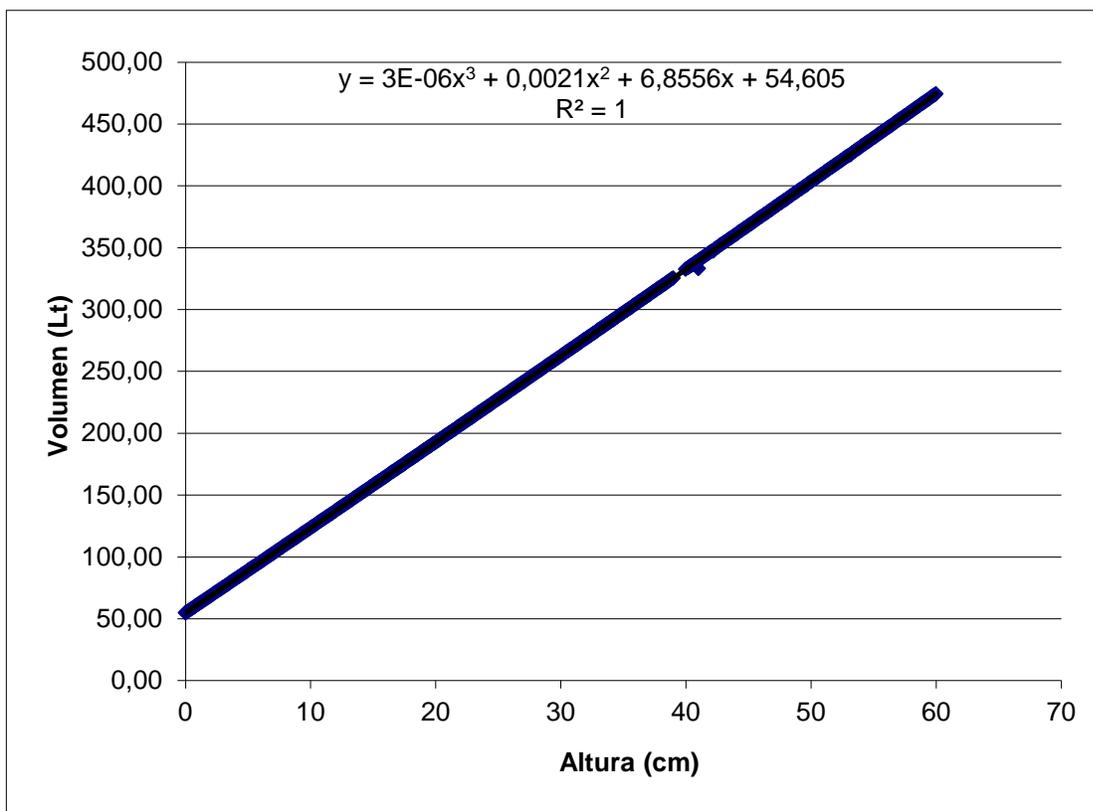
$$Vol. = 3x10^{-6}h^3 + 0,0021h^2 + 6,8556h + 54,605 \quad [\text{Ec. 3.11}]$$

Donde:

Vol. = volumen del estanque

h = altura del piezómetro

Figura 49. **Ecuación de ajuste para depósito aforador**



Fuente: elaboración propia.

4. AFORO CON EL MOLINETE METODO POR VADEO

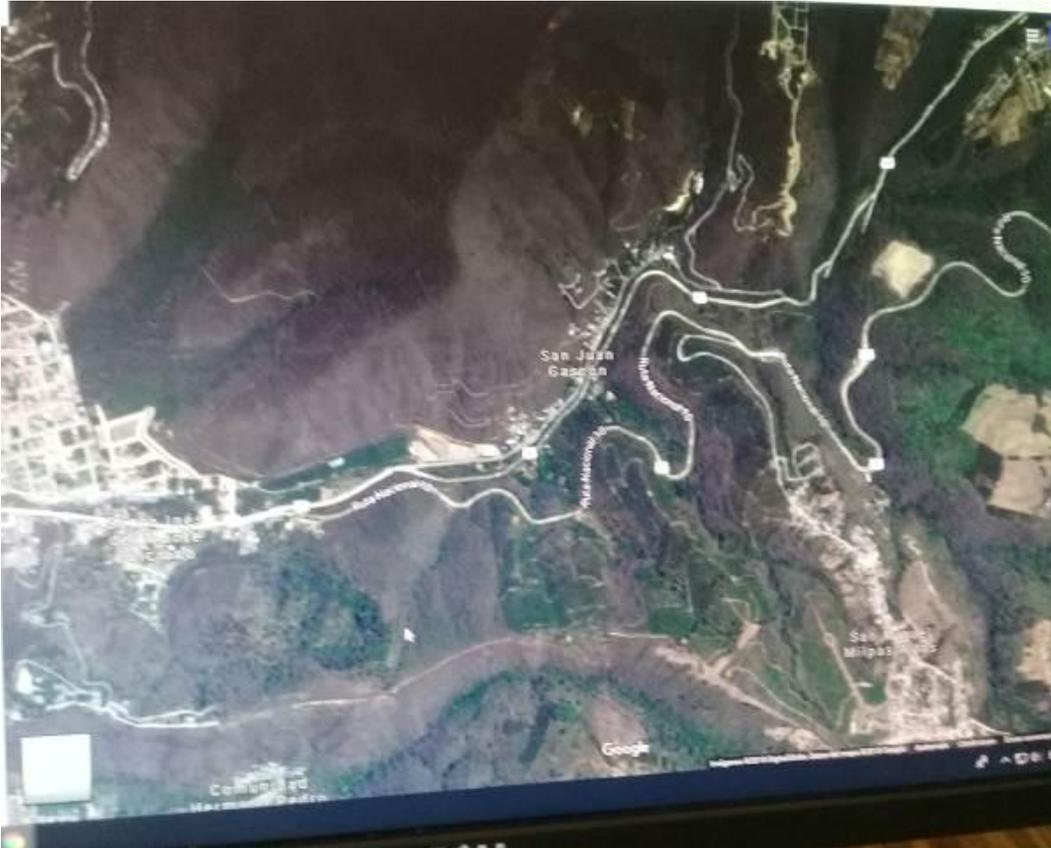
Para verificar el funcionamiento del molinete calibrado se realizaron dos aforos en diferentes puntos dentro de la cuenca del río Guacalate. El primer aforo se realizó en el río Pensativo ubicado al oeste de la cuenca y que se une al río Guacalate en las proximidades de Ciudad Vieja. El Segundo aforo se realizó justamente donde se ubica la estación Alotenango II, identificada así por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología y Meteorología.

4.1. Aforo en San Juan Gascón, río Pensativo

Este río se origina al suroeste de la cabecera del municipio de Santa Lucía Milpas Altas, surge de la unión de los ríos Santa María y San Miguel, bordea el lado norte de la ruta nacional 10 (San Lucas Sacatepéquez-Antigua Guatemala) y atraviesa la aldea Santa Inés del Monte Pulciano, cambia al suroeste y bordea el lado este de Antigua Guatemala, luego atraviesa varias fincas que utilizan sus aguas para riego. Se une al río Guacalate entre la cabecera del municipio de Ciudad Vieja y el casco de la finca El Potrero en las coordenadas latitud 14°31'38", longitud 90°45'45". Tiene una longitud de 11 km y se encuentra en las hojas cartográficas de Ciudad de Guatemala 2059 I y Chimaltenango 2059 IV.

El aforo se realizó un kilómetro debajo de San Juan Gascón en las coordenadas latitud 14°33'45", longitud 90°42'08" donde se ubica un puente de ingreso a la Posada de Don Porfirio sobre la ruta nacional 10.

Figura 50. **Mapa de ubicación de aforo por vadeo, río Pensativo**



Fuente: *Google earth*. <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>. Consulta: 10 de julio de 2018.

Se inició el aforo vadeando la sección cada 40 cm. Sobre un ancho total de 1,20 m. La altura máxima se encontró en 23 cm. en la estación a 0,80 m de la margen izquierda viendo aguas arriba. Se tomaron las velocidades del molinete en esta estación a 0,60 h debido a la baja profundidad del río y a 10 revoluciones para obtener tiempos mayores a los 60 segundos recomendados como mínimo para ambas hélices.

Figura 51. Lugar de realización del aforo



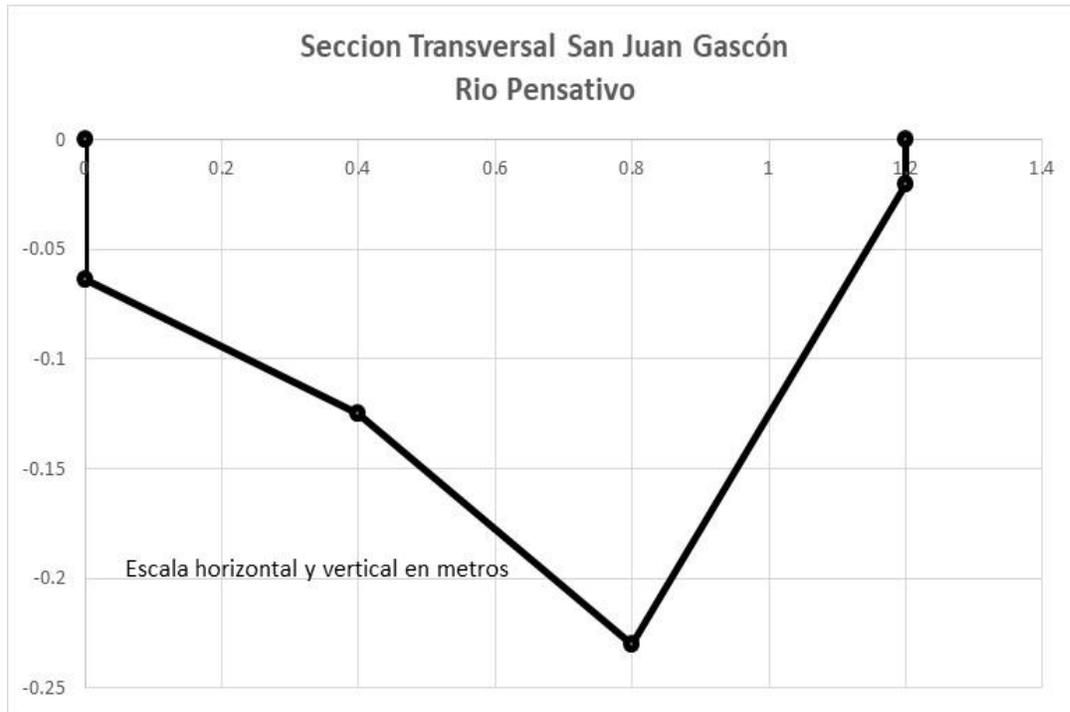
Fuente: *Google earth*. <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>. Consulta: 10 de julio de 2018.

Tabla XIX. Datos aforos, río Pensativo

ESTACION	DISTANCIA m	PROFUNDIDAD "h" m	0.6 h m	Revoluciones Cantidad	Tiempo seg	Hélice	Hora
Pensativo	0.00	0.064	0.038			H1	10:30
	0.40	0.125	0.075				
	0.80	0.230	0.138	10	218.59		
	1.20	0.020	0.012				
	0.00	0.064	0.038			H2	
	0.40	0.125	0.075				
	0.80	0.230	0.138	10	207.79		
	1.20	0.020	0.012				

Fuente: *Ejemplo de aforo por vadeo*. <https://civilgeeks.com/2011/08/16/ejemplo-de-aforo-por-vadeo/>. Consulta: 10 de julio de 2018.

Figura 52. Perfil del cauce



Fuente: *Ejemplo de aforo por vadeo*. <https://civilgeeks.com/2011/08/16/ejemplo-de-aforo-por-vadeo/>. Consulta: 10 de julio de 2018.

Luego de tomados los datos se calculan las velocidades de acuerdo a las ecuaciones de calibración de cada hélice utilizada en el molinete, tomando las ecuaciones 3.9 y 3.10.

El ancho, área y caudal total se calculan de acuerdo a lo establecido en la sección 2.6.2 siguiendo el procedimiento de la semisección. Adicionalmente se calcularon el perímetro mojado, el radio hidráulico y el valor del coeficiente “n” de Manning.

Figura 53. **Aforo del cauce en punto de aforo, rio Pensativo / a la izquierda Ing. Jorge Fernández y a la derecha Didier Fernández**



Fuente: elaboración propia.

La tabla XIX presenta los cálculos para la determinación del caudal que se obtuvo con cada una de las dos hélices, $0,026 \text{ m}^3/\text{seg}$ para la hélice 1 y $0,027 \text{ m}^3/\text{seg}$ para la hélice 2.

Tabla XX. **Caudal total, río Pensativo**

Velocidad hélice	Velocidad cauce	Ancho	Area	Caudal	Pm	Rh	S	n	Hélice
m/seg	m/seg	m	m ²	m ³ /seg	m	m	%	m/seg ³	
0.0457	0.1636	0.20	0.0128	0.0260	0.06	0.12	0.010	0.148	H1
		0.40	0.0500		0.40				
		0.40	0.0920		0.41				
		0.20	0.0040		0.45				
Σ		1.20	0.16		1.33				
0.0481	0.1704	0.20	0.0128	0.0271	0.06	0.12	0.010	0.142	H2
		0.40	0.0500		0.40				
		0.40	0.0920		0.41				
		0.20	0.0040		0.45				
Σ		1.20	0.16		1.33				

Fuente: *Ejemplo de aforo por vadeo*. <https://civilgeeks.com/2011/08/16/ejemplo-de-aforo-por-vadeo/>. Consulta: 10 de julio de 2018.

Las velocidades y los caudales estimados con cada hélice son prácticamente iguales confirmando así que están bien calibradas ambas hélices.

4.2. Aforo en Alotenango II, río Guacalate

El río Guacalate se ubica en la vertiente de ríos del Pacífico de Guatemala, abarcando los departamentos de, Chimaltenango donde tiene origen su nacimiento, Sacatepéquez y Escuintla. A la altura del municipio de Masagua en la finca Mercedes en el departamento de Escuintla ya en la planicie costera del pacífico se une al río Achiguate.

El aforo se realizó exactamente donde se ubica la estación de aforo del Insivumeh, denominada Alotenango II en las coordenadas latitud 14° 29' 33", longitud 90°48'32" sobre la ruta nacional 14 Escuintla-Chimaltenango.

Figura 54. **Aforo en Estación Alotenango II, río Guacalate**



Fuente: *Google earth*. <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>. Consulta: 10 de julio de 2018.

Se inició el aforo vadeando la sección cada 50 cms. Aproximadamente, sobre un ancho total de 5,20 m. La altura máxma se encontró en 63 cms. en la estación a 0,80 de la margen izquierda viendo aguas arriba. Se tomaron las velocidades del molinete en esta estación a 0,60 h debido a la baja profundidad del río y a 10 y 6 revoluciones para obtener tiempos mayores a los 60 segundos recomendados como mínimo para la hélice 1. Los datos obtenidos son los siguientes:

Figura 55. **Limnímetros en estación de aforo Alotenango II**



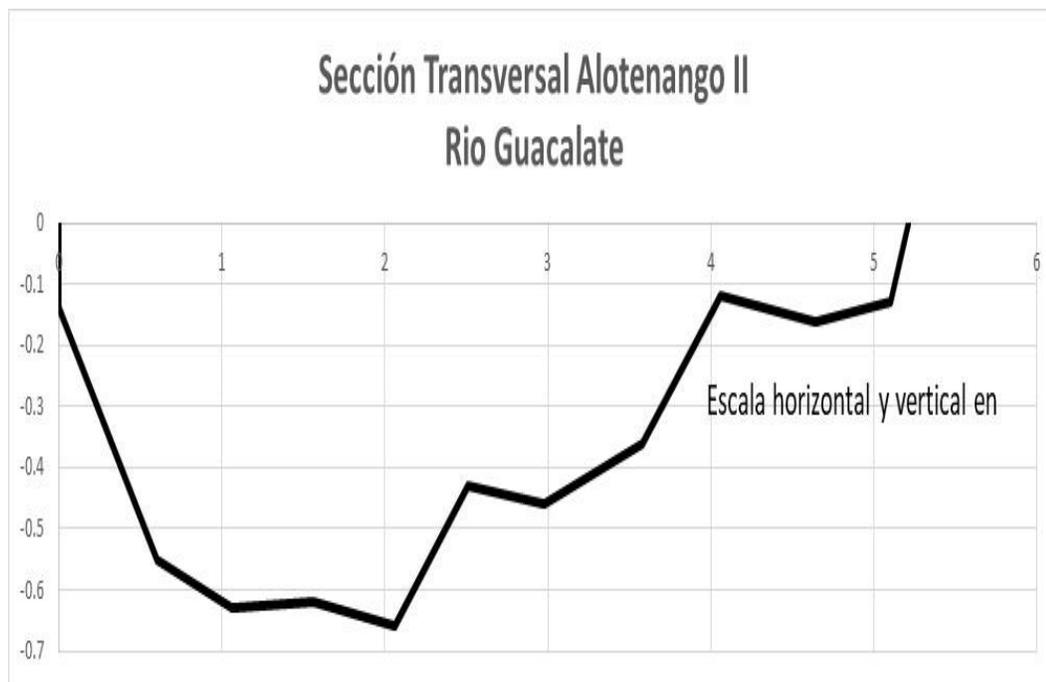
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Datos medidos en estación Alotenango II**

ESTACION	DISTANCIA	PROFUNDIDAD "h"	0.6 h	Revoluciones	Tiempo	Hélice	Hora
	m	m	m	Cantidad	seg		
Alotenango II	0.00	0.14	0.084	6	80.00	H1	11:30
	0.60	0.55	0.330	6	44.00		
	1.06	0.63	0.378	6	44.00		
	1.56	0.62	0.372	6	32.37		
	2.06	0.66	0.396	6	38.37		
	2.51	0.43	0.258	6	35.00		
	2.98	0.46	0.276	6	34.00		
	3.58	0.36	0.216	10	84.54		
	4.06	0.12	0.072	10	84.54		
	4.64	0.16	0.096	10	84.54		
	5.10	0.13	0.078	10	80.34		
	5.21	0.00	0.000	0	0.00		

Fuente: *Ejemplo de aforo por vadeo*. <https://civilgeeks.com/2011/08/16/ejemplo-de-aforo-por-vadeo/>. Consulta: 10 de julio de 2018.

Figura 56. **Sección cauce en estación Alotenango II**



Fuente: *Ejemplo de aforo por vadeo*. <https://civilgeeks.com/2011/08/16/ejemplo-de-aforo-por-vadeo/>. Consulta: 10 de julio de 2018.

Figura 57. **Método por vadeo en estación Alotenango II**

Luego de tomados los datos se calculan las velocidades de acuerdo a la ecuación 3.9 de calibración de la hélice¹ utilizada en el molinete. Sólo se tomaron datos con una hélice debido a que el cauce contaba con demasiada contaminación por tanto se dificultaba la toma de datos.

Figura 58. **Método por vadeo en Alotenango II**



Fuente: elaboración propia.

El ancho, área y caudal total se calculan de acuerdo a lo establecido en la sección 2.6.2 siguiendo el procedimiento de la semisección. Adicionalmente se calcularon el perímetro mojado, el radio hidráulico y el valor del coeficiente n de Manning.

Tabla XXII. **Calculo del caudal en aforo Alotenango II**

Velocidad hélice	Velocidad cauce	Ancho	Area	Caudal	Pm	Rh	S	n	Hélice
m/seg	m/seg	m	m ²	m ³ /seg	m	m	%	m/seg ^{1/3}	
0.08	0.22	0.30	0.04	0.01	0.14	0.37	0.0143	0.162	H1
0.14	0.35	0.53	0.29	0.10	0.73				
0.14	0.35	0.48	0.30	0.11	0.47				
0.19	0.45	0.50	0.31	0.14	0.50				
0.16	0.39	0.48	0.31	0.12	0.50				
0.17	0.42	0.46	0.20	0.08	0.51				
0.18	0.43	0.54	0.25	0.11	0.47				
0.12	0.31	0.54	0.19	0.06	0.61				
0.12	0.31	0.53	0.06	0.02	0.54				
0.12	0.31	0.52	0.08	0.03	0.58				
0.12	0.32	0.29	0.04	0.01	0.46				
0.00	0.07	0.06	0.00	0.00	0.17				
1.52	0.38	5.21	2.08	0.79	5.67				

Fuente: *Ejemplo de aforo por vadeo*. <https://civilgeeks.com/2011/08/16/ejemplo-de-aforo-por-vadeo/>. Consulta: 10 de julio de 2018.

El Insivumeh realizó una campaña de aforos el año 2017 en las estaciones de la cuenca Guacalate de los cuales tomamos los correspondientes a la estación Alotenango II en donde se realizaron 2 aforos, uno en el mes de Julio y otro en Septiembre.

Tabla XXIII. **Aforos de Insivumeh en Alotenango II**

Estacion	Fecha	Area	Perim. Mojado	Radio Hidráulico	Prof. Máxima	Velocidad Media	Caudal	n
		m ²	m	m	m	m/seg	m ³ /seg	m/seg ³
Alotenango II	7/09/2017	2.79	6.76	0.41	0.75	0.54	1.49	0.124
Alotenango II	24/07/2017	2.83	6.58	0.43	0.70	0.50	1.41	0.137

Fuente: *Ejemplo de aforo por vadeo*. <https://civilgeeks.com/2011/08/16/ejemplo-de-aforo-por-vadeo/>. Consulta: 10 de julio de 2018.

Al observar los resultados de Insivumeh con los determinados en el estudio de tesis, se puede concluir que existe buena relación entre ambos al comparar con los parámetros geométricos e Hidráulicos de la estación Alotenango II.

CONCLUSIONES

1. El método de la Ecuación de ajuste es el más preciso para la calibración de un molinete, pudiéndolo realizar con las funciones de Excel o con el procedimiento de mínimos cuadrados. El método de Excel muestra mayor capacidad y facilidad de uso.
2. El molinete de eje vertical es mejor para corrientes con velocidades bajas, por el contrario el molinete con eje horizontal es más eficiente para flujos con mucha rapidez.
3. Al observar los resultados de Insivumeh con los determinados en el estudio de tesis, se puede concluir que existe buena relación entre ambos al comparar con los parámetros geométricos e hidráulicos de la Estación Alotenango II donde se realizó el aforo.
4. El coeficiente de determinación indicó que la Ecuación de la recta de ajuste describe aproximadamente el noventa por ciento de los datos de las dos gráficas de las hélices en estudio. Se puede decir que la recta define precisamente el conjunto de datos.
5. El desarrollo de nuevas herramientas e instrumentos ayuda a conocer muchos procedimientos, tales como la toma de datos para la calibración tanto del equipo como del lugar de prueba, se obvian debido a que el consumidor final solo se enfoca en su uso. Por lo que estudiar los mismos podría convenir en mejoras de precisión, exactitud y tantos otros factores beneficiando el campo de la ingeniería.

RECOMENDACIONES

1. La superficie de calibración debe estar en un ambiente lo más controlado posible, para así evitar que muchos factores como el viento y el clima puedan afectar las mediciones que se realicen en la misma. El flujo debe ser de régimen normal.
2. Es necesario determinar el tipo de corriente que se quiere analizar, debido a que de esto dependerá el tipo de aforo e instrumentos a utilizar. Para flujos profundos lo más aconsejable es utilizar un molinete y realizar un aforo por vadeo.
3. El proceso de tabulación de datos de las velocidades de las hélices y del flujo y alinearlos en una gráfica indica su comportamiento. Gráficamente se puede notar si algún punto se aleja considerablemente de los demás, por lo que es una indicación de que es posible que no se tomó correctamente dicho dato debido a que su comportamiento es aproximadamente lineal. En este caso es recomendable realizar una nueva medición.
4. Usar los métodos de Excel para ajustes curva, son más versátiles y sumamente fáciles y rápidos de usar, además de otros procedimientos para ajustes de curvas.

BIBLIOGRAFÍA

1. APARICIO, Fernando J. *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. 2a ed. México: Limusa, 1992. 220 p.
2. BASÁN, NICKISCH, Mario. *Curso de aforadores de corrientes de agua*. Argentina: Santiago del Estero, 2008. 61 p.
3. CAMASIO, Esteban y ORSI, Eugenio. *Experimenting with a new calibration method for current meters*. Italia: DIIAR Politécnico di Milano, 2008. 15 p.
4. HERRERA PONCE, José C.; CASTILLO GONZÁLEZ, Josué.; DE LOS SANTOS GARCÍA, Armando.; MORENOS BAÑUELOS, Eduardo; UNLANDWEISS Helene. *Procedimientos para calibración de sección transversales en canales de la red de distribución de módulos de riego*. Jalisco, México: XXIII Congreso Nacional de Hidráulica, 2014. 6 p.
5. JOHNSTONE, D'mitry. *Current meter calibration equations: a review of the adequacy of limited-range equations for New Zealand requirements*. Nueva Zelanda: TaihoroNujurangi NiWa Project, 2008. 35 p.
6. Ministerio de Agricultura. *Manual de Hidrometría 2005. Convenio marco de cooperación interinstitucional*. Guatemala: INRENA-UCPSI, 2005. 6 p.

7. RUIZ APARICIO, Andrés. *Medidores de velocidad (hélice, turbina, y molinete)*. México: Subdirección General de Administración del Agua (CNA), 2001. 29 p.

ANEXOS

Anexo 1. **Volumen del estanque para aforar en función de la altura del piezómetro**

h(cm)	Vol(lit)	h(cm)	Vol(lit)	h(cm)	Vol(lit)	h(cm)	Vol(lit)
0	54.62	3.9	81.38	7.8	108.20	11.7	135.10
0.1	55.31	4	82.06	7.9	108.89	11.8	135.79
0.2	55.99	4.1	82.75	8	109.58	11.9	136.48
0.3	56.68	4.2	83.44	8.1	110.27	12	137.17
0.4	57.36	4.3	84.12	8.2	110.96	12.1	137.86
0.5	58.05	4.4	84.81	8.3	111.65	12.2	138.56
0.6	58.73	4.5	85.50	8.4	112.34	12.3	139.25
0.7	59.42	4.6	86.19	8.5	113.02	12.4	139.94
0.8	60.10	4.7	86.87	8.6	113.71	12.5	140.63
0.9	60.79	4.8	87.56	8.7	114.40	12.6	141.32
1	61.48	4.9	88.25	8.8	115.09	12.7	142.01
1.1	62.16	5	88.94	8.9	115.78	12.8	142.70
1.2	62.85	5.1	89.62	9	116.47	12.9	143.39
1.3	63.53	5.2	90.31	9.1	117.16	13	144.08
1.4	64.22	5.3	91.00	9.2	117.85	13.1	144.78
1.5	64.90	5.4	91.69	9.3	118.54	13.2	145.47
1.6	65.59	5.5	92.37	9.4	119.23	13.3	146.16
1.7	66.28	5.6	93.06	9.5	119.92	13.4	146.85
1.8	66.96	5.7	93.75	9.6	120.61	13.5	147.54
1.9	67.65	5.8	94.44	9.7	121.30	13.6	148.23
2	68.33	5.9	95.12	9.8	121.99	13.7	148.92
2.1	69.02	6	95.81	9.9	122.68	13.8	149.62
2.2	69.71	6.1	96.50	10	123.37	13.9	150.31
2.3	70.39	6.2	97.19	10.1	124.06	14	151.00
2.4	71.08	6.3	97.88	10.2	124.75	14.1	151.69
2.5	71.76	6.4	98.56	10.3	125.44	14.2	152.38
2.6	72.45	6.5	99.25	10.4	126.13	14.3	153.07
2.7	73.14	6.6	99.94	10.5	126.82	14.4	153.77
2.8	73.82	6.7	100.63	10.6	127.51	14.5	154.46
2.9	74.51	6.8	101.32	10.7	128.20	14.6	155.15
3	75.20	6.9	102.01	10.8	128.89	14.7	155.84
3.1	75.88	7	102.69	10.9	129.58	14.8	156.53
3.2	76.57	7.1	103.38	11	130.27	14.9	157.23
3.3	77.26	7.2	104.07	11.1	130.96	15	157.92
3.4	77.94	7.3	104.76	11.2	131.65	15.1	158.61
3.5	78.63	7.4	105.45	11.3	132.34	15.2	159.30
3.6	79.32	7.5	106.14	11.4	133.03	15.3	160.00
3.7	80.00	7.6	106.82	11.5	133.72	15.4	160.69
3.8	80.69	7.7	107.51	11.6	134.41	15.5	161.38

Continuación del anexo 1.

h(cm)	Vol(t)	h(cm)	Vol(t)	h(cm)	Vol(t)	h(cm)	Vol(t)
15.6	162.07	19.6	189.81	23.6	217.63	27.6	245.52
15.7	162.77	19.7	190.51	23.7	218.33	27.7	246.22
15.8	163.46	19.8	191.20	23.8	219.02	27.8	246.92
15.9	164.15	19.9	191.90	23.9	219.72	27.9	247.62
16	164.84	20	192.59	24	220.42	28	248.32
16.1	165.54	20.1	193.29	24.1	221.11	28.1	249.01
16.2	166.23	20.2	193.98	24.2	221.81	28.2	249.71
16.3	166.92	20.3	194.68	24.3	222.50	28.3	250.41
16.4	167.62	20.4	195.37	24.4	223.20	28.4	251.11
16.5	168.31	20.5	196.06	24.5	223.90	28.5	251.81
16.6	169.00	20.6	196.76	24.6	224.60	28.6	252.51
16.7	169.69	20.7	197.45	24.7	225.29	28.7	253.21
16.8	170.39	20.8	198.15	24.8	225.99	28.8	253.91
16.9	171.08	20.9	198.84	24.9	226.69	28.9	254.60
17	171.77	21	199.54	25	227.38	29	255.30
17.1	172.47	21.1	200.23	25.1	228.08	29.1	256.00
17.2	173.16	21.2	200.93	25.2	228.78	29.2	256.70
17.3	173.85	21.3	201.63	25.3	229.47	29.3	257.40
17.4	174.55	21.4	202.32	25.4	230.17	29.4	258.10
17.5	175.24	21.5	203.02	25.5	230.87	29.5	258.80
17.6	175.93	21.6	203.71	25.6	231.57	29.6	259.50
17.7	176.63	21.7	204.41	25.7	232.26	29.7	260.20
17.8	177.32	21.8	205.10	25.8	232.96	29.8	260.90
17.9	178.01	21.9	205.80	25.9	233.66	29.9	261.60
18	178.71	22	206.49	26	234.36	30	262.30
18.1	179.40	22.1	207.19	26.1	235.05	30.1	262.99
18.2	180.10	22.2	207.88	26.2	235.75	30.2	263.69
18.3	180.79	22.3	208.58	26.3	236.45	30.3	264.39
18.4	181.48	22.4	209.28	26.4	237.15	30.4	265.09
18.5	182.18	22.5	209.97	26.5	237.84	30.5	265.79
18.6	182.87	22.6	210.67	26.6	238.54	30.6	266.49
18.7	183.56	22.7	211.36	26.7	239.24	30.7	267.19
18.8	184.26	22.8	212.06	26.8	239.94	30.8	267.89
18.9	184.95	22.9	212.76	26.9	240.64	30.9	268.59
19	185.65	23	213.45	27	241.33	31	269.29
19.1	186.34	23.1	214.15	27.1	242.03	31.1	269.99
19.2	187.04	23.2	214.84	27.2	242.73	31.2	270.69
19.3	187.73	23.3	215.54	27.3	243.43	31.3	271.39
19.4	188.42	23.4	216.24	27.4	244.13	31.4	272.09
19.5	189.12	23.5	216.93	27.5	244.82	31.5	272.79

Continuación del anexo 1.

h(cm)	Vol(lit)	h(cm)	Vol(lit)	h(cm)	Vol(lit)	h(cm)	Vol(lit)
31.6	273.49	35.6	301.54	40.5	336.00	44.5	364.22
31.7	274.19	35.7	302.24	40.6	336.71	44.6	364.92
31.8	274.89	35.8	302.94	40.7	337.41	44.7	365.63
31.9	275.59	35.9	303.65	40.8	338.11	44.8	366.34
32	276.29	36	304.35	40.9	338.82	44.9	367.04
32.1	276.99	36.1	305.05	41	339.52	45	367.75
32.2	277.69	36.2	305.75	41.1	340.23	45.1	368.46
32.3	278.39	36.3	306.45	41.2	340.93	45.2	369.16
32.4	279.10	36.4	307.16	41.3	341.64	45.3	369.87
32.5	279.80	36.5	307.86	41.4	342.34	45.4	370.58
32.6	280.50	36.6	308.56	41.5	343.05	45.5	371.28
32.7	281.20	36.7	309.27	41.6	343.75	45.6	371.99
32.8	281.90	36.8	309.97	41.7	344.46	45.7	372.70
32.9	282.60	36.9	310.67	41.8	345.16	45.8	373.41
33	283.30	37	311.37	41.9	345.87	45.9	374.11
33.1	284.00	37.1	312.08	42	346.57	46	374.82
33.2	284.70	37.2	312.78	42.1	347.28	46.1	375.53
33.3	285.40	37.3	313.48	42.2	347.98	46.2	376.23
33.4	286.10	37.4	314.18	42.3	348.69	46.3	376.94
33.5	286.80	37.5	314.89	42.4	349.39	46.4	377.65
33.6	287.51	37.6	315.59	42.5	350.10	46.5	378.36
33.7	288.21	37.7	316.29	42.6	350.81	46.6	379.06
33.8	288.91	37.8	317.00	42.7	351.51	46.7	379.77
33.9	289.61	37.9	317.70	42.8	352.22	46.8	380.48
34	290.31	38	318.40	42.9	352.92	46.9	381.19
34.1	291.01	38.1	319.11	43	353.63	47	381.89
34.2	291.71	38.2	319.81	43.1	354.33	47.1	382.60
34.3	292.42	38.3	320.51	43.2	355.04	47.2	383.31
34.4	293.12	38.4	321.22	43.3	355.75	47.3	384.02
34.5	293.82	38.5	321.92	43.4	356.45	47.4	384.72
34.6	294.52	38.6	322.62	43.5	357.16	47.5	385.43
34.7	295.22	38.7	323.33	43.6	357.86	47.6	386.14
34.8	295.92	38.8	324.03	43.7	358.57	47.7	386.85
34.9	296.63	38.9	324.74	43.8	359.27	47.8	387.56
35	297.33	39	325.44	43.9	359.98	47.9	388.26
35.1	298.03	40	332.48	44	360.69	48	388.97
35.2	298.73	40.1	333.18	44.1	361.39	48.1	389.68
35.3	299.43	40.2	333.89	44.2	362.10	48.2	390.39
35.4	300.13	40.3	334.59	44.3	362.81	48.3	391.10
35.5	300.84	40.4	335.30	44.4	363.51	48.4	391.80

Continuación del anexo 1.

h(cm)	Vol(lit)	h(cm)	Vol(lit)	h(cm)	Vol(lit)	h(cm)	Vol(lit)
48.5	392.51	51.4	413.07	54.3	433.68	57.2	454.32
48.6	393.22	51.5	413.78	54.4	434.39	57.3	455.03
48.7	393.93	51.6	414.49	54.5	435.10	57.4	455.74
48.8	394.64	51.7	415.20	54.6	435.81	57.5	456.46
48.9	395.35	51.8	415.91	54.7	436.52	57.6	457.17
49	396.06	51.9	416.62	54.8	437.23	57.7	457.88
49.1	396.76	52	417.33	54.9	437.94	57.8	458.59
49.2	397.47	52.1	418.04	55	438.66	57.9	459.31
49.3	398.18	52.2	418.75	55.1	439.37	58	460.02
49.4	398.89	52.3	419.46	55.2	440.08	58.1	460.73
49.5	399.60	52.4	420.17	55.3	440.79	58.2	461.45
49.6	400.31	52.5	420.88	55.4	441.50	58.3	462.16
49.7	401.02	52.6	421.59	55.5	442.21	58.4	462.87
49.8	401.73	52.7	422.30	55.6	442.92	58.5	463.58
49.9	402.43	52.8	423.01	55.7	443.64	58.6	464.30
50	403.14	52.9	423.73	55.8	444.35	58.7	465.01
50.1	403.85	53	424.44	55.9	445.06	58.8	465.72
50.2	404.56	53.1	425.15	56	445.77	58.9	466.44
50.3	405.27	53.2	425.86	56.1	446.48	59	467.15
50.4	405.98	53.3	426.57	56.2	447.20	59.1	467.86
50.5	406.69	53.4	427.28	56.3	447.91	59.2	468.58
50.6	407.40	53.5	427.99	56.4	448.62	59.3	469.29
50.7	408.11	53.6	428.70	56.5	449.33	59.4	470.00
50.8	408.82	53.7	429.41	56.6	450.04	59.5	470.72
50.9	409.53	53.8	430.12	56.7	450.76	59.6	471.43
51	410.24	53.9	430.83	56.8	451.47	59.7	472.15
51.1	410.95	54	431.54	56.9	452.18	59.8	472.86
51.2	411.65	54.1	432.25	57	452.89	59.9	473.57
51.3	412.36	54.2	432.97	57.1	453.61	60	474.29

Fuente: Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.