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

MEDIDORES DE FLUJO EN CANALES ABIERTOS

MANUEL AGUSTÍN LUX MONROY
Asesorado por el Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Guatemala, septiembre de 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MEDIDORES DE FLUJO EN CANALES ABIERTOS

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MANUEL AGUSTÍN LUX MONROY

ASESORADO POR EL ING. LUIS MANUEL SANDOVAL MENDOZA
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola de López
VOCAL III	Ing. Miguel Angel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortíz de León
VOCAL V	Br. José Alfredo Ortíz Herincx
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
EXAMINADOR	Ing. Manuel de Jesús Morales Morales
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

MEDIDORES DE FLUJO EN CANALES ABIERTOS,

tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Civil, el 13 de mayo de 2008.

MANUEL AGUSTÍN LUX MONROY

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 20 de Mayo de 2010

Ingeniero
Pedro Antonio Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica
Facultad de Ingeniería

Después de revisar el trabajo de graduación del estudiante Manuel Agustín Lux Monroy, quien se identifica con carné No. 89-16301, titulado MEDIDORES DE FLUJO EN CANALES ABIERTOS, después de haber hecho las correcciones necesarias 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. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Colegiado No. 6496

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt

Guatemala,
27 de julio de 2010

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos
Guatemala

Estimado Ingeniero.

Atentamente y por este medio, envío a usted el trabajo de graduación desarrollado por el estudiante **Manuel Agustín Lux Monroy**, con el título **MEDIDORES DE FLUJO EN CANALES ABIERTOS** asesorado por el Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y los requisitos de ley del referido trabajo extiendo la APROBACIÓN DEL MISMO y habiéndose efectuado todas las observaciones técnicas, el suscrito lo da por APROBADO; solicitándole darle el trámite correspondiente.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

ESCUELA INGENIERIA CIVIL

FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica
Escuela de Ingeniería Civil

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del asesor Ingeniero Luis Manuel Sandoval Mendoza y del Jefe del Departamento de Hidráulica Ingeniero Pedro Antonio Aguilar Polanco, al trabajo de graduación del estudiante Manuel Agustín Lux Monroy, titulado **MEDIDORES DE FLUJO EN CANALES ABIERTOS** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco

Hugo L. Montenegro Franco
INGENIERO CIVIL
COLEGIADO NO 3177

Guatemala, septiembre de 2010.

/bbdeb

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERIA
DECANATO

Ref. DTG. 04/09/2010/G

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: **MEDIDORES DE FLUJO EN CANALES ABIERTOS**, presentado por el estudiante universitario **Manuel Agustín Lux Monroy**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, septiembre de 2010

/gdech.

DEDICATORIAS A:

DIOS	Todo poderoso por iluminar y bendecir cada instante de mi vida
MIS PADRES	**Agustín Lux Cortez y Josefina Monroy de Lux** Como muestra de mi eterna gratitud por todo el sacrificio y amor que me han regalado, siendo un gran ejemplo de esfuerzo y trabajo en la vida
MI ESPOSA	**Florencia Orozco** Por su amor y apoyo en todo momento
MIS HERMANOS	**Emilio, Heidi y Miguel** Por el cariño y amor que me brindan siempre
MI CUÑADA	**Marlene de Lux** Por su cariño y apoyo sincero
MIS SOBRINOS	**Denis, María José y Paola** Por iluminar cada instante que compartimos
MI FAMILIA	Por sus consejos y cariño a toda hora, en especial a mi tío **Diego y Luz de María** por su apoyo incondicional
MI ASESOR	**Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza** Gracias por brindarme su amistad y apoyo para lograr alcanzar esta meta
LA FACULTAD DE INGENIERÍA	Por engrandecer mi conocimiento y ampliar mi futuro

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES V
LISTA DE SÍMBOLOS XI
GLOSARIO XIII
RESUMEN XV
OBJETIVOS XVII
INTRODUCCIÓN XIX

1. MEDICIÓN DE CAUDALES 1
1.1. Hidrometría 1
1.1.1. Medición del agua 1
1.2. Instrumentos de medición de flujo en canales abiertos 2
1.2.1. Método volumétrico 2

2. VERTEDEROS 5
2.1. Definición de vertederos 5
2.1.1. Terminología 6
2.2. Clasificación de los vertederos 8
2.2.1. Vertederos de pared delgada 8
2.2.2. Vertederos de pared gruesa 9
2.3. Clasificación de los vertederos de pared delgada 10
2.4. Ecuaciones para el cálculo de caudal para distintas secciones geométricas de vertederos 10
2.4.1. Deducción de la fórmula general con caudal real y altura de carga para un vertedero de pared delgada 11
2.4.2. Vertedero rectangular 13

2.4.2.1. Vertedero rectangular sin contracciones 14
2.4.2.2. Vertedero rectangular con dos contracciones 15
2.4.3. Vertedero triangular 16
2.4.4. Vertedero trapezoidal 17
2.4.5. Vertedero circular 18

3. CANAL PARSHALL 21
3.1. Características del canal Parshall 21
3.1.1. Partes del medidor Parshall 23
3.1.2. Dimensiones del medidor Parshall 25
3.1.3. Usos del medidor Parshall 26
3.1.4. Puntos de medición 28
3.2. Teoría de los medidores de régimen crítico 29
3.3. Ventajas de los medidores Parshall 30
3.4. Fórmulas y tablas para el cálculo del caudal en un medidor Parshall 31

4. ENSAYOS DE LABORATORIO CON VERTEDEROS DE PARED DELGADA 35
4.1. Diseño y construcción de vertederos para determinación de caudales 35
4.1.1. Vertedero rectangular con dos contracciones 36
4.1.2. Vertedero trapezoidal o Cipolletti 38
4.1.3. Vertedero triangular 39
4.1.4. Vertedero circular 41
4.2. Calibración de vertederos y obtención de fórmulas experimentales 42
4.2.1. Calibración de vertedero rectangular con dos contracciones y cálculo de ecuación experimental 42

4.2.1.1. Realización del ensayo 42
4.2.1.2. Obtención de resultados 44
4.2.1.3. Cálculo del caudal real con fórmula del Manual de Hidráulica 48
4.2.2. Calibración de vertedero trapezoidal (Cipolletti) y cálculo de ecuación experimental 52
4.2.2.1. Realización del ensayo 52
4.2.2.2. Obtención de resultados 53
4.2.2.3. Cálculo del caudal real con fórmula del Manual de Hidráulica 56
4.2.3. Calibración de vertedero triangular y cálculo de ecuación experimental 60
4.2.3.1. Realización del ensayo 60
4.2.3.2. Obtención de resultados 61
4.2.3.3. Cálculo del caudal real con fórmula general 65
4.2.3.4. Cálculo del caudal con fórmula del Manual de Hidráulica 66
4.2.4. Calibración de vertedero circular y cálculo de ecuación experimental 70
4.2.4.1. Realización del ensayo 70
4.2.4.2. Obtención de resultados 71
4.2.4.3. Cálculo del caudal con fórmula del Manual de Hidráulica 74
4.3. Instructivo de laboratorio para ensayo con vertederos 77

5. ENSAYO DE LABORATORIO CON CANAL PARSHALL 83
5.1. Diseño y construcción de canal Parshall para ensayo 83
5.2. Calibración del canal Parshall y obtención de su fórmula experimental 87

5.3. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente con los de forma teórica 96
5.4. Instructivo de laboratorio para ensayo con canal Parshall 100

CONCLUSIONES 105
RECOMENDACIONES 107
BIBLIOGRAFÍA 109

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Aforo volumétrico	3
2.	Vertedero fabricado con mampostería sobre río Segura, Murcia España	6
3.	Partes del vertedero	7
4.	Vertedero en funcionamiento	7
5.	Vertedero de pared delgada	9
6.	Vertedero de pared gruesa	10
7.	Perfil vertedero	11
8.	Vertedero triangular de pared delgada	12
9.	Vertedero rectangular sin contracciones	15
10.	Vertedero rectangular con dos contracciones	16
11.	Vertedero triangular	17
12.	Vertedero trapezoidal (Cipolletti)	18
13.	Vertedero circular	19
14.	Ralph Parshall tomando medidas de flujo (1946)	21
15.	Canal Parshall en funcionamiento	22
16.	Partes del medidor Parshall (perfil)	24
17.	Partes del medidor Parshall (planta)	24
18.	Dimensiones del medidor Parshall	25
19.	Canal Parshall en planta de tratamiento de agua potable	27
20.	Medidor Parshall	29

21. Canal hidrodinámico del laboratorio de Hidráulica 35
22. Sección canal hidrodinámico 36
23. Dimensiones vertedero rectangular con dos contracciones 37
24. Vertedero rectangular fabricado 37
25. Dimensiones vertedero trapezoidal o Cipolletti 38
26. Vertedero trapezoidal fabricado 39
27. Dimensiones vertedero triangular 40
28. Vertedero triangular fabricado 40
29. Dimensiones vertedero circular 41
30. Vertedero circular fabricado 42
31. Vertedero rectangular con dos contracciones en funcionamiento 43
32. Gráfica logaritmos de caudal real y alturas H 46
33. Curva de calibración 48
34. Gráfica determinación del coeficiente de descarga 50
35. Comparación de caudales 51
36. Vertedero trapezoidal en funcionamiento 52
37. Gráfica logaritmos de caudal real y alturas H 54
38. Curva de calibración 56
39. Gráfica determinación del coeficiente de descarga 58
40. Comparación de caudales 59
41. Vertedero triangular instalado 60
42. Vertedero triangular en funcionamiento 61
43. Gráfica logaritmos de caudal real y alturas H 63
44. Curva de calibración 64
45. Gráfica determinación del coeficiente de descarga 66
46. Gráfica determinación del coeficiente de descarga 68
47. Comparación de caudales 69
48. Vertedero circular en funcionamiento 70
49. Gráfica logaritmos de caudal real y alturas H 72

50. Curva de calibración 74
51. Gráfica determinación del coeficiente de descarga 75
52. Comparación de caudales 76
53. Dimensiones medidor Parshall fabricado para laboratorio 84
54. Perforado de paredes del canal Parshall 85
55. Instalación de barras roscadas en paredes del canal 86
56. Refuerzo en paredes con barras roscadas 86
57. Instalación del canal Parshall en laboratorio 87
58. Fijación del canal Parshall 88
59. Canal Parshall listo para ensayar 88
60. Canal Parshall en funcionamiento 89
61. Perfil canal Parshall 90
62. Gráfica logaritmos de "H" y "Qr" 93
63. Gráfica alturas y caudales reales 95
64. Curva de calibración del canal Parshall ensayado 95
65. Comparación de caudales 97
66. Gráfica alturas y caudales reales en l/min 99

TABLAS

I.	Dimensiones típicas de medidores Parshall en cm	26
II.	Rango de caudales de operación en canales Parshall	28
III.	Valores de exponente "n" y coeficiente "K"	32
IV.	Caudales en medidores Parshall en l/s	33
V.	Datos obtenidos en ensayo con vertedero rectangular	44
VI.	Caudales reales	45
VII.	Logaritmos de caudales reales y alturas	46
VIII.	Caudales reales y generados con ecuación de calibración	47
IX.	Caudales real experimental y teórico	49
X.	Comparación de caudales	51
XI.	Datos obtenidos en ensayo con vertedero trapezoidal	53
XII.	Caudales reales	53
XIII.	Logaritmos de alturas y caudales reales	54
XIV.	Caudales reales y generados con ecuación de calibración	55
XV.	Caudales real experimental y teórico	57
XVI.	Comparación de caudales	59
XVII.	Datos obtenidos en ensayo con vertedero triangular	61
XVIII.	Caudales reales	62
XIX.	Logaritmos de caudales reales y alturas	62
XX.	Caudales reales y generados con ecuación de calibración	64
XXI.	Caudales real experimental y teórico fórmula general	65
XXII.	Caudales real experimental y teórico Manual de Hidráulica	67
XXIII.	Comparación de caudales	69
XXIV.	Datos obtenidos en ensayo con vertedero circular	71
XXV.	Caudales reales	71

XXVI.	Logaritmos de caudales reales y alturas	72
XXVII.	Caudales reales y generados con ecuación de calibración	73
XXVIII.	Caudales real experimental y teórico	75
XXIX.	Comparación de caudales	76
XXX.	Datos obtenidos en el ensayo	90
XXXI.	Caudales reales	91
XXXII.	Logaritmos de "H" y "Qr"	93
XXXIII.	Comparación de caudales reales y generados con ecuación calibrada	96
XXXIV.	Comparación de caudales	98
XXXV.	Caudales en l/min	99

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
B	Ancho del canal de acceso al vertedero
Cd	Coeficiente de descarga
d	Distancia aguas arriba del vertedero para efectuar lecturas de carga
D	Diámetro
dA	Diferencial de área
dQ	Diferencial de caudal
e	Espesor del vertedero
g	Aceleración de la gravedad
H	Altura de carga alcanzada por el agua
K	Coeficiente
L	Cresta o borde horizontal del vertedero
n	Número de contracciones del vertedero
P	Presión
Q	Caudal
R	Radio
t	Tiempo
tan	Tangente
V	Volumen
W	Ancho de garganta del canal Parshall
θ	Ángulo teta

GLOSARIO

Aforar Medir la cantidad de agua que lleva una corriente en una unidad de tiempo.

Aforo Acción y efecto de aforar.

Canal Es un conducto en el que el líquido fluye con una superficie sometida a la presión atmosférica. El flujo se origina por la pendiente del canal y de la superficie del líquido.

Caudal Volumen de agua que pasa por unidad de tiempo por una sección normal determinada de una corriente líquida.

Contracción Disminución del área que experimenta la masa fluida, líquida o gaseosa, al salir por un orificio del recipiente en que está contenida.

Corriente Movimiento de traslación continua y permanente o accidental de las aguas de un canal, río o del mar, en dirección determinada.

Cresta Es el borde horizontal por donde fluye el agua.

Estructura Elemento o conjunto de ellos que forman parte resistente y sustentante de una construcción.

Fluido	Sustancia que se deforma continuamente al ser sometida a esfuerzos de corte.
Flujo	Movimiento de un fluido.
Presa	Muro que se construye en sentido transversal a la corriente de un río, para detener y embalsar el agua o derivar la fuerza de su cauce.
Presión	Fuerza normal ejercida por un cuerpo sobre otro, por unidad de superficie.
Rugosidad	Altura media de las asperezas de una tubería o conducto.
Vertedero	Dispositivo utilizado para regular y medir caudales en cauces de ríos y canales abiertos.

RESUMEN

Ante la importancia que representa para el estudiante de la Facultad de Ingeniería el conocimiento y el adquirir buen criterio al momento de seleccionar el mejor método para realizar aforos en proyectos hídricos, se presenta este trabajo de graduación, en el cual se enfatiza el estudio del correcto funcionamiento de los vertederos de pared delgada de distintas secciones geométricas, así como del canal tipo Parshall como dispositivos eficientes y precisos en la medición de caudales.

Además se detalla el diseño, la construcción, la instalación y el ensayo de vertederos de pared delgada, así como del canal Parshall en el laboratorio de Hidráulica. Esto como complemento a los conocimientos adquiridos de forma teórica, logrando una mayor comprensión al visualizar sus funcionamientos bajo condiciones reales.

Para ambos dispositivos se presenta la forma de encontrar las ecuaciones de calibración propias, al igual que las fórmulas teóricas que presentan algunos autores para la obtención de caudales. Contiene además la comparación de los resultados entre ambos métodos, obteniendo un mejor criterio sobre cuál utilizar.

Al final se presenta una propuesta para ser tomada en cuenta como instructivo de laboratorio cuando se realicen los ensayos utilizando estos medidores de caudal, conteniendo los lineamientos básicos para desarrollar cada práctica, concluyendo con la determinación de los resultados finales.

OBJETIVOS

- **GENERAL**

Presentar un documento con toda la información necesaria sobre vertederos de pared delgada y canal Parshall como instrumentos medidores de flujo en canales abiertos, para que pueda utilizarse como referencia en los cursos de Ingeniería Civil que abarquen este tema.

- **ESPECÍFICOS**

1. Construir cuatro vertederos de pared delgada (rectangular, trapezoidal, triangular y circular) y un canal tipo Parshall como dispositivos medidores de caudal, para ser utilizados en los ensayos de laboratorio de los cursos de Hidráulica e Hidráulica de Canales.

2. Conocer y aprender el uso de los vertederos de pared delgada y canal Parshall como dispositivos medidores de caudal en canales abiertos.

3. Determinar la relación entre caudal volumétrico y el tirante de agua en los vertederos, al comparar los resultados con las ecuaciones que proponen los libros de texto.

4. Encontrar la ecuación del canal Parshall mediante el proceso de calibración del mismo.

5. Proponer prácticas de laboratorio sobre medidores de flujo en canales abiertos para el laboratorio de Hidráulica e Hidráulica de Canales.

6. Obtener las ecuaciones para cada vertedero mediante la calibración de cada uno de ellos.

INTRODUCCIÓN

Desde tiempos ancestrales el ser humano ha tenido la necesidad de cuantificar el agua, para satisfacer sus necesidades de consumo y poder utilizar de forma eficiente sus recursos hídricos. Debido a esta necesidad se han inventado diferentes dispositivos que ayudan a medir el agua.

La Hidráulica cuenta con dispositivos que se utilizan para medir caudales en corrientes naturales y artificiales, para uso del ser humano como abastecimiento de agua y drenajes, así como de uso veterinario y en sistemas de riego en agricultura.

Dentro de los dispositivos más utilizados por su facilidad de construcción e instalación se pueden mencionar los vertederos y el canal Parshall, los cuales se diseñan y construyen para ser utilizados dentro de los ensayos de laboratorio de los cursos de Hidráulica e Hidráulica de Canales, a efecto de complementar la enseñanza experimental y práctica del estudiante acerca del correcto uso de cada uno de estos medidores de caudal, así como los límites de aplicación de éstos y la determinación de cada una de las ecuaciones de calibración que poseen, con lo cual se logrará una mejor comprensión de dichos dispositivos, al comparar los resultados obtenidos de forma experimental con los teóricos, adquiriendo un mejor criterio al decidir qué método o fórmula utilizar, dependiendo del grado de precisión que se desee obtener.

1. MEDICIÓN DE CAUDALES

1.1. Hidrometría

La Hidrometría es una de las partes más importantes de la Hidráulica, porque se ocupa de medir, registrar, calcular y analizar los volúmenes de agua que circulan en una sección transversal de un río, canal o tubería, por unidad de tiempo.

Se define la Hidrometría como la parte de la Hidráulica que tiene por objeto medir el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo dentro de una sección transversal de flujo.

Las determinaciones de caudal se realizan para diversos fines: sistemas de abastecimiento de agua, obras de riego, estudios de drenajes, instalaciones hidroeléctricas, etc.

1.1.1. Medición del agua

Es la cuantificación del caudal de agua que pasa por la sección transversal de un río, canal o tubería. También se le conoce como aforo.

La medición del agua resulta de la necesidad de brindar mayor control sobre su uso y distribución. Dicha medición se realiza a través de medidores de flujo, los cuales son dispositivos que utilizan diferentes principios mecánicos o físicos para permitir que un flujo de agua pueda ser cuantificado.

1.2. Instrumentos de medición de flujo en canales abiertos

Existen varias formas de aforo en canales abiertos, dentro de las principales se encuentran:

1) Método volumétrico
2) Vertederos
3) Canal Parshall
4) Método hidráulico

1.2.1. Método volumétrico

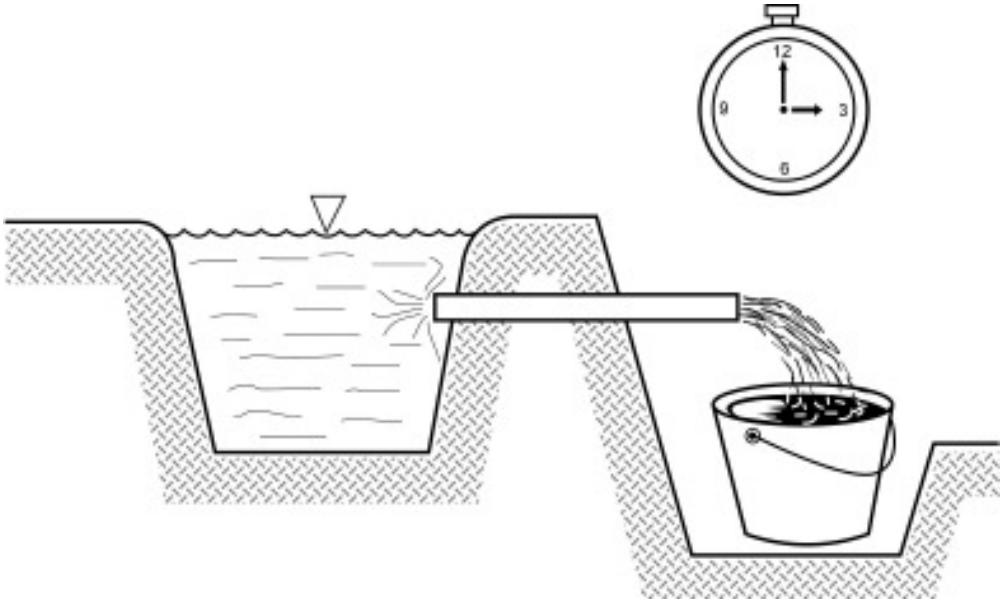
Se emplea por lo general para caudales muy pequeños y se requiere de un recipiente de un volumen conocido para colectar el agua. El caudal resulta de dividir el volumen de agua que se recoge en el recipiente entre el tiempo que transcurre en colectar dicho volumen.

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

Donde:

Q = Caudal (l/s)
V = Volumen (l)
t = Tiempo (s)

Figura 1. Aforo volumétrico



2. VERTEDEROS

2.1. Definición de vertederos

La medición del caudal de las corrientes naturales nunca puede ser exacta debido a que el canal suele ser irregular y por lo tanto es irregular la relación entre nivel y caudal. Los canales de corrientes naturales están también sometidos a cambios debidos a erosión o depósitos. Se pueden obtener cálculos más confiables cuando el caudal pasa a través de una sección donde esos problemas se han limitado.

Los vertederos pueden ser definidos como simples aberturas, sobre los cuales un líquido fluye. El término se aplica también a obstáculos en el paso de la corriente y a las excedencias de los embalses, ver figura 2.

Los vertederos son por así decirlo orificios sin el borde superior y ofrecen las siguientes ventajas en la medición del agua:

- Se logra con ellos precisión en los aforos
- La construcción de la estructura es sencilla
- No son obstruidos por materiales que flotan en el agua
- La duración del dispositivo es relativamente larga

Los vertederos son utilizados, intensiva y satisfactoriamente en la medición del caudal de pequeños cursos de agua y conductos libres, así como en el control del flujo en galerías y canales, razón por la cual su estudio es de gran importancia.

Figura 2. Vertedero fabricado con mampostería sobre río Segura, Murcia España

Fuente: www.chsegura.es

2.1.1. Terminología

CRESTA (**L**) Se denomina al borde horizontal, también llamado umbral.

CONTRACCIÓN Lo constituyen los bordes o caras verticales.

CARGA (**H**) Es la altura alcanzada por el agua a partir de la cresta del vertedero. Debido a la depresión de la lámina vertiente junto al vertedero, la carga H debe ser medida aguas arriba, a una distancia aproximadamente igual o superior a 4H (Fig. 4).

ANCHO (**B**) Ancho del canal de acceso al vertedero.

Figura 3. Partes del vertedero

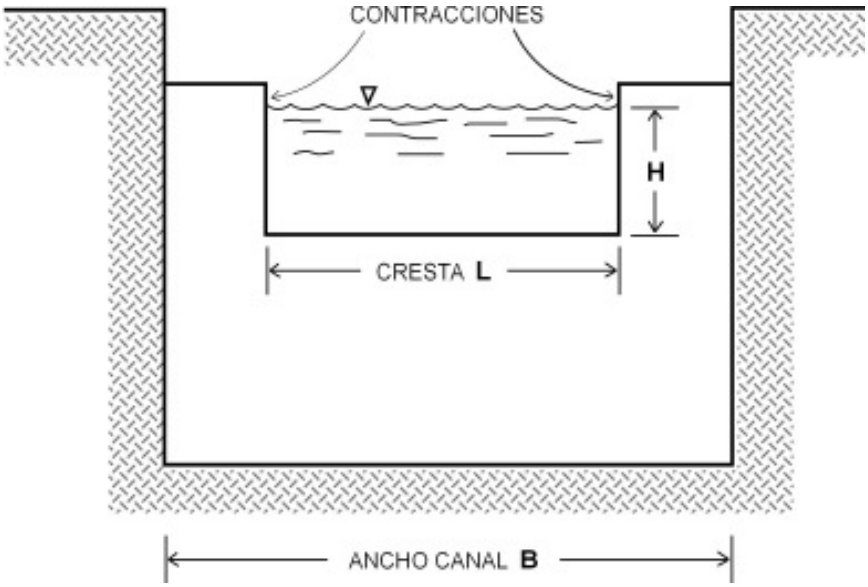
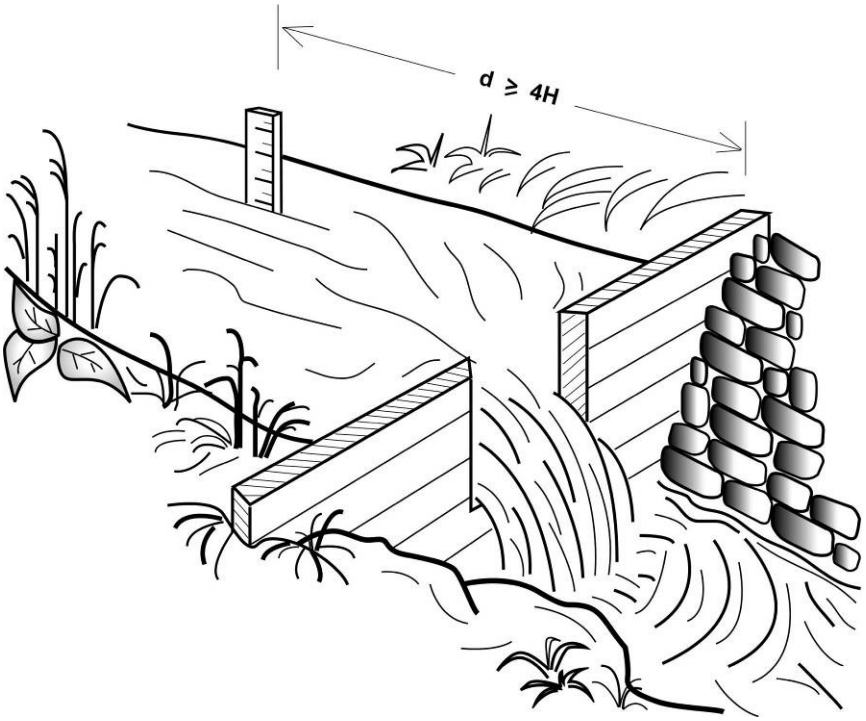


Figura 4. Vertedero en funcionamiento



2.2. Clasificación de los vertederos

Los vertederos presentan los más diversos comportamientos siendo muchos los factores que sirven de base para su clasificación:

1) FORMA:
   a) Simples: rectangulares, triangulares, etc.
   b) Compuestos: secciones combinadas como los trapezoidales.

2) ESPESOR DE LA PARED:
   a) Vertederos de pared delgada: fabricados de placas o madera biselada.
   b) Vertederos de pared gruesa: con **$e \geq 0.66H$**

3) LONGITUD DE LA CRESTA:
   a) Vertederos sin contracciones laterales: **$L = B$**
   b) Vertederos con contracciones: **$L < B$**

2.2.1. Vertederos de pared delgada

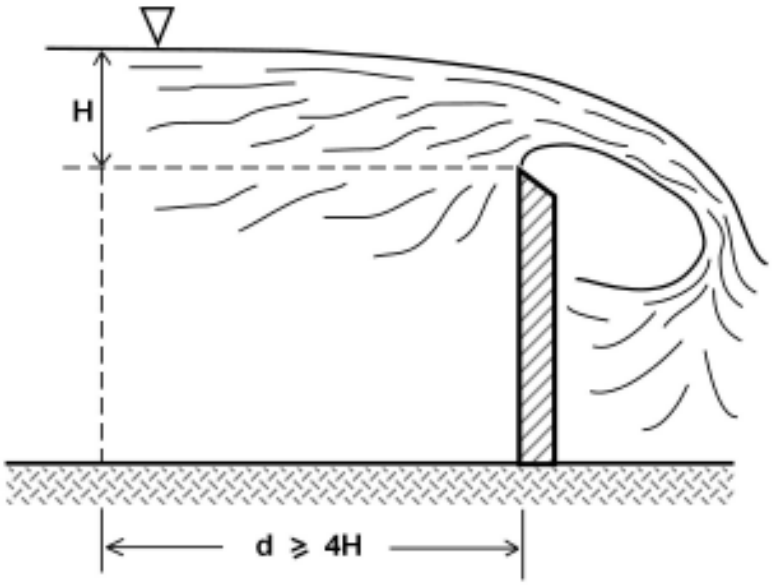
También conocidos como vertederos de cresta delgada o pared aguda. Son los vertederos construidos de una hoja de metal, de otro material de pequeño espesor o de madera biselada, de tal manera que el chorro salte con libertad conforme deja la cara aguas arriba del vertedero.

Debe haber una poza de amortiguación o un canal de acceso aguas arriba para calmar cualquier turbulencia y lograr que el agua se acerque al vertedero lenta y suavemente.

El vertedero debe tener el extremo agudo del lado aguas arriba para que la corriente fluya libremente.

El medidor de la altura de carga (H), debe instalarse detrás de la escotadura a una distancia mayor o igual a 4H para que no se vea afectado por la curva de descenso del agua a medida que se acerca a la misma.

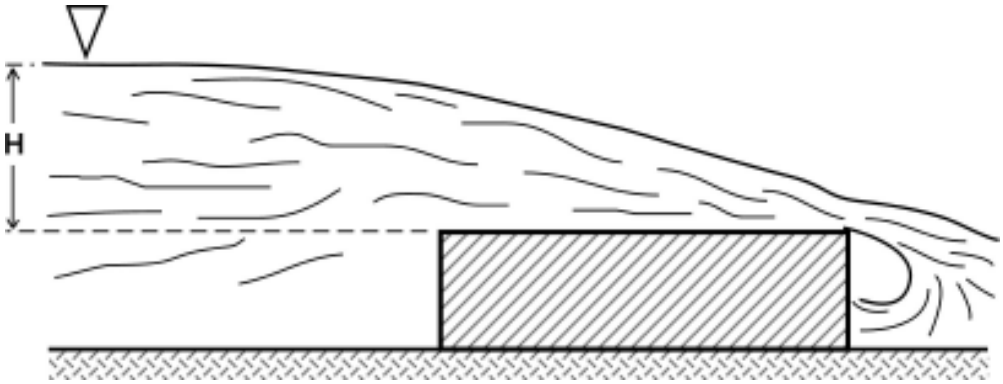
Figura 5. Vertedero de pared delgada



2.2.2. Vertederos de pared gruesa

También llamada vertedero de cresta ancha. Un vertedero es considerado de pared gruesa, cuando la cresta es suficientemente gruesa para que en la vena adherente se establezca el paralelismo de los filetes.

Figura 6. Vertedero de pared gruesa



2.3. Clasificación de los vertederos de pared delgada

Existen diferentes tipos de vertederos según la forma geométrica que se obligue a adoptar a la sección de la vena líquida que circula por la escotadura, siendo los más comunes:

a) RECTANGULAR
b) TRIANGULAR (Con escotadura en V)
c) TRAPEZOIDAL (También llamado vertedero de Cipolletti)
d) CIRCULAR

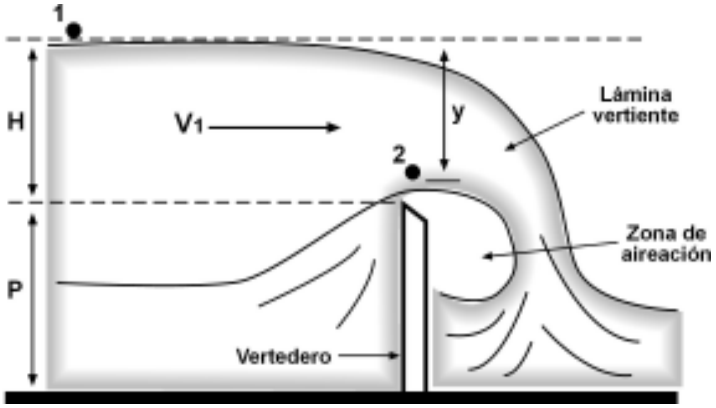
2.4. Ecuaciones para el cálculo de caudal para distintas secciones geométricas de vertederos

Para los vertederos de pared delgada, experimentalmente se han determinado varias ecuaciones para calcular el caudal que fluye por ellos. A continuación se presentan las más utilizadas.

2.4.1. Deducción de la fórmula general con caudal real y altura de carga para un vertedero de pared delgada

En la figura se muestra la descarga a través de un vertedero de cualquier forma geométrica, aplicando la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2 mostrados se tiene:

Figura 7. Perfil vertedero



$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{y} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{y} + Z_2$$

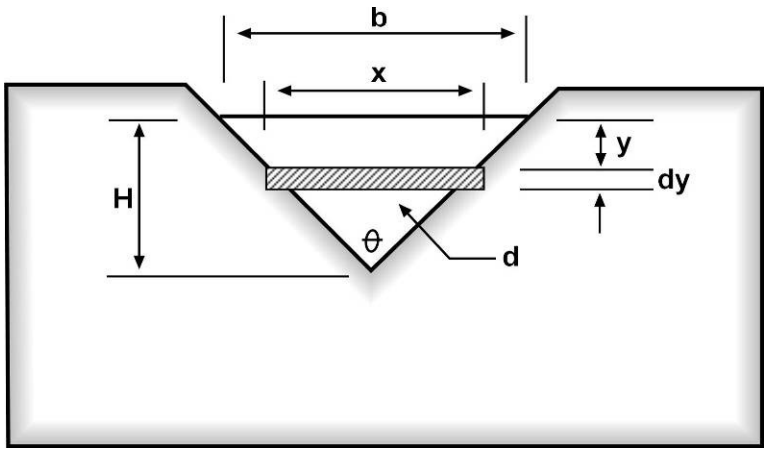
$V_1 \approx 0$ Dado que la velocidad en el punto 1 es pequeña al acercarse al vertedero y al elevarla al cuadrado en la ecuación, se obtiene una cantidad aún más pequeña.

$P_1 = P_2 = P_{atm}$ $\quad Z_1 = H + P$ y $Z_2 = H + P - y$

Sustituyendo y despejando: $H + P = \frac{V_2^2}{2g} + H + P - y \Longrightarrow \boxed{V_2 = \sqrt{2gy}}$

Donde V_2 es la componente vertical de la velocidad de una partícula en tiro parabólico.

Figura 8. Vertedero triangular de pared delgada



El caudal teórico, a través de un elemento diferencial de área de espesor **dy** mostrado en la figura 8, es de la forma:

$$dQ = V_2\, dy$$

Por semejanza de triángulos:

$$\frac{x}{b} = \frac{H - y}{H} \qquad Y \qquad b = 2\,H\ tg\ \frac{\theta}{2}$$

Luego: $$Q_{teórico} = 2\sqrt{2g}\ tg\ \frac{\theta}{2} \int_0^H (H - y)\, y^2\, dy$$

Integrando: $$Q_{teórico} = \frac{8}{15}\sqrt{2g}\ tg\ \frac{\theta}{2}\ H^{5/2}$$

Tomando en cuenta la contracción lateral y la tensión superficial el caudal teórico se reduce en cierta medida, por lo que se estima un coeficiente de descarga **Cd** para así obtener el caudal real:

$$Q_{real} = Cd\ Q_{teórico}$$

$$Q_{real} = Cd\ \frac{8}{15}\sqrt{2g}\ tg\frac{\theta}{2}\ H^{5/2}$$

Donde: $Q_{real} = m^3/s$

$H = m$

2.4.2. Vertedero rectangular

El vertedero rectangular es uno de los más sencillos para construir y por este motivo es uno de los más utilizados.

Es un vertedero con una sección de caudal en forma de rectángulo con paredes delgadas, de metal, madera o algún polímero resistente, con una cresta biselada o cortada en declive, a fin de obtener una arista delgada.

La precisión de la lectura que ofrece está determinada por su nivel de error que oscila entre un 3 y 5 %.

La ecuación más utilizada, según De Azevedo y Acosta en el Manual de Hidráulica, es la de Francis:

$$\boxed{Q = 1.84\ (L - (0.1\ n\ H))\ H^{3/2}} \qquad \text{EC.1}$$

Donde: Q = Caudal que fluye por el vertedero, en m^3/s

L = Ancho de la cresta, en m

H = Carga del vertedero, en m

n = Número de contracciones (0, 1, o 2)

2.4.2.1. Vertedero rectangular sin contracciones

Es un vertedero en el cual la longitud de la cresta (L) es igual al ancho del canal de acceso (B), por lo que teniendo un valor n = 0, la ecuación 1 queda de la siguiente forma:

$$\boxed{Q = 1.84\ L\ H^{3/2}} \qquad \text{EC.2}$$

Donde: Q = Caudal que fluye por el vertedero, en m^3/s

L = Ancho de la cresta, en m

H = Carga del vertedero, en m

Y efectuando la conversión en las unidades para obtener caudales en l/s se tiene:

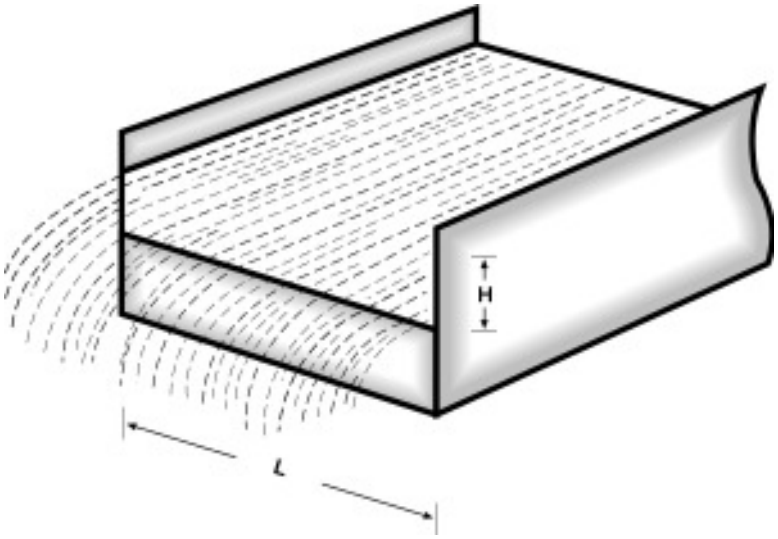
$$\boxed{Q = 0.0184\ L\ H^{3/2}}$$

Donde: Q = Caudal que fluye por el vertedero, en l/s

L = Ancho de la cresta, en cm

H = Carga del vertedero, en cm

Figura 9. Vertedero rectangular sin contracciones



2.4.2.2. Vertedero rectangular con dos contracciones

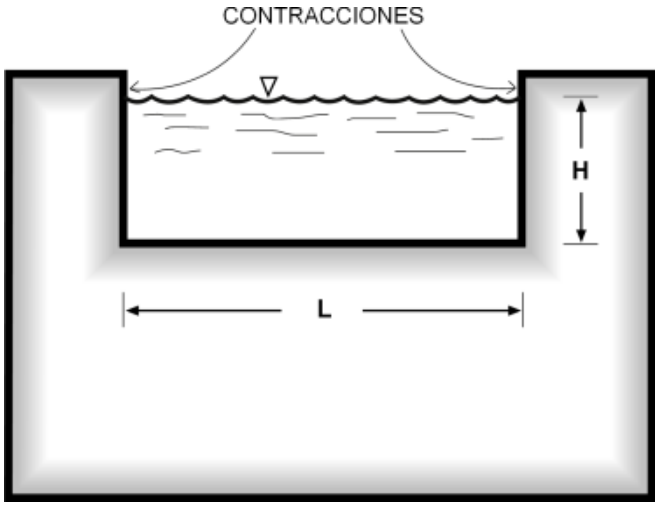
Este es un vertedero con una longitud de cresta (L) menor que el ancho del canal de acceso (B). Teniendo un valor de n = 2, la ecuación queda de la siguiente forma para caudales en m^3/s.

$$Q = 1.84\,(L - 0.2\,H)\,H^{3/2} \qquad \text{EC.3}$$

Efectuando la conversión para caudales en l/s:

$$Q = 0.0184\,(L - 0.2\,H)\,H^{3/2} \qquad \text{EC.4}$$

Figura 10. Vertedero rectangular con dos contracciones



2.4.3. Vertedero triangular

Los vertederos triangulares permiten obtener medidas más precisas de las alturas de carga (H) correspondientes a caudales reducidos. Por lo general son construidos de placas metálicas.

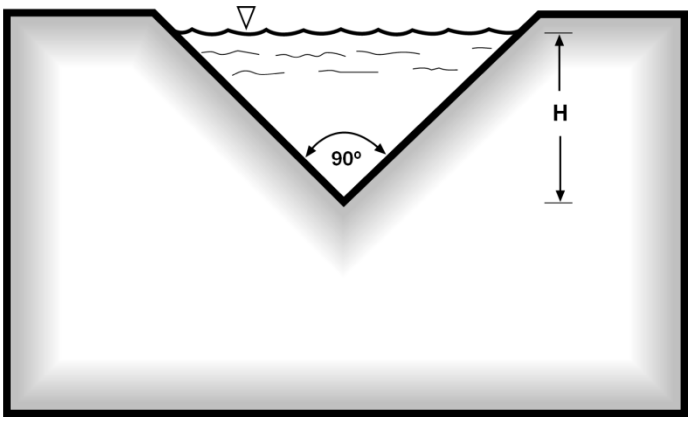
En la práctica únicamente se utilizan los que tienen forma isósceles, siendo los más usuales los de 90º. Para estos vertederos se adapta la fórmula de Thomson obteniendo caudales en m^3/s:

$$\boxed{Q = 1.4\ H^{5/2}} \qquad \text{EC.5}$$

Para obtener caudales en l/s se realiza la conversión a la fórmula descrita anteriormente:

$$\boxed{Q = 0.014\ H^{5/2}} \qquad \text{EC.6}$$

Figura 11. Vertedero triangular



2.4.4. Vertedero trapezoidal

Es un vertedero como su nombre lo indica con forma trapezoidal en su abertura, también conocido como vertedero Cipolletti en honor a su inventor, el Ingeniero italiano Cesare Cipolletti.

Cipolletti procuró determinar un vertedero que compensara el decrecimiento del caudal debido a las contracciones laterales por medio de las partes triangulares del vertedero, con la ventaja de evitar la corrección en los cálculos.

Para estas condiciones, el talud será **1:4** (1 horizontal para 4 vertical). Este vertedero es de construcción más dificultosa que los dos anteriores, razón por la cual es menos utilizado.

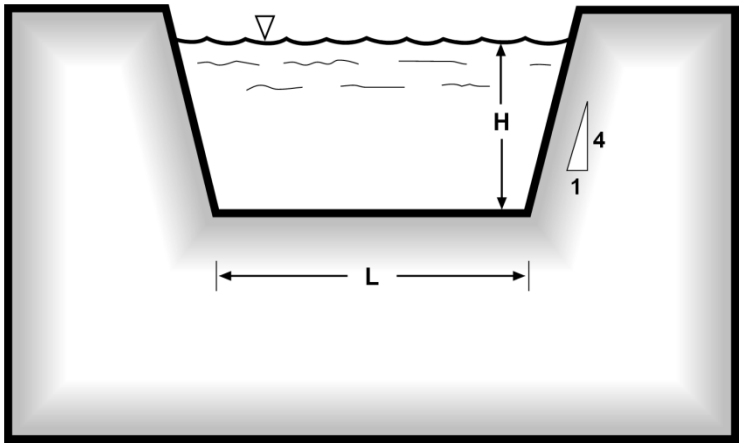
Para el cálculo del caudal se utiliza frecuentemente la fórmula de Francis para m^3/s.

$$\boxed{Q = 1.859\ L\ H^{3/2}} \qquad \text{EC.7}$$

Aplicando conversión para obtener caudales en l/s:

$$Q = 0.01859\ L\ H^{3/2} \qquad \text{EC.8}$$

Figura 12. Vertedero trapezoidal (Cipolletti)



2.4.5. Vertedero circular

Su utilización es menos común que los anteriores, presentando como ventajas: la facilidad en su construcción, así como no requerir el nivelamiento de su cresta debido a su forma geométrica.

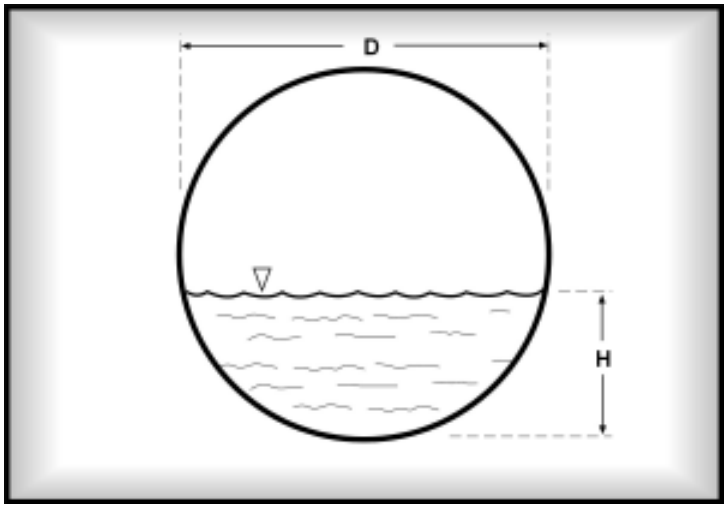
Para este tipo de vertederos De Azevedo y Acosta en el Manual de Hidráulica presenta la siguiente ecuación en unidades métricas, dando caudales en m^3/s.

$$Q = 1.518\ D^{0.693}\ H^{1.807} \qquad \text{EC.9}$$

Y al requerir caudales en l/s se tiene la siguiente fórmula:

$$Q = 0.01518\ D^{0.693}\ H^{1.807} \qquad \text{EC.10}$$

Figura 13. Vertedero circular



3. CANAL PARSHALL

3.1. Características del canal Parshall

El canal Parshall o también llamado medidor Parshall, es una estructura hidráulica que permite medir la cantidad de agua que pasa por una sección de un canal determinado. Es un medidor de régimen crítico, siendo idealizado por Ralph L. Parshall, ingeniero del servicio de irrigación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

Los medidores Parshall son identificados nominalmente por el ancho de su garganta, por ejemplo: un medidor Parshall de 9 pulg mide 0.23 m.

Figura 14. Ralph Parshall tomando medidas de flujo (1946)

Fuente: www.lib.colostate.edu

Para su fabricación, en los medidores Parshall se han utilizado muy diversos materiales, pudiéndose fabricar de láminas de metal o madera y recientemente de fibra de vidrio. También se pueden construir directamente sobre el terreno con el uso de elementos de mampostería como ladrillos y bloques de concreto y en algunos casos fundidos con concreto reforzado para mayor durabilidad.

Figura 15. Canal Parshall en funcionamiento

Fuente: www.dimensionambiental.blogspot.com

3.1.1. Partes del medidor Parshall

Consta de cuatro partes principales:

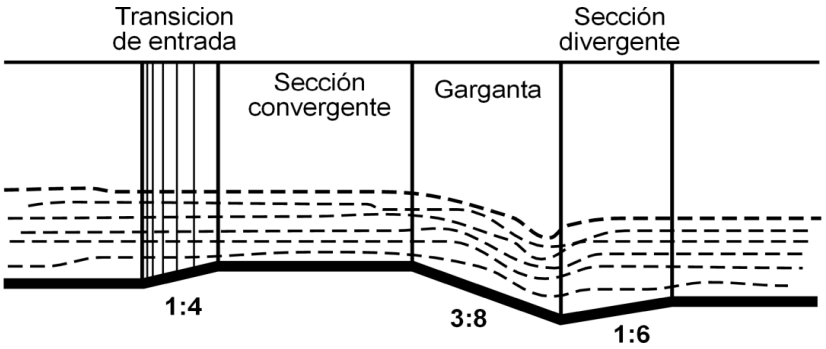
1. Transición de entrada
2. Sección convergente
3. Garganta
4. Sección divergente

En la transición de entrada es conveniente elevar el piso sobre el fondo original del canal, con una pendiente ascendente de **1:4** (1 vertical y 4 horizontal), hasta comenzar la sección convergente, con paredes que se van cerrando en línea recta o circular de radio (R), debido a que el aforador Parshall es una reducción de la sección del canal, que obliga al agua a elevarse o a remansarse para luego volver a descender hasta el nivel inicial sin el aforador.

En este proceso se presenta una aceleración del flujo que permite establecer una relación matemática entre la altura de carga o elevación que alcanza el agua y el caudal que circula a través del dispositivo.

- Para medidores menores a 1 pie o 30 cm (ancho de garganta) R = 0.41 m
- Para medidores de 1 a 3 pies, R = 0.51 m
- Para medidores de 4 a 8 pies, R = 0.61 m

Figura 16. Partes del medidor Parshall (perfil)



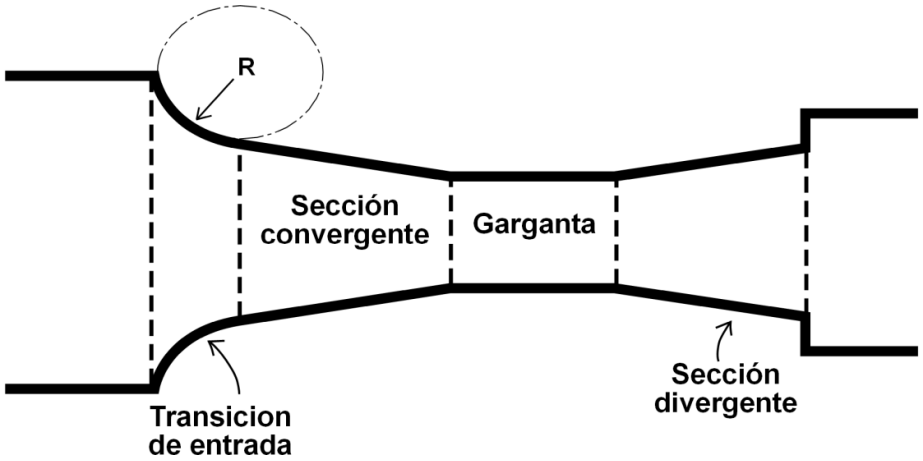
Fuente: J. M. De Azevedo y Guillermo Acosta, Manual de Hidráulica pág. 477

En la sección convergente, el fondo es horizontal y el ancho va disminuyendo.

En la garganta el piso vuelve a bajar con una pendiente de **3:8** (3 vertical y 8 horizontal), (ver figura 14).

En la sección divergente el piso sube nuevamente con pendiente de **1:6** (1 vertical y 6 horizontal), (ver figura 14).

Figura 17. Partes del medidor Parshall (planta)



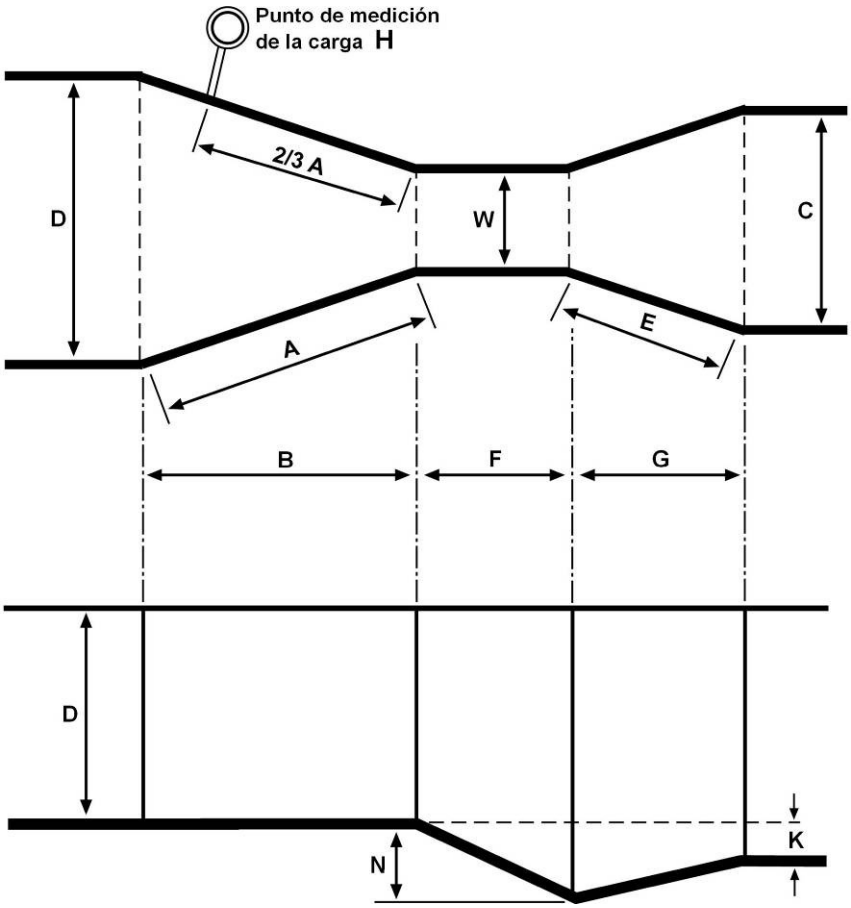
Fuente: J. M. De Azevedo y Guillermo Acosta, Manual de Hidráulica pág. 477

En cualquier parte del medidor Parshall, desde el inicio de la transición de entrada hasta la salida, el medidor tiene una sección rectangular.

3.1.2. Dimensiones del medidor Parshall

Los medidores menos empleados son los de 1 pulg (2.54 cm) de ancho de garganta y el mayor construido hasta hoy mide 50 pies (15.24 m) y tiene una capacidad para 85,000 l/s.

Figura 18. Dimensiones del medidor Parshall



Fuente: J. M. De Azevedo y Guillermo Acosta, Manual de Hidráulica pág. 471

La tabla I incluye las dimensiones típicas para los medidores hasta de 10 pies (3.05 m).

TABLA I. Dimensiones típicas de medidores Parshall en cm

W		A	B	C	D	E	F	G	K	N
1”	**2.5**	36.3	35.6	9.3	16.8	22.9	7.6	20.3	1.9	2.9
3”	**7.6**	46.6	45.7	17.8	25.9	38.1	15.2	30.5	2.5	5.7
6”	**15.2**	62.1	61.0	39.4	40.3	45.7	30.5	61.0	7.6	11.4
9”	**22.9**	88.0	86.4	38.0	57.5	61.0	30.5	45.7	7.6	11.4
1´	**30.5**	137.2	134.4	61.0	84.5	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
$1^1/_2$´	**45.7**	144.9	142.0	76.2	102.6	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
2´	**61.0**	152.5	149.6	91.5	120.7	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
3´	**91.5**	167.7	164.5	122.0	157.2	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
4´	**122.0**	183.0	179.5	152.5	193.8	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
5´	**152.5**	198.3	194.1	183.0	230.3	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
6´	**183.0**	213.5	209.0	213.5	266.7	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
7´	**213.5**	228.8	224.0	244.0	303.0	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
8´	**244.0**	244.0	239.2	274.5	340.0	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
10´	**305.0**	274.5	427.0	366.0	475.9	122.0	91.5	183.0	15.3	34.3

Fuente: J. M. De Azevedo y Guillermo Acosta, Manual de Hidráulica pág. 472

3.1.3. Usos del medidor Parshall

El medidor Parshall fue creado teniendo como objetivo principal la irrigación. Los de menor tamaño se usan para regular la descarga de agua distribuida a propiedades agrícolas y los de mayor tamaño se utilizan en grandes canales de riego.

Los medidores Parshall también se utilizan en estaciones de tratamiento para la inyección de sustancias químicas, aprovechando el resalto hidráulico.

La medición del caudal, tan necesaria en servicios de abastecimiento de agua, puede ser realizada fácilmente y con pequeño gasto económico si se utilizan los medidores de forma conveniente.

Su uso es remendado en canales principales, estaciones de tratamiento, entradas en depósitos, etc.

Figura 19. Canal Parshall en planta de tratamiento de agua potable

Fuente: www.imta.gob.mx

A continuación se presenta una tabla con los rangos de caudales en los que se recomienda operen de forma eficiente los canales Parshall, trabajando a descarga libre.

TABLA II. Rango de Caudales de operación en canales Parshall

Ancho de Garganta W		Caudal Q (l/s)	
pulg	**cm**	**Mínimo**	**Máximo**
3"	7.6	0.85	53.8
6"	15.2	1.52	110.4
9"	22.9	2.55	251.9
1'	30.5	3.11	455.6
$1^1/_2$'	45.7	4.25	696.2
2'	61.0	11.89	936.7
3'	91.5	17.26	1426.3
4'	122.0	36.79	1921.5
5'	152.5	62.8	2422.0
6'	183.0	74.4	2929.0
7'	213.5	115.4	3440.0
8'	244.0	130.7	3950.0
10'	305.0	200.0	5660.0

Fuente: J. M. De Azevedo y Guillermo Acosta, Manual de Hidráulica pág. 474

3.1.4. Puntos de medición

La única medida de carga **H** necesaria para conocer el caudal, se hace en la sección convergente, en un punto que se localiza a 2/3 de la dimensión **B** o a 2/3 de **A**.

En este punto se mide el tirante de agua con una regla o se instala junto a la pared una escala para lecturas. También se puede colocar un tubo o manguera comunicando el nivel del agua a un pozo lateral de medición, en donde se puede colocar una boya adherida a una varilla metálica que indique la altura o sirva como transmisión de un sistema eléctrico a distancia.

Los pozos laterales de medición pueden ser de sección circular con un diámetro igual a:

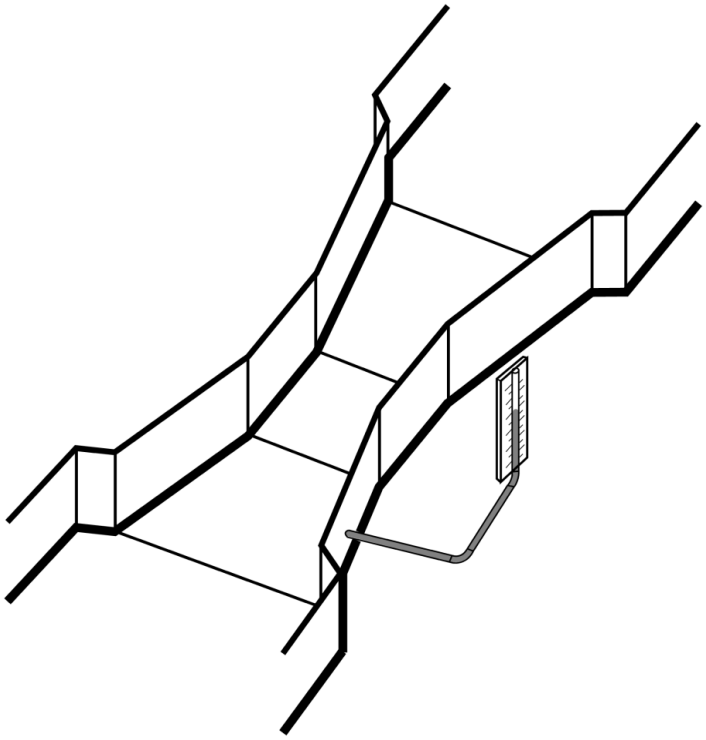
$$D = W + 0.15 \text{ (m)}$$

3.2. Teoría de los medidores de régimen crítico

Los medidores de régimen crítico pueden consistir en un simple estrechamiento adecuado de sección, en el rebajamiento o en la elevación del fondo o en una combinación de éstas, capaz de ocasionar el régimen crítico.

Existe una gran variedad de medidores de este tipo, siendo más conocidos los medidores Parshall. Los cuales son construidos por una sección convergente, una sección estrecha y una sección divergente.

Figura 20. Medidor Parshall



Como ya se indicó con anterioridad los medidores Parshall son muy utilizados en la medición de caudales en canales de riego y en algunos casos de aguas residuales. Esto por no presentar aristas u obstáculos que impidan el paso de la corriente líquida como los vertederos. Y por tener una pérdida de carga relativamente pequeña, su uso tiende a generalizarse.

Al estudiar de forma generalizada los canales, se comprueba que para determinadas condiciones existe en un canal un tirante límite estrechamente relacionado a los dos regímenes de flujo: el lento y el rápido, es el tirante crítico.

3.3. Ventajas de los medidores Parshall

Se puede mencionar como una de las principales ventajas la facilidad con la que pueden ser construidos, además presentan otras que tienen sus propias características hidráulicas, por ejemplo:

- Una sola medida o determinación de carga es suficiente para determinar el caudal.
- La pérdida de carga es mínima.
- El paso del flujo es libre y por lo tanto no presenta problemas de obstrucción con elementos arrastrados por la corriente.
- Al ser la velocidad de la garganta mayor que la velocidad de aproximación, no existe la posibilidad que ocurran sedimentaciones que afecten las mediciones.

3.4. Fórmulas y tablas para el cálculo del caudal en un medidor Parshall

Según experimentos y ensayos realizados utilizando canales Parshall se han obtenido ecuaciones para calcular el caudal de tipo potencial:

$$\boxed{Q = K H^{n}}$$

Y siendo el valor de "**n**" según ensayos, muy cercano a 3/2.

En la Tabla III se presentan los valores del coeficiente "**K**" para los sistemas métrico e inglés, así como los del exponente "**n**".

Por ejemplo para un canal Parshall con una garganta de ancho igual a 1 pie (0.305 m), la ecuación de caudal para el sistema métrico queda de la siguiente forma:

$$Q = 0.690\ H^{1.522}$$

Donde: $Q = m^3/s$

$H = m$

TABLA III. Valores de exponente "n" y coeficiente "K"

W		n	K	
S.I.	m.		unidades métricas	unidades inglesas
3"	0.076	1.547	0.176	0.992
6"	0.152	1.580	0.381	2.06
9"	0.229	1.530	0.535	3.07
1'	0.305	1.522	0.690	4.00
$1^1/_2$'	0.457	1.538	1.054	6.00
2'	0.610	1.550	1.426	8.00
3'	0.915	1.566	2.182	12.00
4'	1.220	1.578	2.935	16.00
5'	1.525	1.587	3.728	20.00
6'	1.830	1.595	4.515	24.00
7'	2.135	1.601	5.306	28.00
8'	2.440	1.606	6.101	32.00

Fuente: J. M. De Azevedo y Guillermo Acosta, Manual de Hidráulica pág. 476

En la Tabla IV se puede ver los caudales ya calculados para los medidores Parshall de dimensiones más utilizadas.

TABLA IV. Caudales en medidores Parshall en l/s

H (cm)	Ancho de Garganta W (pulg)							
	3"	6"	9"	1'	$1^1/_2$'	2'	3'	4'
3	0.8	1.4	2.5	3.1	4.2	---	---	---
4	1.2	2.3	4.0	4.6	6.9	---	---	---
5	1.5	3.2	5.5	7.0	10.0	13.8	20	---
6	2.3	4.5	7.3	9.9	14.4	18.7	27	35
7	2.9	5.7	9.1	12.5	17.8	23.2	34	45
8	3.5	7.1	11.1	14.5	21.6	28.0	42	55
9	4.3	8.5	13.5	17.7	26.0	34.2	50	66
10	5.0	10.3	15.8	20.9	30.8	40.6	60	78
11	5.8	11.6	18.1	23.8	35.4	46.5	69	90
12	6.7	13.4	24.0	27.4	40.5	53.5	79	105
13	7.5	15.2	23.8	31.0	45.6	60.3	93	119
14	8.5	17.3	26.6	34.8	51.5	68.0	101	133
15	9.4	19.1	29.2	38.4	57.0	75.5	112	149
16	10.8	21.1	32.4	42.5	63.0	83.5	124	165
17	11.4	23.2	35.6	46.8	69.0	92.0	137	182
18	12.4	25.2	38.8	51.0	75.4	100.0	148	198
19	13.5	27.7	42.3	55.2	82.2	109.0	163	216
20	14.6	30.0	45.7	59.8	89.0	118.0	177	235
25	20.6	42.5	64.2	83.8	125.0	167.0	248	331
30	27.4	57.0	85.0	111.0	166.0	221.0	334	446
35	34.4	72.2	106.8	139.0	209.0	280.0	422	562
40	42.5	89.5	131.0	170.0	257.0	345.0	525	700
45	51.0	107.0	157.0	203.0	306.0	414.0	629	840
50	---	---	185.0	240.0	362.0	486.0	736	990
55	---	---	214.0	277.0	418.8	563.0	852	1,144
60	---	---	243.0	314.0	478.3	642.0	971	1,308
65	---	---	---	356.0	543.4	730.0	1,110	1,490
70	---	---	---	402.0	611.3	821.0	1,249	1,684

Fuente: J. M. De Azevedo y Guillermo Acosta, Manual de Hidráulica pág. 476

4. ENSAYOS DE LABORATORIO CON VERTEDEROS DE PARED DELGADA

4.1. Diseño y construcción de vertederos para determinación de caudales

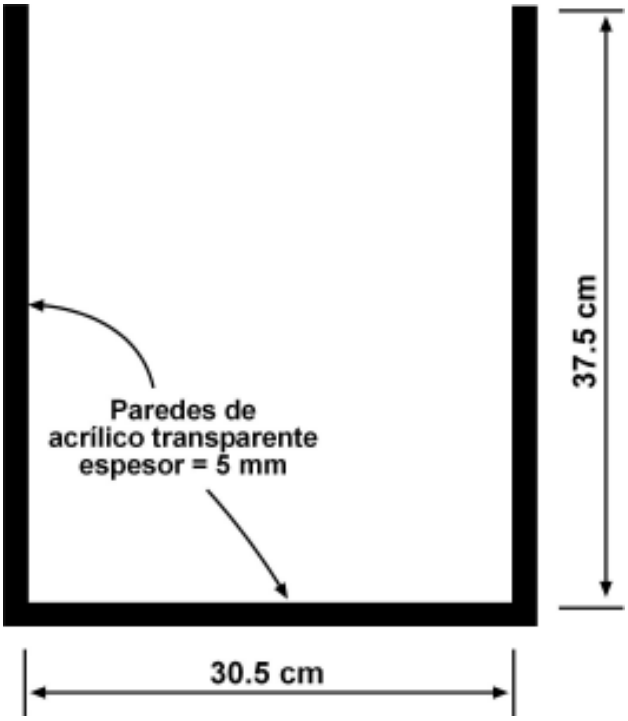
Como se indicó anteriormente, los vertederos son dispositivos hidráulicos que se emplean para determinación de caudales, permitiendo el paso del flujo que se desea medir a través de su escotadura con forma geométrica particular.

En los siguientes ensayos realizados en el laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, se utilizó el canal hidrodinámico abastecido de agua por medio de un sistema de bombeo.

Figura 21. Canal hidrodinámico del laboratorio de Hidráulica

El canal cuenta con una sección cuyas dimensiones internas se presentan en la Figura 16, y fue construido con láminas de acrílico transparente, con espesor igual a 5 mm, reforzado en vértices y uniones con una estructura de acero.

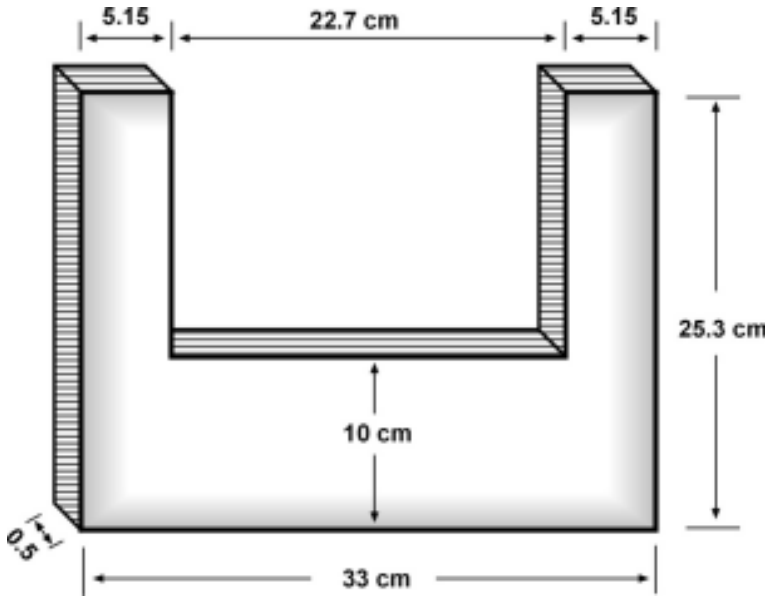
Figura 22. Sección canal hidrodinámico



4.1.1. Vertedero rectangular con dos contracciones

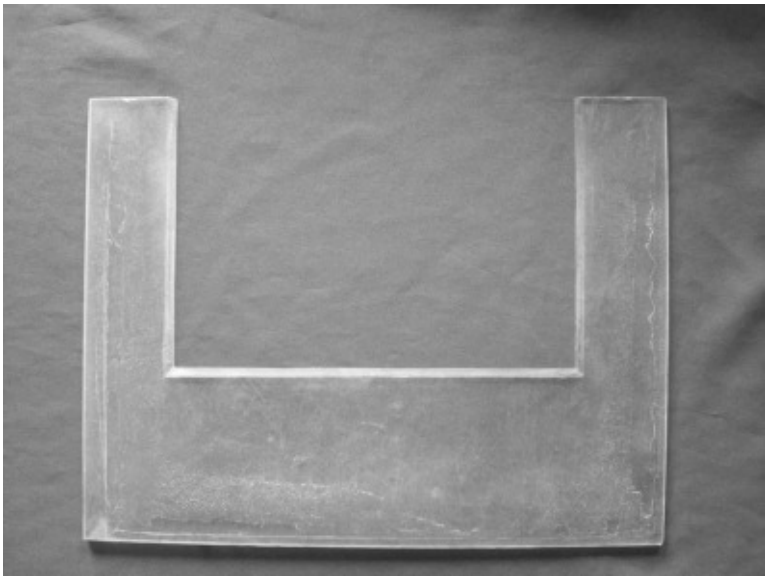
Se diseñó y fabricó un vertedero rectangular de pared delgada con dos contracciones, utilizando lámina de acrílico transparente, con espesor igual a 5 mm. Dimensiones obtenidas de acuerdo con el ancho del canal de llegada a utilizar y al volumen de agua estimado a circular a través de él.

Figura 23. Dimensiones vertedero rectangular con dos contracciones



Luego de efectuar el proceso de corte y biselado de la cresta del vertedero, se encuentra preparado para su utilización en el laboratorio donde será instalado dentro del canal para ser calibrado.

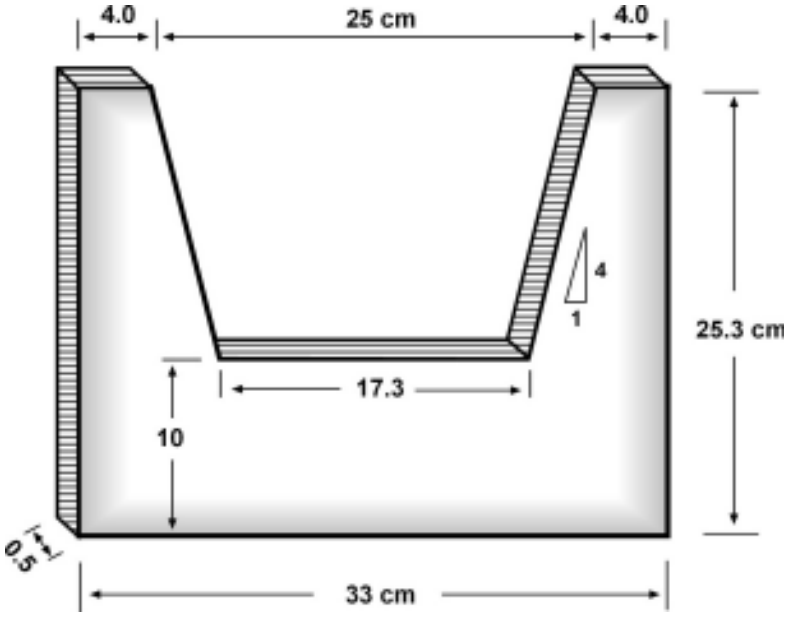
Figura 24. Vertedero rectangular fabricado



4.1.2. Vertedero trapezoidal o Cipolletti

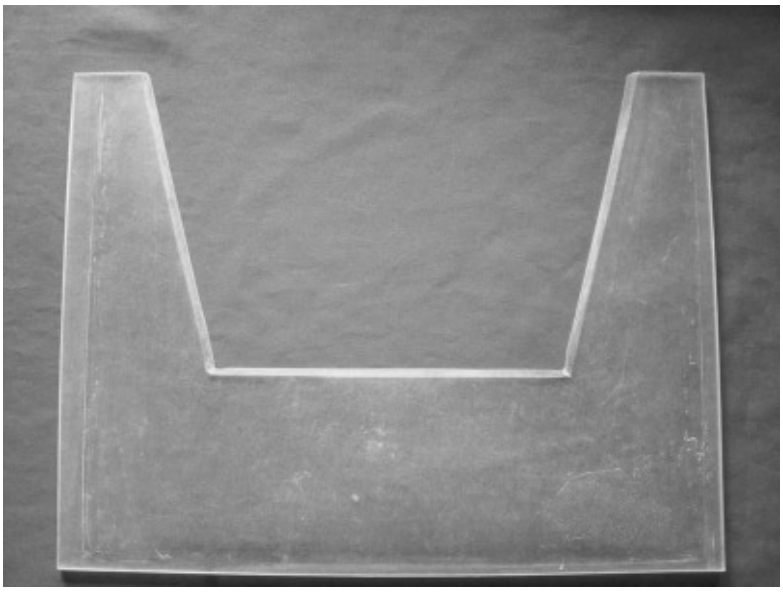
Al igual que el vertedero rectangular, el vertedero trapezoidal o también llamado vertedero Cipolletti fue diseñado con base en el caudal estimado a aforar en el laboratorio y fue construido con el mismo material (acrílico transparente, e = 5 mm) por su practicidad de construcción. Siguiendo las normas para su diseño, como por ejemplo el valor de la pendiente en sus paredes inclinadas (1/4).

Figura 25. Dimensiones vertedero trapezoidal o Cipolletti



Y luego de efectuar su elaboración, según diseño se obtiene el vertedero listo para ser ensayado.

Figura 26. Vertedero trapezoidal fabricado

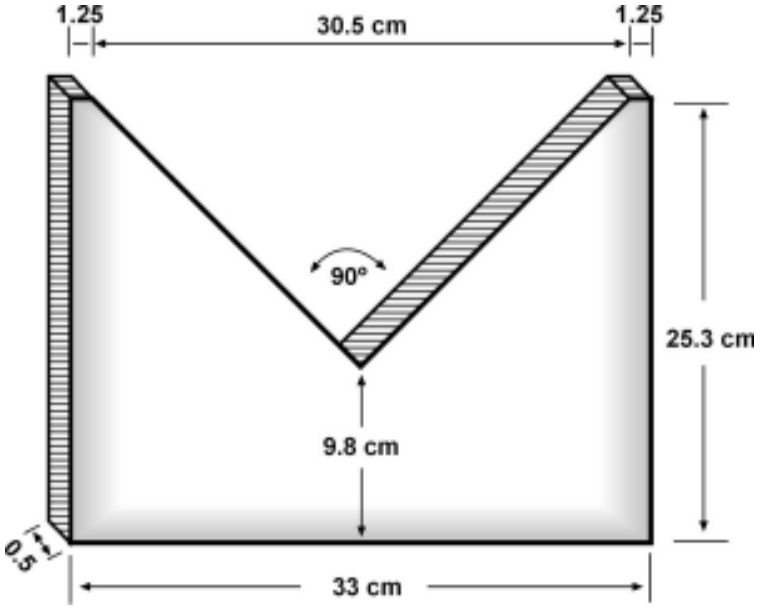


4.1.3. Vertedero triangular

Para el ensayo con el vertedero triangular, se fabricó el mismo utilizando acrílico transparente, con un espesor de 5 mm. Con las dimensiones indicadas en la figura 27, se realizan los cortes del material con una cuchilla especial y ajustando tanto los bordes como la orilla biselada del vertedero con el uso de esmeril de banco.

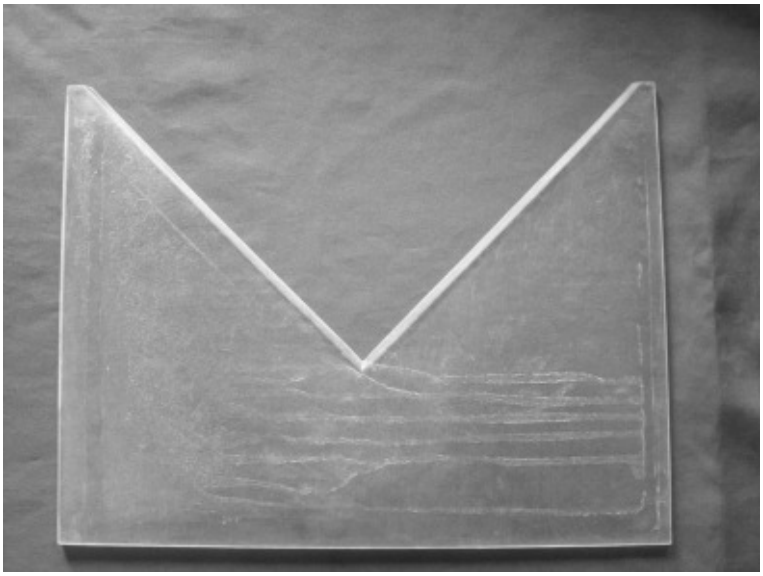
Las dimensiones del vertedero fueron estimadas en función al ancho del canal hidrodinámico, al caudal estimado que puede circular a través de éste y el ángulo utilizado de 90º, se designó por ser éste uno de los más prácticos y funcionales para su fabricación, siendo de los más utilizados.

Figura 27. Dimensiones vertedero triangular



Al realizar el corte, acabado y biselado con las dimensiones expuestas anteriormente, se obtiene el vertedero triangular listo para su montaje y ensayo en el laboratorio.

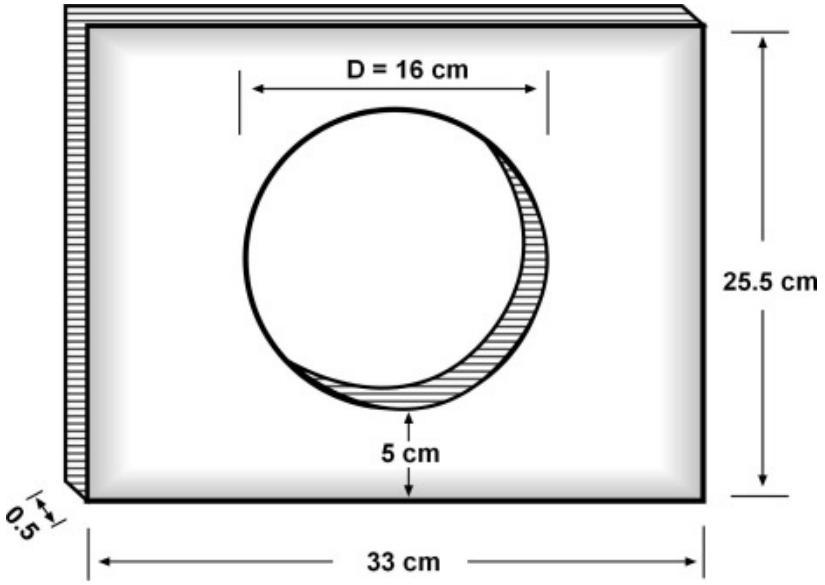
Figura 28. Vertedero triangular fabricado



4.1.4. Vertedero circular

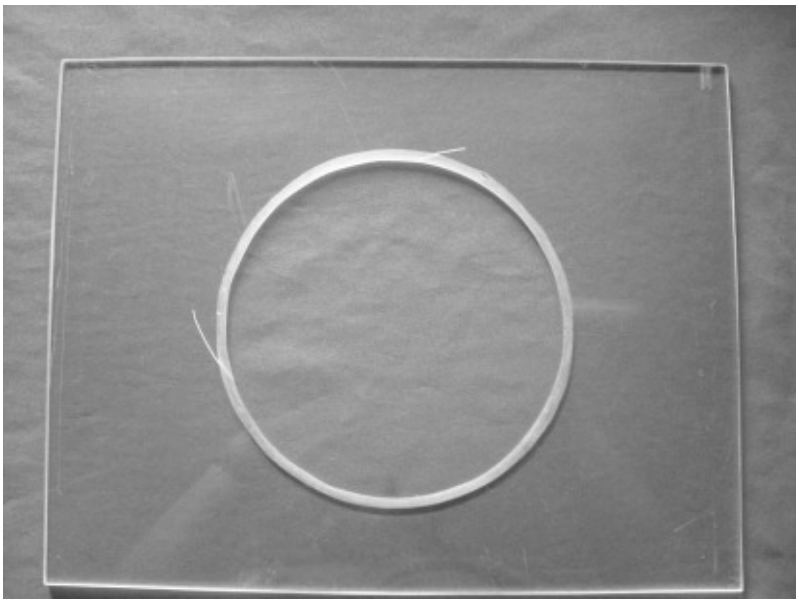
Al igual que los vertederos anteriormente descritos, el circular fue diseñado en proporción al caudal a medir dentro del canal hidrodinámico en el laboratorio y su fabricación también fue similar en cuanto al material utilizado, siendo éste acrílico transparente, con un espesor igual a 5 mm. Este vertedero se diseñó con una circunferencia de diámetro con valor de 16 cm y también se biseló el perímetro para evitar cualquier irregularidad en el flujo que se deberá aforar.

Figura 29. Dimensiones vertedero circular



Y luego del proceso de diseño y fabricación se puede apreciar en la siguiente figura como queda el vertedero circular ya terminado y listo para poder ser calibrado y ensayado en el laboratorio.

Figura 30. Vertedero circular fabricado



4.2. Calibración de vertederos y obtención de fórmulas experimentales

4.2.1. Calibración de vertedero rectangular con dos contracciones y cálculo de ecuación experimental

Este ensayo se realiza utilizando el banco hidráulico con que cuenta el laboratorio, el cual incluye el canal hidrodinámico, el sistema de abastecimiento de agua por medio de bombeo y el tanque para efectuar los aforos volumétricos.

4.2.1.1. Realización del ensayo

Fijar el vertedero rectangular utilizando silicón como adhesivo y sellador para evitar filtraciones en sus bordes que pudieran afectar las lecturas.

Medir la distancia **d ≥ 4H,** donde se deberán tomar las alturas de carga para realizar los cálculos, distancia que tiene un valor de **d = 61 cm**.

Encender la bomba que suministra de agua el canal hasta llegar al nivel de la cresta, altura de carga que se denominará **Ho**, a partir de la cual se empezarán a tomar lecturas, haciendo la observación que las válidas serán las que presenten zona aireada bajo la lámina vertiente.

Realizar 10 lecturas de carga **H** y en cada lectura se efectúan 2 aforos volumétricos, midiendo el volumen en el tanque de aquietamiento al final del canal y tomando lectura de los tiempos de llenado, utilizando un cronómetro.

Figura 31. Vertedero rectangular con dos contracciones en funcionamiento

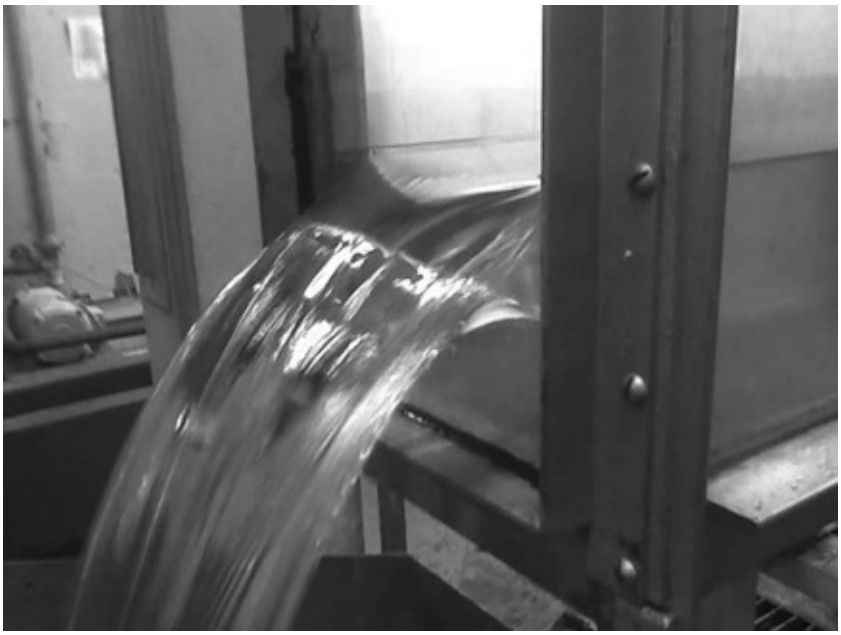


TABLA V. Datos obtenidos en ensayo con vertedero rectangular

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)
1.9	441.78	422.10	451.87	413.00
3.0	216.28	413.00	219.75	410.80
4.3	121.50	410.80	124.64	410.80
5.5	82.84	417.40	83.70	424.60
6.6	62.62	417.40	65.40	471.40
7.7	49.56	429.60	49.70	432.20
8.7	40.31	424.60	40.67	440.40
10.3	31.65	478.20	31.78	478.20
11.6	26.50	492.70	26.64	496.40
12.8	22.31	485.30	22.90	504.10

4.2.1.2. Obtención de resultados

Con los datos obtenidos en el ensayo, se procede a calcular los dos caudales por el método volumétrico de aforo, para cada altura; y luego se calcula el promedio de ambos que será el caudal real experimental.

$$Q_{real} = V / t$$

Donde:

Q_{real} = l/s

V = l

t = s

TABLA VI. Caudales reales

H (cm)	Qr1 (l/s)	Qr2 (l/s)	<Qr> (l/s)
1.9	0.9555	0.9140	0.9347
3.0	1.9096	1.8694	1.8895
4.3	3.3811	3.2959	3.3385
5.5	5.0386	5.0729	5.0558
6.6	6.6656	7.2080	6.9368
7.7	8.6683	8.6962	8.6822
8.7	10.5334	10.8286	10.6810
10.3	15.1090	15.0472	15.0781
11.6	18.5925	18.6336	18.6130
12.8	21.7526	22.0131	21.8828

La ecuación para este tipo de medidores de caudal experimentalmente es del tipo exponencial, representada por:

$$\boxed{\mathbf{Q} = \mathbf{K}\,\mathbf{H}^{\mathbf{n}}}$$

En la cual se conocen los valores de **H** y se necesitan encontrar los de **K** y **n**, los cuales se calculan aplicando logaritmos a la ecuación:

$$\log \mathbf{Q} = \log \mathbf{K} + \mathbf{n} \log \mathbf{H}$$

sustituyendo: $\boxed{Y = m\,X + b}$ $\Longrightarrow$ Ec. Recta

Donde:

$$Y = \log \mathbf{Q}$$
$$m = \mathbf{n}$$
$$X = \log \mathbf{H}$$
$$b = \log \mathbf{K}$$

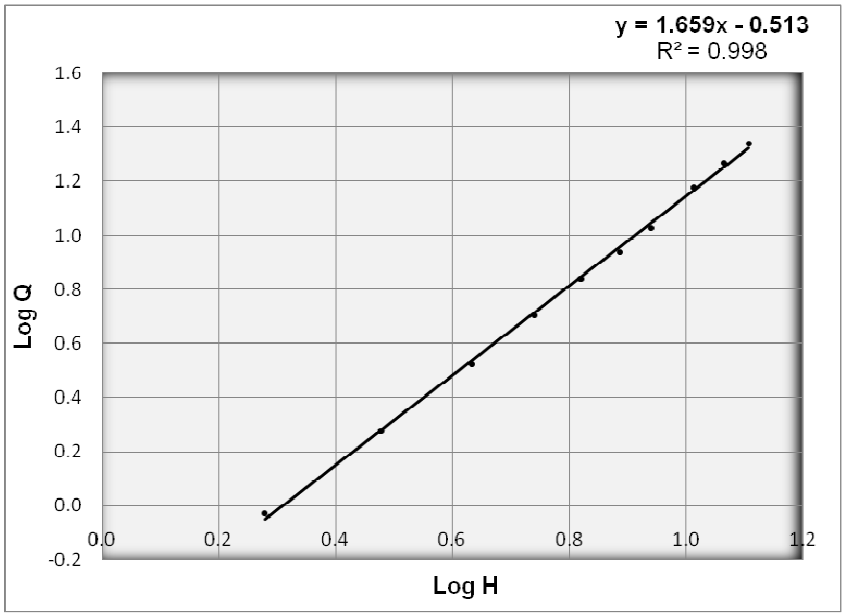
Aplicando logaritmos a los caudales reales y las alturas **H**:

TABLA VII. Logaritmos de caudales reales y alturas

H (cm)	Log H	Log Q	Qr = V/t (l/s)
1.9	0.2788	-0.0293	0.9347
3.0	0.4771	0.2763	1.8895
4.3	0.6335	0.5235	3.3385
5.5	0.7404	0.7038	5.0558
6.6	0.8195	0.8412	6.9368
7.7	0.8865	0.9386	8.6822
8.7	0.9395	1.0286	10.6810
10.3	1.0128	1.1783	15.0781
11.6	1.0645	1.2698	18.6130
12.8	1.1072	1.3401	21.8828

Luego se genera la gráfica de logaritmos, en la cual se agrega una línea de tendencia que brindará la ecuación de la recta, obteniendo de ella el valor de **n**.

Figura 32. Gráfica logaritmos de caudal real y alturas H



De la ecuación de la recta, se obtiene: **n** = 1.65

entonces: $\mathbf{K} = \log^{-1}(-0.513) = 0.306$

Al encontrar los valores de **K** y **n** se tiene la ecuación generada especifica para el vertedero rectangular con dos contraciones ensayado.

$$\boxed{\mathbf{Q_{generado} = 0.306\ H^{1.659}}}$$ Ec. calibración

Donde: $\mathbf{Q_{generado}}$ = l/s

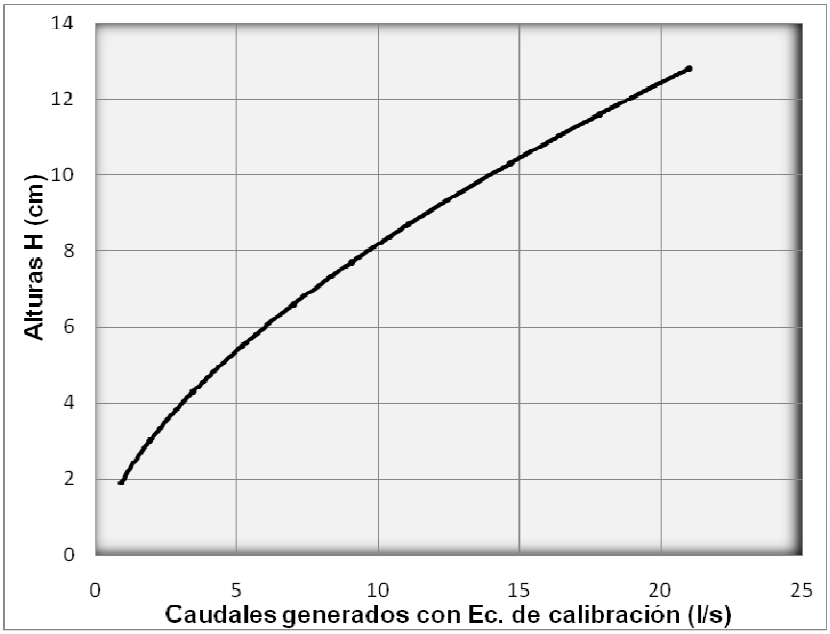
$\mathbf{H}$ = cm

Con la ecuación de calibración ya definida se calculan los caudales generados y se comparan con los reales, a la vez que se estima el porcentaje de error entre ambos y se presenta la curva de calibración propia de este vertedero.

TABLA VIII. Caudales reales y generados con ecuación de calibración

H (cm)	Qr = V/t (l/s)	Qgenerado con Ec. Calibrada (l/s)	error (%)
1.9	0.9347	0.8875	5.32
3.0	1.8895	1.8935	0.21
4.3	3.3385	3.4407	2.97
5.5	5.0558	5.1759	2.32
6.6	6.9368	7.0040	0.96
7.7	8.6822	9.0450	4.01
8.7	10.6810	11.0760	3.57
10.3	15.0781	14.6561	2.88
11.6	18.6130	17.8508	4.27
12.8	21.8828	21.0176	4.12

Figura 33. Curva de calibración



4.2.1.3. Cálculo del caudal real con fórmula del Manual de Hidráulica

Para encontrar el caudal real en vertederos rectangulares con contracciones, se aplica la ecuación:

$$Q_{real} = Cd \; Q_{teórico}$$

El Manual de Hidráulica presenta la siguiente ecuación para hallar el caudal teórico:

$$Q_{teórico} = 1.84 \, (L - 0.1 \, n \, H) \, H^{3/2}$$

Donde: $Q_{teórico}$ = m^3/s

L = m

H = m

n = número de contracciones laterales

Sustituyendo valores para un vertedero con dos contracciones y haciendo la conversión:

$$\mathbf{Q_{teórico} = 0.0184\ (L - 0.2\ H)\ H^{3/2}}$$

Donde: $Q_{teórico}$ = l/s

L = cm = **22.7 cm**

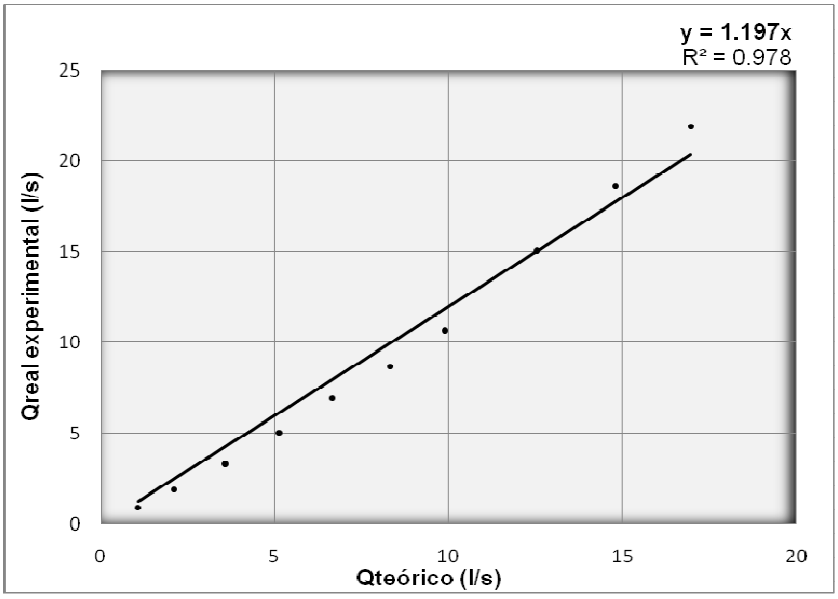
H = cm

Para encontrar el coeficiente de descarga, primero se calculan los caudales teóricos y se grafica la recta que existe entre éstos y los caudales reales experimentales, agregando una línea de tendencia que brindará la ecuación de la recta, donde se obtendrá el coeficiente de descarga para sustituirlo en la ecuación general y así encontrar los caudales reales teóricos.

TABLA IX. Caudales real experimental y teórico

H (cm)	Qr = V/t (l/s)	Qteórico Manual Hid. (l/s)
1.9	0.9347	1.0756
3.0	1.8895	2.1130
4.3	3.3385	3.5832
5.5	5.0558	5.1264
6.6	6.9368	6.6702
7.7	8.6822	8.3190
8.7	10.6810	9.8966
10.3	15.0781	12.5540
11.6	18.6130	14.8153
12.8	21.8828	16.9704

Figura 34. Gráfica determinación del coeficiente de descarga



El coeficiente de descarga será: **Cd = 1.197**

Quedando la ecuación completa de la siguiente forma:

$$\mathbf{Q_{real} = (1.197) * 0.0184 * (L - 0.2\ H) * H^{3/2}}$$

Donde:

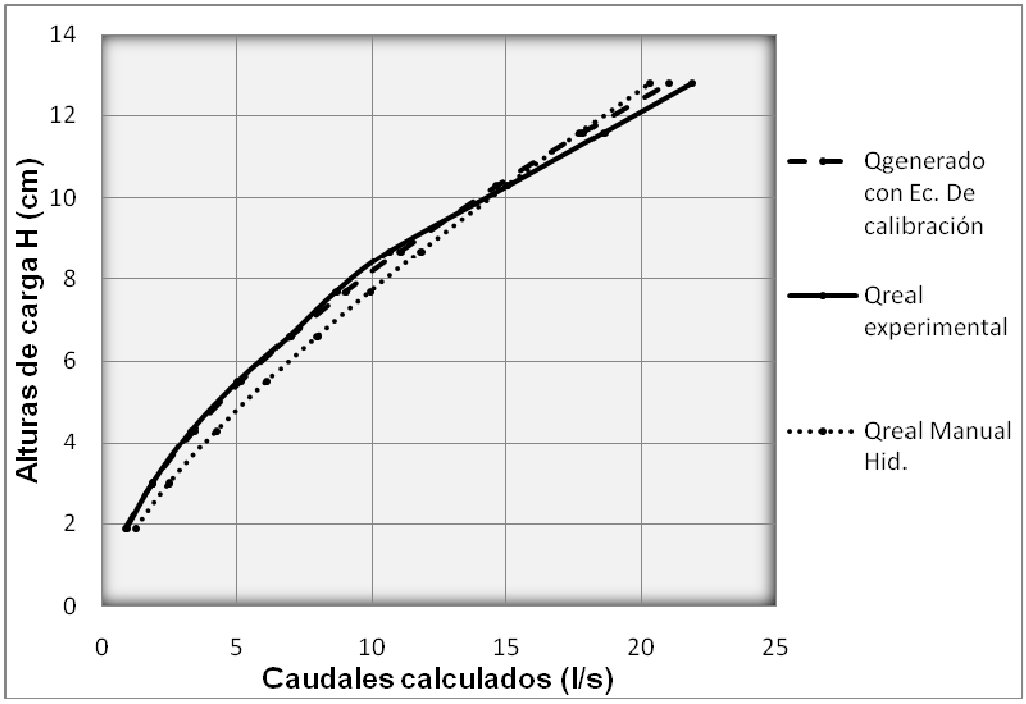
Q_{real}	=	l/s		
L	=	cm	=	**22.7 cm**
H	=	cm		

Para finalizar se comparan los resultados obtenidos al mismo tiempo que se genera la gráfica respectiva.

TABLA X. Comparación de caudales

H (cm)	Qr = V/t (l/s)	Qgenerado con Ec. Calibrada (l/s)	Qreal Manual Hid. (l/s)
1.9	0.9347	0.8875	1.2875
3.0	1.8895	1.8935	2.5292
4.3	3.3385	3.4407	4.2891
5.5	5.0558	5.1759	6.1363
6.6	6.9368	7.0040	7.9843
7.7	8.6822	9.0450	9.9578
8.7	10.6810	11.0760	11.8463
10.3	15.0781	14.6561	15.0272
11.6	18.6130	17.8508	17.7339
12.8	21.8828	21.0176	20.3136

Figura 35. Comparación de caudales



4.2.2. Calibración de vertedero trapezoidal (Cipolletti) y cálculo de ecuación experimental

El ensayo con el vertedero trapezoidal o Cipolletti se realizó en el canal hidrodinámico del laboratorio, instalándolo al final de éste para obtener una descarga libre del caudal y fijándolo en su posición por medio de silicón, el cual es muy útil ya que es bastante flexible y a la vez garantiza que las juntas sean impermeables.

4.2.2.1. Realización del ensayo

El ensayo con el vertedero trapezoidal sigue el mismo procedimiento efectuado con el vertedero rectangular, detallado en el inciso 4.2.1.1.

Figura 36. Vertedero trapezoidal en funcionamiento

TABLA XI. Datos obtenidos en ensayo con vertedero trapezoidal

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)
1.3	1046.64	378.70	1053.15	380.70
2.8	318.64	422.10	344.07	449.10
4.0	186.01	434.90	190.98	443.30
5.4	109.37	434.90	110.89	437.60
6.6	79.46	446.10	81.42	449.10
8.2	56.86	489.00	57.70	496.40
9.5	44.42	471.40	44.39	474.80
11.2	33.53	504.10	33.70	508.00
12.9	25.51	500.20	25.45	496.40
14.6	21.34	516.00	20.89	512.00

4.2.2.2. Obtención de resultados

El proceso para la determinación de caudales con el vertedero trapezoidal, es similar al efectuado con anterioridad, en el inciso 4.2.1.2.

TABLA XII. Caudales reales

H (cm)	Qr1 (l/s)	Qr2 (l/s)	<Qr> (l/s)
1.3	0.3618	0.3615	0.3617
2.8	1.3247	1.3053	1.3150
4.0	2.3380	2.3212	2.3296
5.4	3.9764	3.9463	3.9613
6.6	5.6141	5.5158	5.5650
8.2	8.6001	8.6031	8.6016
9.5	10.6123	10.6961	10.6542
11.2	15.0343	15.0742	15.0542
12.9	19.6080	19.5049	19.5565
14.6	24.1799	24.5093	24.3446

Como para la mayoría de medidores de caudal, la ecuación para éste vertedero es del tipo exponencial:

$$Q = K H^{n}$$

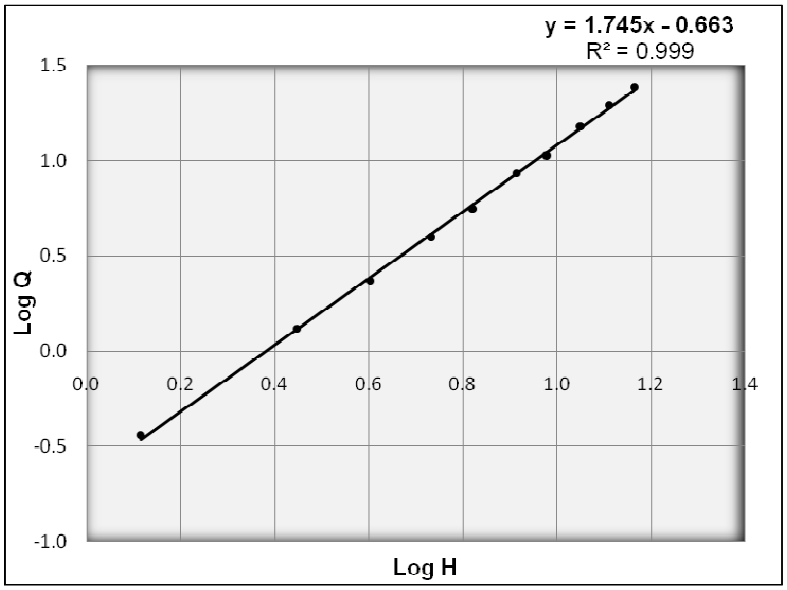
Aplicando logaritmos:

TABLA XIII. Logaritmos de alturas y caudales reales

H (cm)	Log H	Log Q	Qr = V/t (l/s)
1.3	0.1139	-0.4417	0.3617
2.8	0.4472	0.1189	1.3150
4.0	0.6021	0.3673	2.3296
5.4	0.7324	0.5978	3.9613
6.6	0.8195	0.7455	5.5650
8.2	0.9138	0.9346	8.6016
9.5	0.9777	1.0275	10.6542
11.2	1.0492	1.1777	15.0542
12.9	1.1106	1.2913	19.5565
14.6	1.1644	1.3864	24.3446

Seguidamente se dibuja la grafica que relaciona los logaritmos de la altura **H** y al caudal **Qr**, en la cual se agrega una línea de tendencia para hallar la ecuación de la recta que brinda el valor de **n**.

Figura 37. Gráfica logaritmos de caudal real y alturas H



En la ecuación de la recta se encuentra el valor de $\mathbf{n} = 1.745$

y despejando: $\mathbf{K} = \log^{-1}(-0.663) = 0.217$

Con ello se puede definir la ecuación generada particular de éste vertedero:

$$\boxed{\mathbf{Q_{generado} = 0.217\ H^{1.745}}}$$ Ec. calibración

Donde: $\mathbf{Q_{generado}}$ = l/s

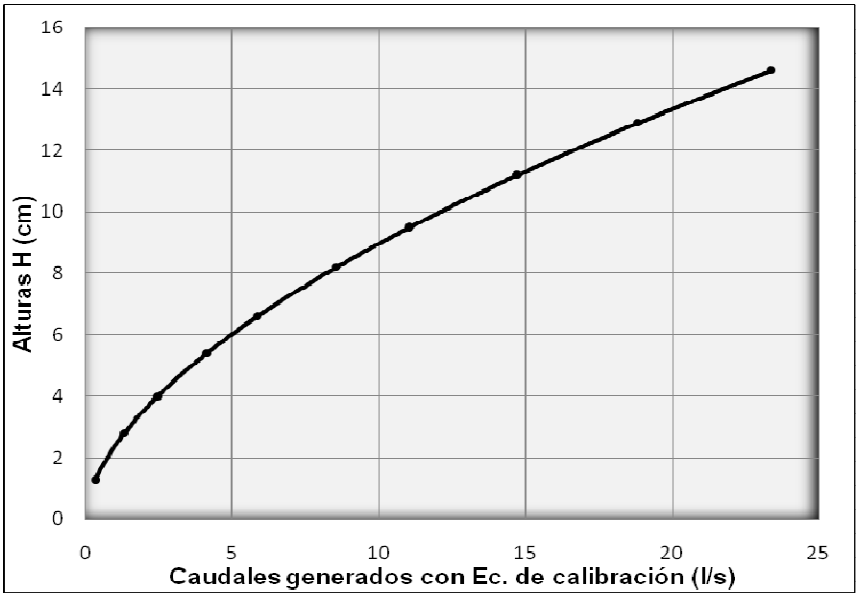
$\mathbf{H}$ = cm

Al haber encontrado la ecuación generada específica para el vertedero trapezoidal, se calculan los caudales generados con ella y se comparan los resultados con los obtenidos experimentalmente en el ensayo, así como el porcentaje de error entre ambos y por último se presenta la curva de calibración propia de este vertedero.

TABLA XIV. Caudales reales y generados con ecuación de calibración

H (cm)	Qr = V/t (l/s)	Qgenerado con Ec. Calibrada (l/s)	error (%)
1.3	0.3617	0.3430	5.44
2.8	1.3150	1.3084	0.50
4.0	2.3296	2.4381	4.45
5.4	3.9613	4.1161	3.76
6.6	5.5650	5.8420	4.74
8.2	8.6016	8.5323	0.81
9.5	10.6542	11.0303	3.41
11.2	15.0542	14.7009	2.40
12.9	19.5565	18.8122	3.96
14.6	24.3446	23.3483	4.27

Figura 38. Curva de calibración



4.2.2.3. Cálculo del caudal real con fórmula del Manual de Hidráulica

Para calcular el caudal real en vertederos trapezoidales, se aplica la ecuación:

$$Q_{real} = Cd \; Q_{teórico}$$

Así mismo el manual de Hidráulica presenta la ecuación para el cálculo del caudal teórico:

$$Q_{teórico} = 1.859 \; L \; H^{3/2}$$

Donde: $Q_{teórico}$ = m^3/s

L = m

H = m

Al realizar la conversión y sustituir valores:

$$\boxed{Q_{teórico} = 0.01859\ L\ H^{3/2}}$$

Donde: $Q_{teórico}$ = l/s

L = cm = **17.3 cm**

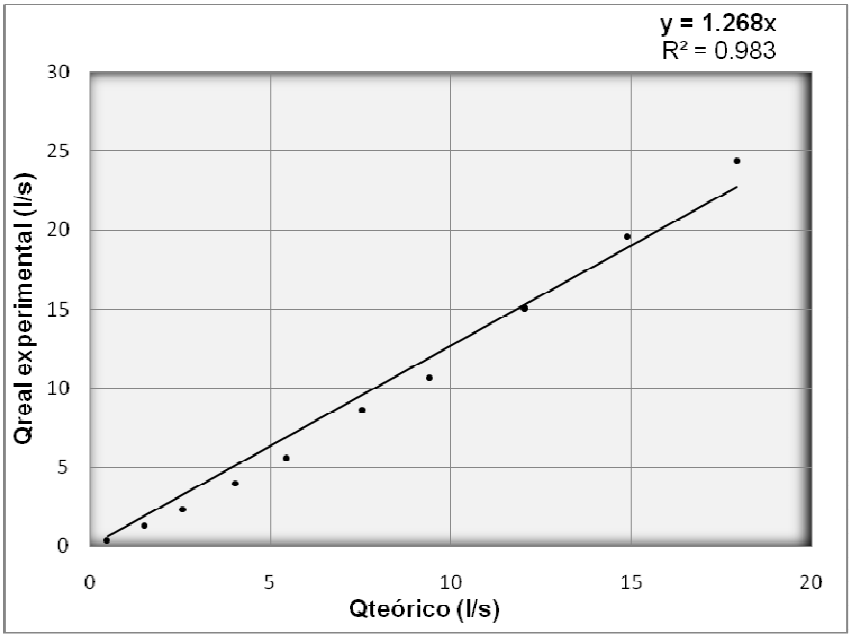
H = cm

Calculando los caudales teóricos y graficando la relación entre éstos y los caudales reales experimentales, se genera una línea de tendencia que proporciona la ecuación de esta gráfica, donde se obtiene el valor del coeficiente de descarga **Cd**.

TABLA XV. Caudales real experimental y teórico

H (cm)	Qr = V/t (l/s)	Qteórico Manual Hid. (l/s)
1.3	0.3617	0.4767
2.8	1.3150	1.5068
4.0	2.3296	2.5729
5.4	3.9613	4.0357
6.6	5.5650	5.4531
8.2	8.6016	7.5517
9.5	10.6542	9.4170
11.2	15.0542	12.0546
12.9	19.5565	14.9008
14.6	24.3446	17.9413

Figura 39. Gráfica determinación del coeficiente de descarga



Entonces el coeficiente de descarga **Cd = 1.268**

Completando los datos, se define la ecuación para el **Qreal**:

$$\mathbf{Q_{real} = (1.268) * (0.01859) * L * H^{3/2}}$$

Donde: Q_{real} = l/s

L = cm

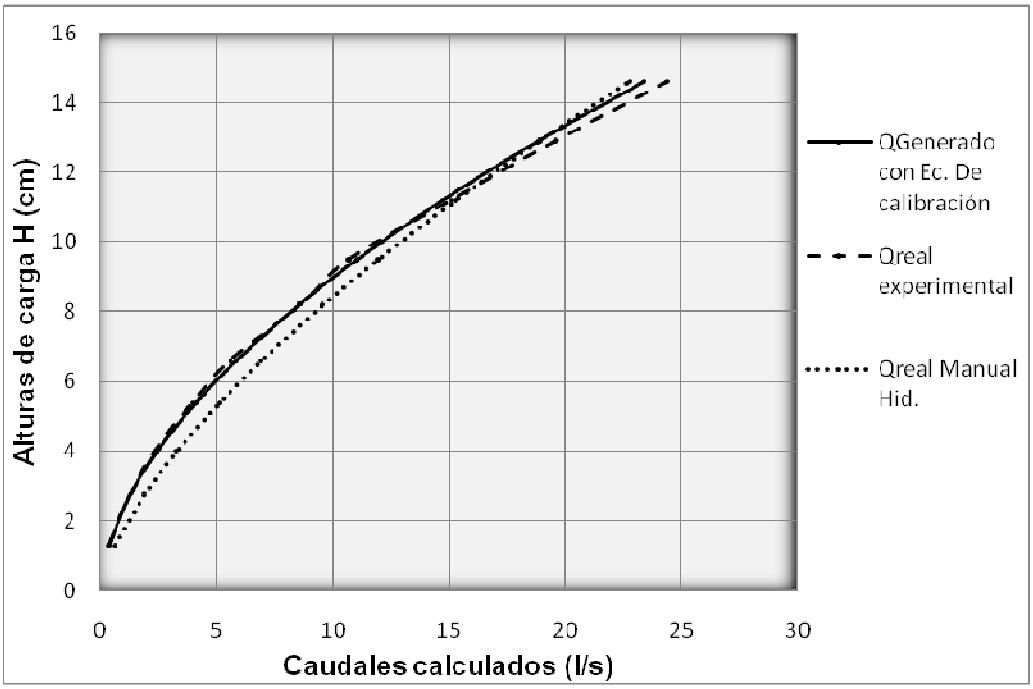
H = cm

Concluyendo con la comparación de los caudales reales obtenidos de forma experimental y teórica, así como las tendencias de sus respectivas curvas.

TABLA XVI. Comparación de caudales

H (cm)	Qr = V/t (l/s)	Generado con Ec. Calibrada (l/s)	Qreal Manual Hid. (l/s)
1.3	0.3617	0.3430	0.6044
2.8	1.3150	1.3084	1.9107
4.0	2.3296	2.4381	3.2624
5.4	3.9613	4.1161	5.1172
6.6	5.5650	5.8420	6.9145
8.2	8.6016	8.5323	9.5756
9.5	10.6542	11.0303	11.9407
11.2	15.0542	14.7009	15.2852
12.9	19.5565	18.8122	18.8942
14.6	24.3446	23.3483	22.7496

Figura 40. Comparación de caudales



4.2.3. Calibración de vertedero triangular y cálculo de ecuación experimental

El ensayo con el vertedero triangular se realizó en el canal hidrodinámico o banco hidráulico del laboratorio, con el vertedero construido según especificaciones descritas anteriormente, con una escotadura en forma de "**V**" con un ángulo $\boldsymbol{\theta} = 90^{o}$.

4.2.3.1. Realización del ensayo

El ensayo con el vertedero triangular sigue el mismo procedimiento descrito en el inciso 4.2.1.1.

Figura 41. Vertedero triangular instalado

Figura 42. Vertedero triangular en funcionamiento

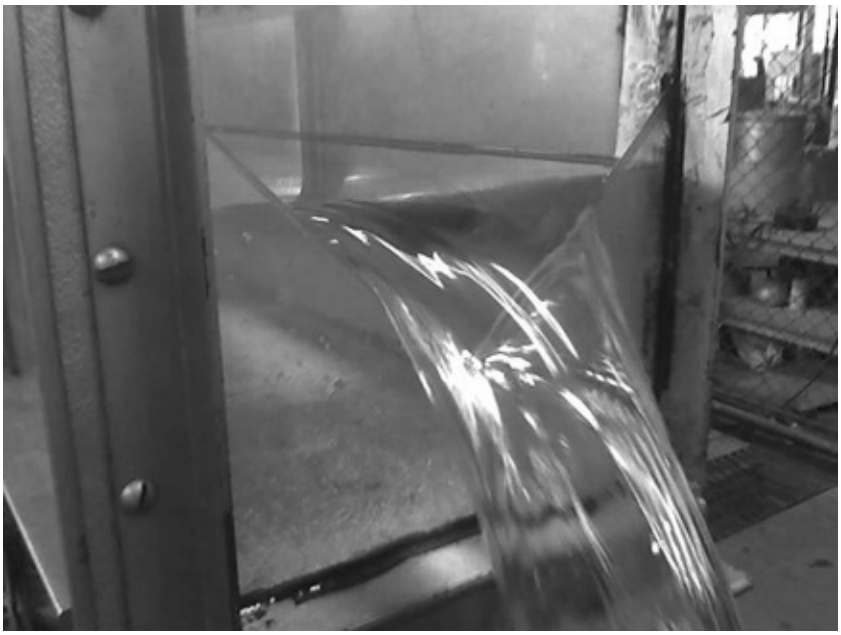


TABLA XVII. Datos obtenidos en ensayo con vertedero triangular

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)
6.9	258.65	400.90	278.80	427.10
8.5	152.42	417.40	156.24	434.90
9.0	131.24	424.60	137.84	437.60
9.9	102.51	400.90	104.40	415.20
10.6	83.34	419.80	89.45	437.60
10.9	81.06	427.10	80.95	422.10
11.9	65.23	427.10	64.75	419.80
13.0	50.50	443.30	49.98	424.60
14.0	43.20	496.40	42.46	458.30
14.8	36.56	461.50	37.14	512.00

4.2.3.2. Obtención de resultados

El proceso para la determinación de caudales con el vertedero triangular, es similar al efectuado, en el inciso 4.2.1.2.

TABLA XVIII. Caudales reales

H (cm)	Qr1 (l/s)	Qr2 (l/s)	<Qr> = V/t (l/s)
6.9	1.5500	1.5319	1.5409
8.5	2.7385	2.7835	2.7610
9.0	3.2353	3.1747	3.2050
9.9	3.9108	3.9770	3.9439
10.6	5.0372	4.8921	4.9647
10.9	5.2689	5.2143	5.2416
11.9	6.5476	6.4834	6.5155
13.0	8.7782	8.4954	8.6368
14.0	11.4907	10.7937	11.1422
14.8	12.6231	13.7857	13.2044

Experimentalmente la ecuación específica para los vertederos es del tipo exponencial:

$$Q = K H^{n}$$

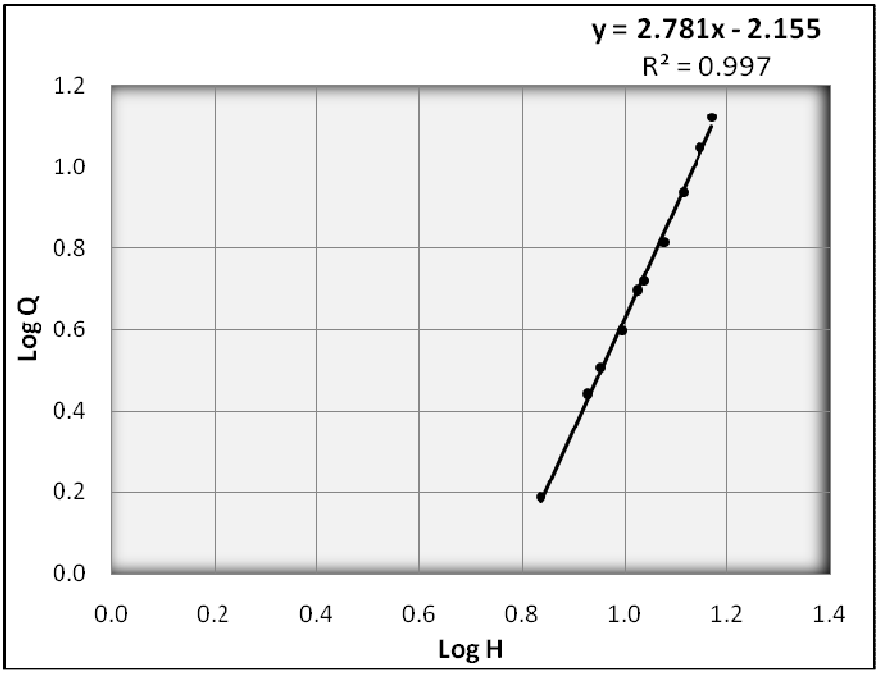
Aplicando logaritmos:

TABLA XIX. Logaritmos de caudales reales y alturas

H (cm)	Log H	Log Q	Qr = V/t (l/s)
6.9	0.8388	0.1878	1.5409
8.5	0.9294	0.4411	2.7610
9.0	0.9542	0.5058	3.2050
9.9	0.9956	0.5959	3.9439
10.6	1.0253	0.6959	4.9647
10.9	1.0374	0.7195	5.2416
11.9	1.0755	0.8139	6.5155
13.0	1.1139	0.9364	8.6368
14.0	1.1461	1.0470	11.1422
14.8	1.1703	1.1207	13.2044

Posteriormente se genera la gráfica de los logaritmos agregándole una línea de tendencia para encontrar la ecuación de la recta:

Figura 43. Gráfica logaritmos de caudal real y alturas H



Sustituyendo valores en la ecuación de la recta se obtiene el valor de **n**:

$$\mathbf{n} = 2.781$$

Entonces: $\mathbf{K} = \log^{-1}(-2.155) = 0.007$

Conociendo los valores de **K** y **n** se presenta la ecuación generada especifica para el vertedero triangular ya calibrado.

$$\boxed{\mathbf{Q_{generado} = 0.007\ H^{2.781}}}$$ Ec. calibración

Donde: $\mathbf{Q_{generado}}$ = l/s

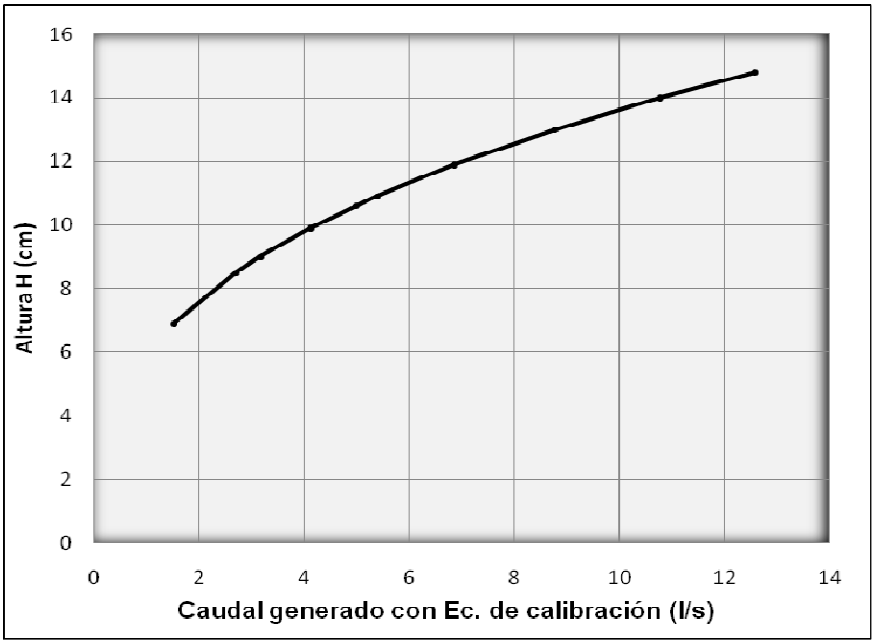
$\mathbf{H}$ = cm

Se presentan los resultados de ambos caudales, el real y el generado con la ecuación de calibración y se estima el porcentaje de error entre ambos, el cual no debe ser mayor al 5%, al igual que se genera la curva de calilbración propia de este vertedero.

TABLA XX. Caudales reales y generados con ecuación de calibración

H (cm)	Qr = V/t (l/s)	Qgenerado con la Ec. Calibrada (l/s)	error (%)
6.9	1.5409	1.5064	2.29
8.5	2.7610	2.6904	2.63
9.0	3.2050	3.1539	1.62
9.9	3.9439	4.1111	4.07
10.6	4.9647	4.9713	0.13
10.9	5.2416	5.3726	2.44
11.9	6.5155	6.8579	4.99
13.0	8.6368	8.7695	1.51
14.0	11.1422	10.7766	3.39
14.8	13.2044	12.5775	4.98

Figura 44. Curva de calibración



4.2.3.3. Cálculo del caudal real con fórmula general

Como se indicó previamente la fórmula general para hallar el caudal real en un vertedero triangular de pared delgada es de la forma:

$$Q_{real} = Cd \frac{8}{15} \sqrt{2g} \; tg \frac{\theta}{2} \; H^{5/2}$$

Donde: Q_{real} = m^3/s

H = m

Sustituyendo valores y realizando la conversión:

$$Q_{real} = Cd \; 0.023624 \; H^{5/2}$$

Donde: Q_{real} = l/s

H = cm

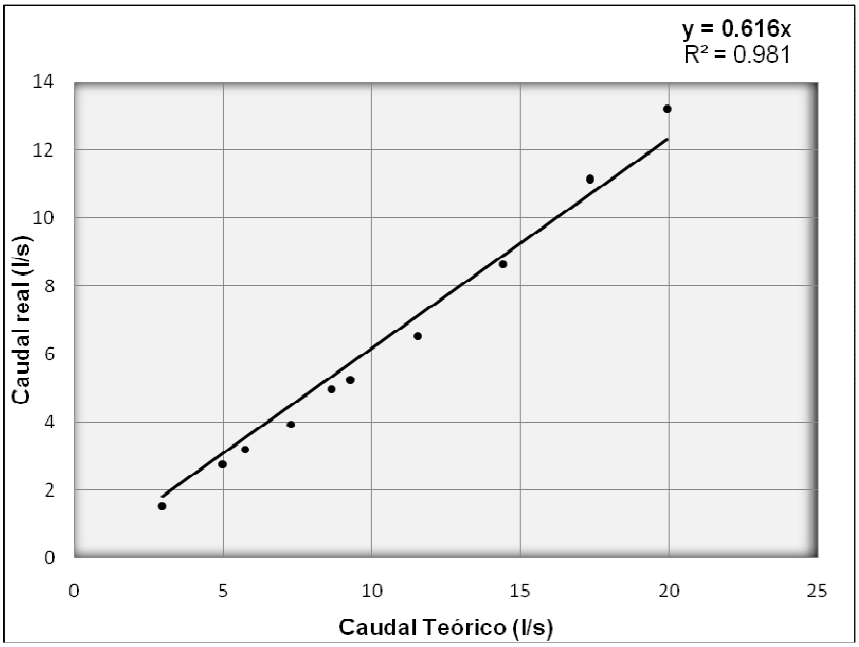
TABLA XXI. Caudales real experimental y teórico fórmula general

H (cm)	Qr = V/t (l/s)	Qteórico (fórmula general) (l/s)
6.9	1.5409	2.9544
8.5	2.7610	4.9762
9.0	3.2050	5.7406
9.9	3.9439	7.2852
10.6	4.9647	8.6421
10.9	5.2416	9.2666
11.9	6.5155	11.5404
13.0	8.6368	14.3950
14.0	11.1422	17.3250
14.8	13.2044	19.9071

El coeficiente de descarga se obtiene al graficar ambos caudales el real experimental y el teórico, aplicando línea de tendencia a la ecuación de la recta.

$$Cd = 0.616$$

Figura 45. Gráfica determinación del coeficiente de descarga



Sustituyendo valores:

$$Q_{real} = (0.616) * (0.023624) * H^{5/2}$$

4.2.3.4. Cálculo del caudal con fórmula del Manual de Hidráulica

El Manual de Hidráulica presenta la siguiente fórmula para el cálculo del caudal en vertederos de sección triangular con un ángulo $\theta = 90^{o}$.

$$Q_{teórico} = 1.4\ H^{5/2}$$

Donde: Q = m^3/s

H = m

Efectuando la conversión:

$$Q_{teórico} = 0.014\ H^{5/2}$$

Donde: Q = l/s

H = cm

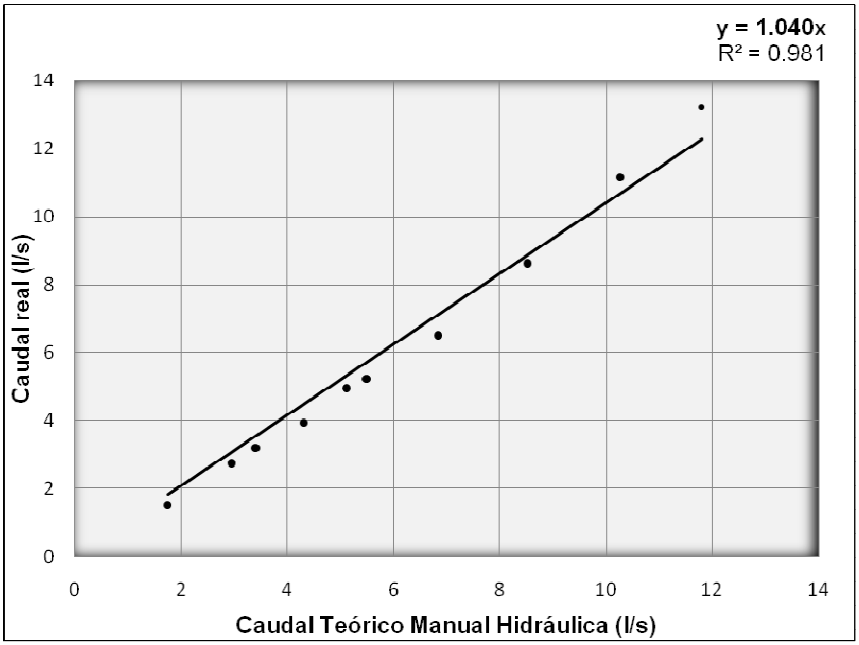
Y sabiendo que: $Q_{real} = Cd\ Q_{teórico}$

Se calculan los caudales teóricos y se grafican con los caudales reales experimentales, agregándole a la serie de datos una línea de tendencia para encontrar en la ecuación de la recta el valor del coeficiente de descarga **Cd** y así completar la ecuación para calcular el caudal real.

TABLA XXII. Caudales real experimental y teórico Manual de Hidráulica

H (cm)	Qr = V/t (l/s)	Qteórico Manual Hid. (l/s)
6.9	1.5409	1.7509
8.5	2.7610	2.9490
9.0	3.2050	3.4020
9.9	3.9439	4.3173
10.6	4.9647	5.1214
10.9	5.2416	5.4915
11.9	6.5155	6.8390
13.0	8.6368	8.5307
14.0	11.1422	10.2671
14.8	13.2044	11.7973

Figura 46. Gráfica determinación del coeficiente de descarga



De la ecuación de la recta se obtiene:

$$\mathbf{Cd = 1.04}$$

Quedando finalmente la ecuación:

$$\boxed{\mathbf{Q_{real} = (1.04) * (0.014) * H^{5/2}}}$$

Donde: Q_{real} = l/s

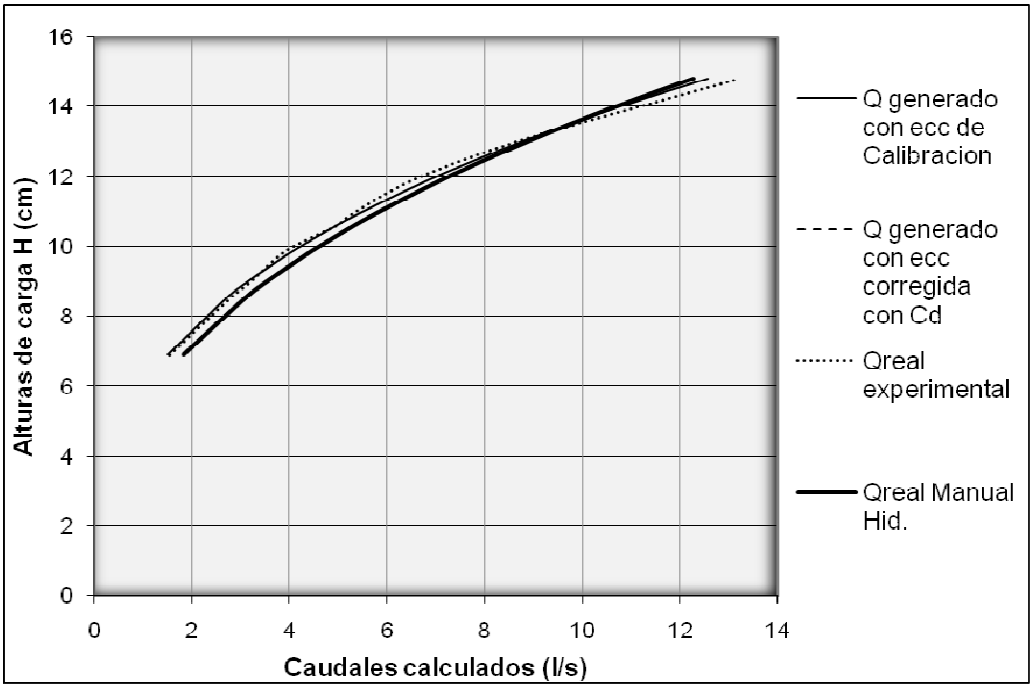
H = cm

Al efectuar los cálculos con las diferentes fórmulas se obtienen los siguientes resultados que al compararlos resultan muy similares.

TABLA XXIII. Comparación de caudales

H (cm)	Qr = V/t (l/s)	Qgenerado con Ec. Calibrada (l/s)	Qreal corregido con Cd (l/s)	Qreal Manual Hid. (l/s)
6.9	1.5409	1.5064	1.8199	1.8209
8.5	2.7610	2.6904	3.0654	3.0670
9.0	3.2050	3.1539	3.5362	3.5381
9.9	3.9439	4.1111	4.4877	4.4900
10.6	4.9647	4.9713	5.3235	5.3263
10.9	5.2416	5.3726	5.7082	5.7112
11.9	6.5155	6.8579	7.1089	7.1126
13.0	8.6368	8.7695	8.8673	8.8720
14.0	11.1422	10.7766	10.6722	10.6778
14.8	13.2044	12.5775	12.2628	12.2692

Figura 47. Comparación de caudales



4.2.4. Calibración de vertedero circular y cálculo de ecuación experimental

El ensayo con el vertedero circular al igual que los tres vertederos ensayados anteriormente, se realizó en el banco hidráulico del laboratorio. Y para ello se utilizó el vertedero circular con las dimensiones descritas con anterioridad, destacando su diámetro **D** = 16 cm.

4.2.4.1. Realización del ensayo

El ensayo con el vertedero circular sigue el mismo procedimiento que se describió en el inciso 4.2.1.1.

Figura 48. Vertedero circular en funcionamiento

TABLA XXIV. Datos obtenidos en ensayo con vertedero circular

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)
4.9	232.54	404.70	239.53	415.20
5.8	166.89	408.70	172.67	419.80
6.4	140.32	410.80	143.78	419.80
7.4	108.32	419.80	110.00	424.60
7.7	100.51	415.20	101.64	427.10
8.5	83.87	408.70	86.00	432.20
9.4	69.92	419.80	70.48	427.10
11.4	49.84	440.40	48.50	408.70
13.4	37.45	446.10	36.98	419.80
14.7	31.46	422.10	31.58	427.10

4.2.4.2. Obtención de resultados

El proceso para la determinación de caudales con el vertedero circular, es similar al efectuado con anterioridad, en el inciso 4.2.1.2.

TABLA XXV. Caudales reales

H (cm)	Q1 (l/s)	Q2 (l/s)	Qr (l/s)
4.9	1.7403	1.7334	1.7369
5.8	2.4489	2.4312	2.4401
6.4	2.9276	2.9197	2.9237
7.4	3.8756	3.8600	3.8678
7.7	4.1309	4.2021	4.1665
8.5	4.8730	5.0256	4.9493
9.4	6.0040	6.0599	6.0319
11.4	8.8363	8.4268	8.6315
13.4	11.9119	11.3521	11.6320
14.7	13.4170	13.5244	13.4707

Como se indicó la ecuación específica para estos vertederos es del tipo exponencial:

$$Q = K H^{n}$$

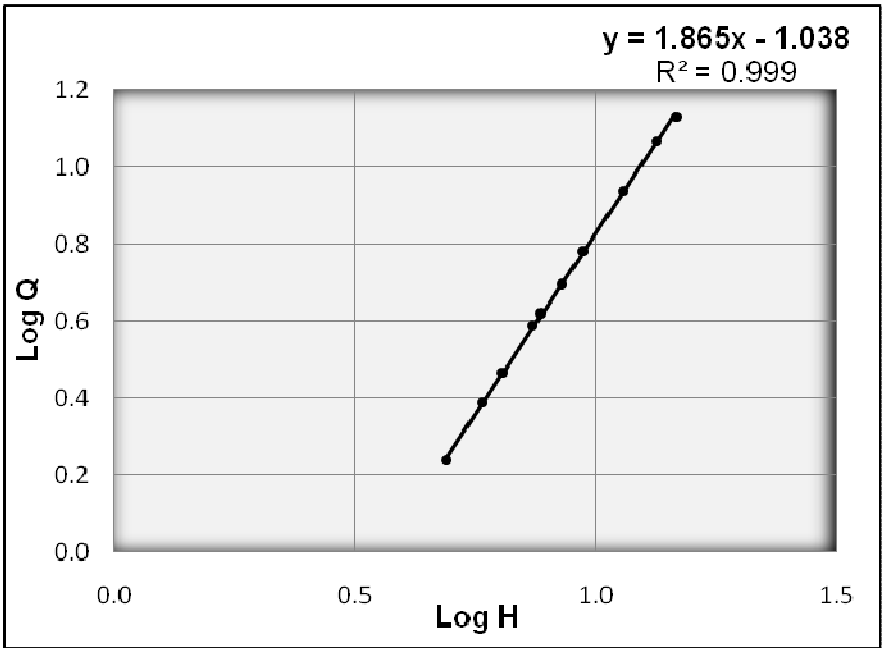
Aplicando logaritmos:

TABLA XXVI. Logaritmos de caudales reales y alturas

H (cm)	Log H	Log Q	Qr = V/t (l/s)
4.9	0.6902	0.2398	1.7369
5.8	0.7634	0.3874	2.4401
6.4	0.8062	0.4659	2.9237
7.4	0.8692	0.5875	3.8678
7.7	0.8865	0.6198	4.1665
8.5	0.9294	0.6945	4.9493
9.4	0.9731	0.7805	6.0319
11.4	1.0569	0.9361	8.6315
13.4	1.1271	1.0657	11.6320
14.7	1.1673	1.1294	13.4707

Generando la gráfica de logaritmos y agregándole una línea de tendencia, se obtiene la ecuación de la recta:

Figura 49. Gráfica logaritmos de caudal real y alturas H



De la ecuación de la recta se obtiene al sustituir valores:

$$\mathbf{n} = 1.865$$

Entonces: $$\mathbf{K} = \log^{-1}(-1.038) = 0.091$$

Encontrando los valores de K y n, se presenta la ecuación generada experimental para este vertedero:

$$\boxed{\mathbf{Q_{generado} = 0.091\ H^{1.865}}}$$ Ec. calibración

Donde: $\mathbf{Q_{generado}}$ = l/s

$\mathbf{H}$ = cm

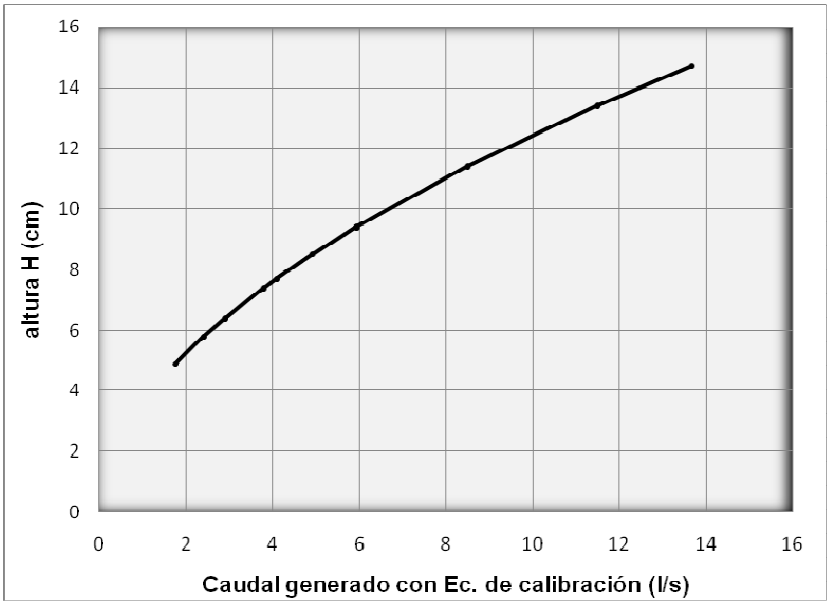
Y calculando caudales con la ecuación generada, se comparan con los reales experimentales y se estima el porcentaje de error entre ambos.

TABLA XXVII. Caudales reales y generados con ecuación de calibración

H (cm)	Qr = V/t (l/s)	Qgenerado Ec. Calibrada (l/s)	error (%)
4.9	1.7369	1.7630	1.48
5.8	2.4401	2.4145	1.06
6.4	2.9237	2.9011	0.78
7.4	3.8678	3.8033	1.70
7.7	4.1665	4.0959	1.72
8.5	4.9493	4.9250	0.49
9.4	6.0319	5.9419	1.52
11.4	8.6315	8.5147	1.37
13.4	11.6320	11.5104	1.06
14.7	13.4707	13.6801	1.53

Luego se grafica la curva de calibración para este vertedero:

Figura 50. Curva de calibración



4.2.4.3. Cálculo del caudal con fórmula del Manual de Hidráulica

Para este tipo de vertederos el Manual de Hidráulica presenta la fórmula:

$$\mathbf{Q_{teórico} = 1.518\ D^{0.693}\ H^{1.807}}$$

Donde:

$Q_{teórico}$ = m^3/s

D = m

H = m

Realizando la conversión :

$$\mathbf{Q_{teórico} = 0.01518\ D^{0.696}\ H^{1.807}}$$

Donde:

$Q_{teórico}$ = l/s

D = cm

H = cm

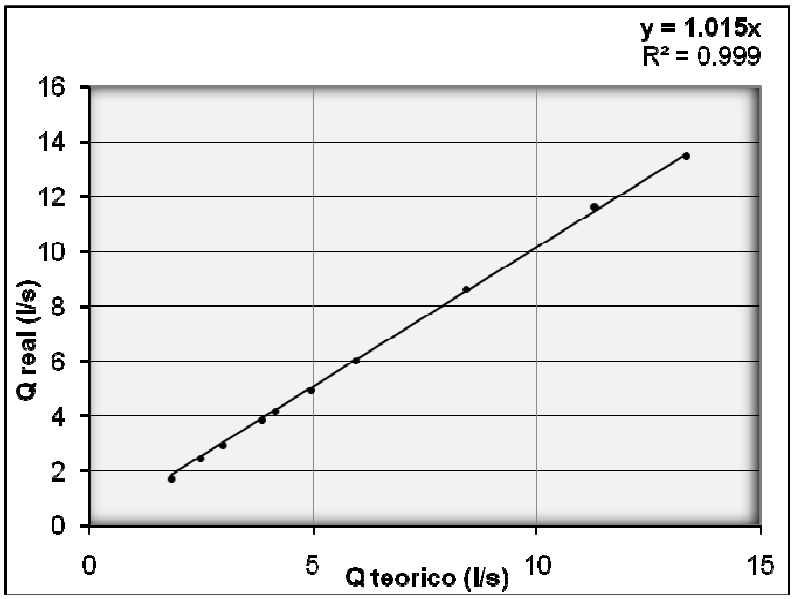
Y sabiendo que: $Q_{real} = Cd\ Q_{teórico}$

Se calculan los caudales teóricos, se grafica la relación entre éste y el caudal real y se agrega una línea de tendencia para hallar el coeficiente de descarga:

TABLA XXVIII. Caudales real experimental y teórico

H (cm)	Qr = V/t (l/s)	Qteórico (l/s)
4.9	1.7369	1.8319
5.8	2.4401	2.4845
6.4	2.9237	2.9682
7.4	3.8678	3.8586
7.7	4.1665	4.1459
8.5	4.9493	4.9566
9.4	6.0319	5.9452
11.4	8.6315	8.4247
13.4	11.6320	11.2825
14.7	13.4707	13.3373

Figura 51. Gráfica determinación del coeficiente de descarga



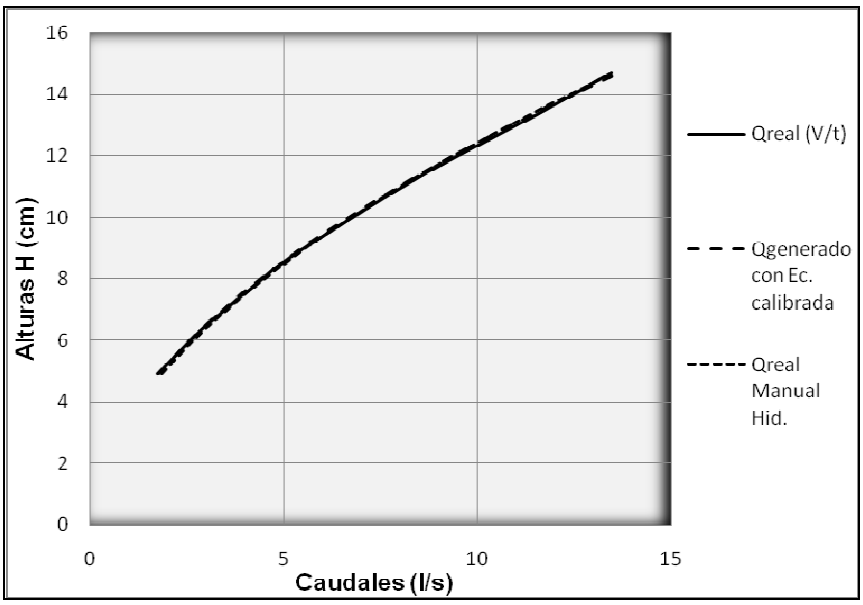
Por último se obtiene el valor del coeficiente de descarga **Cd = 1.015** **c**ompletando la ecuación para hallar el caudal real según el Manual de Hidráulica:

$$Q_{real} = (1.015) * (0.01518) * D^{0.696} * H^{1.807}$$

TABLA XXIX. Comparación de caudales

H (cm)	Qr = V/t (l/s)	Qgenerado Ec. Calibr. (l/s)	Qreal Manual Hid (l/s)
4.9	1.7369	1.7630	1.8594
5.8	2.4401	2.4145	2.5218
6.4	2.9237	2.9011	3.0127
7.4	3.8678	3.8033	3.9165
7.7	4.1665	4.0959	4.2081
8.5	4.9493	4.9250	5.0310
9.4	6.0319	5.9419	6.0344
11.4	8.6315	8.5147	8.5511
13.4	11.6320	11.5104	11.4517
14.7	13.4707	13.6801	13.5374

Figura 52. Comparación de caudales



4.3. Instructivo de laboratorio para ensayo con vertederos

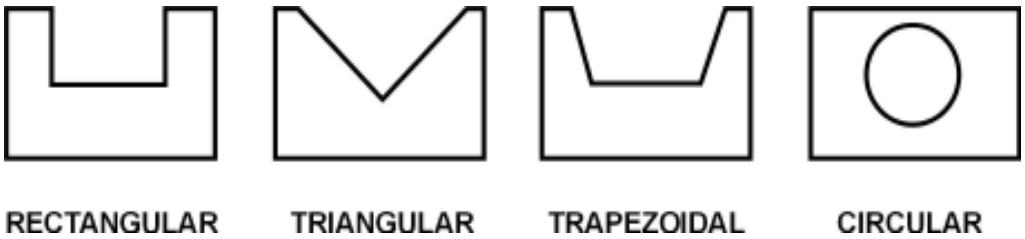
Introducción:

En Ingeniería Hidráulica, los vertederos son dispositivos que se utilizan para regular y medir el caudal en canales abiertos y cauces de ríos, con el propósito de conducir agua para consumo humano, riego agrícola, sistemas de tratamientos, generación de energía eléctrica, consumo animal, etc.

Calculando el caudal con base en la relación que existe entre el nivel de agua antes de vertedero y la descarga. El vertedero es un dique o pared que intercepta la corriente, causando una elevación del nivel de aguas arriba de éste.

Equipo:

- Se utilizarán cuatro vertederos de pared delgada, de diferentes formas geométricas. Siendo éstos: rectangular, trapezoidal, triangular y circular.

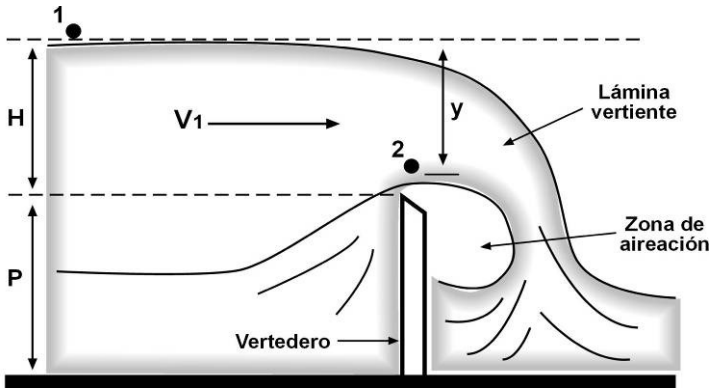


- Canal hidrodinámico donde se instalará cada uno de los vertederos al final de éste y que brinda el flujo de agua.
- Cinta métrica o regla graduada, en centímetros, para medir los tirantes o alturas de agua.
- Tanque situado al final de banco hidráulico que servirá para tomar los valores de volumen para calcular los caudales reales por el método de aforo volumétrico.

- Cronómetro para toma de tiempo en cada uno de los aforos volumétricos.

Marco teórico:

En la figura se muestra la descarga a través de un vertedero de cualquier forma geométrica, aplicando la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2 mostrados se tiene:



$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{y} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{y} + Z_2$$

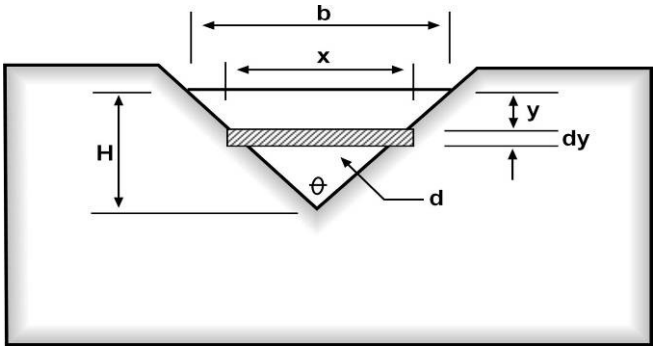
$V_1 \approx 0$ Dado que la velocidad en el punto 1 es pequeña al acercarse al vertedero y al elevarla al cuadrado en la ecuación, se obtiene una cantidad aún más pequeña.

$P_1 = P_2 = P_{atm}$ $\quad Z_1 = H + P$ $\quad$ y $\quad Z_2 = H + P - y$

Sustituyendo y despejando:

$$H + P = \frac{V_2^2}{2g} + H + P - y \Longrightarrow \boxed{V_2 = \sqrt{2gy}}$$

Donde V_2 es la componente vertical de la velocidad de una partícula en tiro parabólico.



El caudal teórico, a través de una elemento diferencial de área, de espesor **dy** es de la forma: $dQ = V_2\, dy$

Por semejanza de triángulos: $\frac{x}{b} = \frac{H - y}{H}$ Y $b = 2\,H\, tg\,\frac{\theta}{2}$

Luego: $Q_{teórico} = 2\sqrt{2g}\; tg\,\frac{\theta}{2} \int_0^H (H - y)\, y^2\, dy$

Integrando: $Q_{teórico} = \frac{8}{15}\sqrt{2g}\; tg\,\frac{\theta}{2}\; H^{5/2}$

Tomando en cuenta la contracción lateral y la tensión superficial el caudal teórico se reduce en cierta medida, por lo que se estima un coeficiente de descarga **Cd** para así obtener el caudal real:

$$\mathbf{Q_{real} = Cd\, \frac{8}{15}\sqrt{2g}\; tg\,\frac{\theta}{2}\; H^{5/2}}$$

El coeficiente de de descarga Cd, depende de cada vertedero, para el triangular que se ensayó, después de haberlo calibrado se ha determinado que su valor es de **0.616**.

Desarrollo del ensayo:

1. Objetivos:

- Que el estudiante conozca las leyes teóricas y conceptos que regulan el flujo de una corriente con superficie libre a través de un vertedero como dispositivo para regular y medir caudales de agua.
- Que el estudiante grafique las curvas de descarga para cada vertedero de pared delgada de diferentes secciones geométricas.

2. Procedimiento:

2.1 Determinar el cero real de la escala, el cual corresponderá cuando el nivel de la superficie libre del agua en el banco hidráulico coincida con el vértice del vertedero, bajo estas condiciones no deberá circular flujo de agua (**Ho**).

2.2 Se debe determinar la altura $\mathbf{H_{mínima}}$, para la cual exista una descarga libre o aireada, desde la cual se empezarán a tomar valores válidos para la carga **H** del vertedero.

2.3 Graduando la válvula de descarga se hacen circular diferentes caudales por el vertedero, dando un tiempo prudencial para que estabilice el flujo de agua y luego procediendo a medir los valores para las cargas **H** en cm.

2.4 Con los valores de **H** obtenidos, se procede a evaluar la ecuación del vertedero y así calcular el caudal teórico en l/s.

2.5 La ecuación modelo para este tipo de medidores de caudal es del tipo exponencial, representada por:

$$\boxed{Q = K H^{n}}$$

En la cual se obtienen los valores de **H** por medio del ensayo, encontrando los de **K** y **n** aplicando logaritmos a la ecuación:

$$\log \mathbf{Q} = \log \mathbf{K} + \mathbf{n} \log \mathbf{H}$$

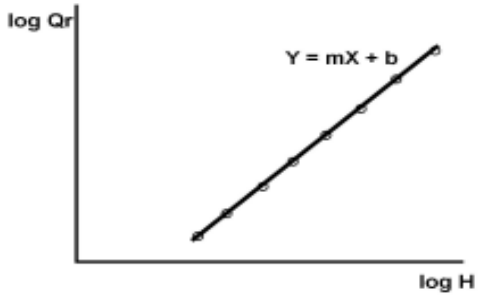
sustituyendo: $\boxed{Y = m X + b}$ $\Longrightarrow$ Ec. Recta

Donde:

$$Y = \log \mathbf{Q}$$
$$m = \mathbf{n}$$
$$X = \log \mathbf{H}$$
$$b = \log \mathbf{K}$$

Aplicando logaritmos a los caudales reales **Qr** y las alturas **H**:

Luego se genera la gráfica de logaritmos, en la cual se agrega una línea de tendencia que brindará la ecuación de la recta, obteniendo de ella el valor de **"n"**.



entonces: $\mathbf{K} = \log^{-1} (\mathbf{b})$

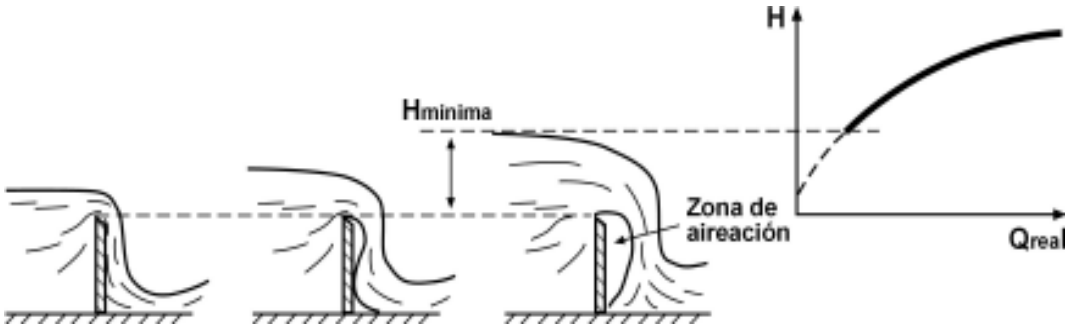
Al encontrar los valores de **K** y **n** se resuelve la ecuación de calibración específica para cada uno de los vertederos a ensayar:

$$\boxed{\mathbf{Q_{generado} = K H^{n}}}$$

Donde: $\mathbf{Q_{generado}}$ = l/s

H = cm

2.6 Habiendo obtenido los valores del caudal real **Qr** y las alturas de carga **H**, se debe construir la curva de descarga para este vertedero, situando en el eje X los valores del caudal real en l/s y en el eje Y los de la carga **H** en cm.



2.7 Se deberá incluir en el reporte una investigación de las ecuaciones para el cálculo del caudal teórico de un vertedero tipo rectangular, trapezoidal (Cipolletti) y circular, al igual que sus respectivos coeficiente de descarga **Cd**. Los cuales se obtienen al graficar la recta con valores **<Qr>** en el eje vertical y valores de $\mathbf{Q_{teórico}}$ en el eje horizontal, determinando el valor de la pendiente de la recta (**Y = mX + b**), se calcula el coeficiente de descarga para cada vertedero en particular.

$$\mathbf{Qr = Cd\ Q_{teórico}}$$

2.8 Incluir las conclusiones con base en los cálculos y las gráficas efectuadas.

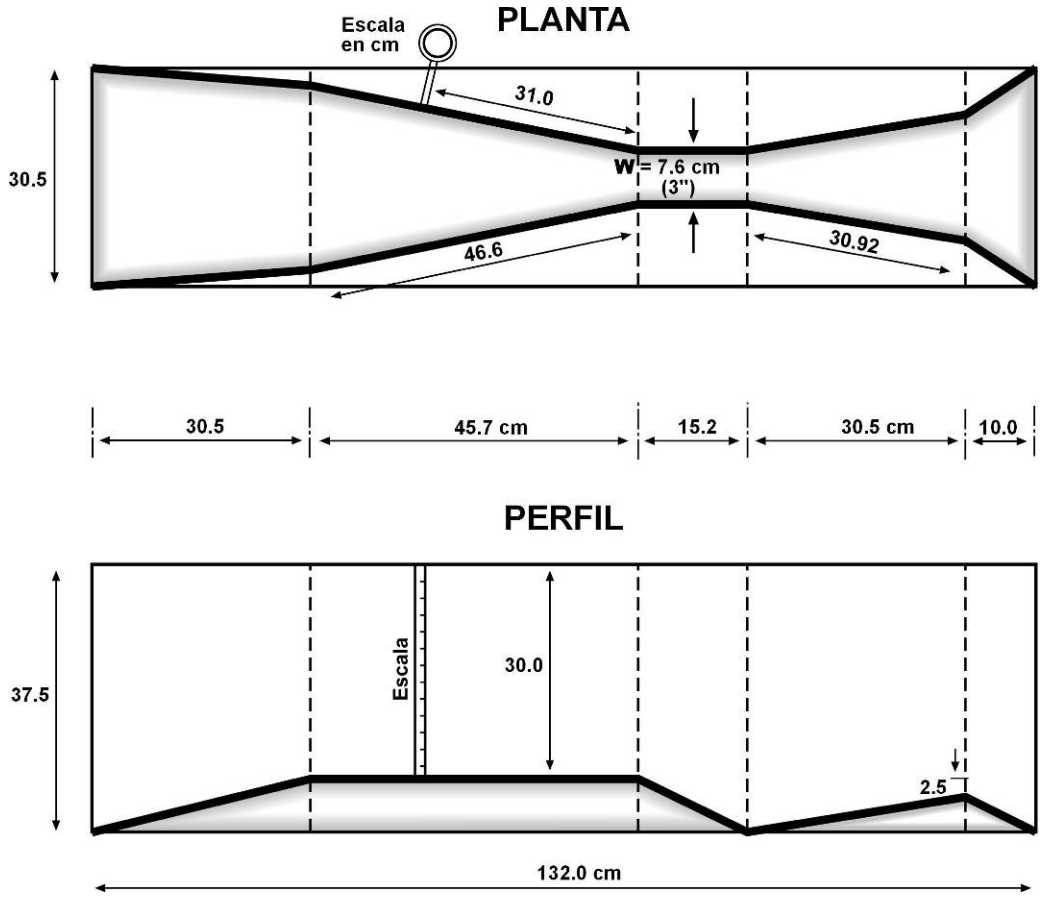
5. ENSAYO DE LABORATORIO CON CANAL PARSHALL

5.1. Diseño y construcción de canal Parshall para ensayo

Como se ha expuesto el canal Parshall es un medidor muy práctico en los aforos de caudales que transportan arenas y sólidos, ya que éstos trabajan a descarga libre y no presentan ningún obstáculo para el flujo a medir. Por ello con base en las dimensiones, principalmente de la sección (ancho y altura) del canal hidrodinámico del laboratorio de hidráulica indicadas en la figura 16 y del caudal estimado a circular a través de él, considerándose que se encuentra entre los rangos de 0.85 y 53.8 l/s según la tabla II, se considera que un canal Parshall con garganta **W** = 3 pulg. (7.6 cm) es el más indicado para ser construido y a la vez será el de mejor desempeño para ser utilizado en los ensayos dentro de los cursos de Hidráulica e Hidráulica de Canales.

Por las consideraciones anteriores se determinó construir un canal Parshall con garganta **W** = 3 pulg. (7.6 cm) y para ello se hace uso de las dimensiones típicas asignadas para este tipo de medidores que presenta el manual de Hidráulica, las cuales se describen el la tabla I y las cuales quedan descritas en la siguiente figura:

Figura 53. Dimensiones medidor Parshall fabricado para laboratorio



Para fabricar el medidor Parshall se utilizaron láminas de acrílico transparente, con un espesor de 5 mm. Se optó por este material debido a que es bastante liviano y a la vez presenta una gran resistencia, propiedades que serán de utilidad en el proceso del montaje dentro del canal hidrodinámico, del ensayo del medidor y al ser desmontado para su almacenaje. También se elige este material trasparente para facilitar a los alumnos la visualización del comportamiento del flujo y del medidor en los momentos de realizar los ensayos y así obtener una mejor compresión de su funcionamiento al simular condiciones reales que se puedan presentar a los profesionales de la Ingeniería Civil.

La construcción del canal Parshall, según diseño descrito anteriormente, lo constituyen los siguientes procesos:

1. Trazo según diseño sobre lámina de acrílico.
2. Corte de piezas mediante cuchilla especial.
3. Moldeado de paredes y fondo del canal por calentamiento del material, utilizando una pistola industrial de alta temperatura.
4. Perforado de paredes del canal mediante taladro eléctrico, para ser unidas con barras roscadas de 3/8".
5. Unión de piezas con Cloruro de Metileno liquido.
6. Unión de paredes del canal con barras roscadas de 3/8" y asegurándolas con roldanas con empaque y tuercas, todo de acero galvanizado.
7. Colocación de regla graduada en centímetros a 2/3 de la sección convergente (entrada) del canal, para toma de alturas al realizar los ensayos.

Figura 54. Perforado de paredes del canal Parshall

Figura 55. Instalación de barras roscadas en paredes del canal

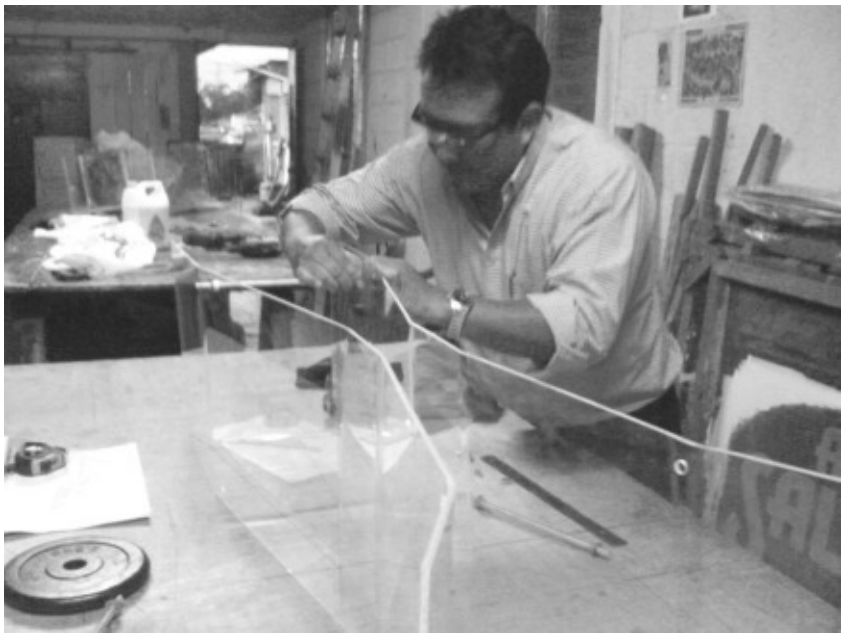
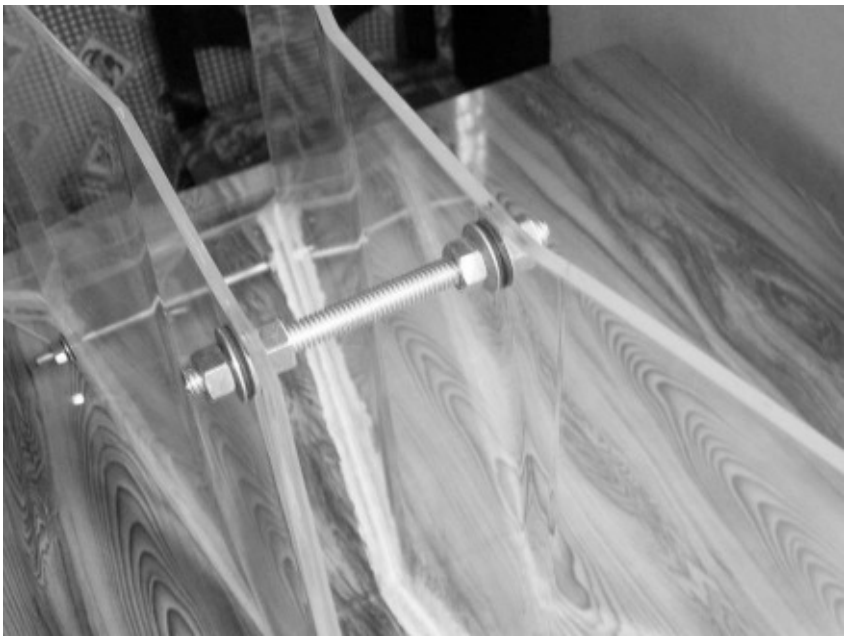


Figura 56. Refuerzo en paredes con barras roscadas

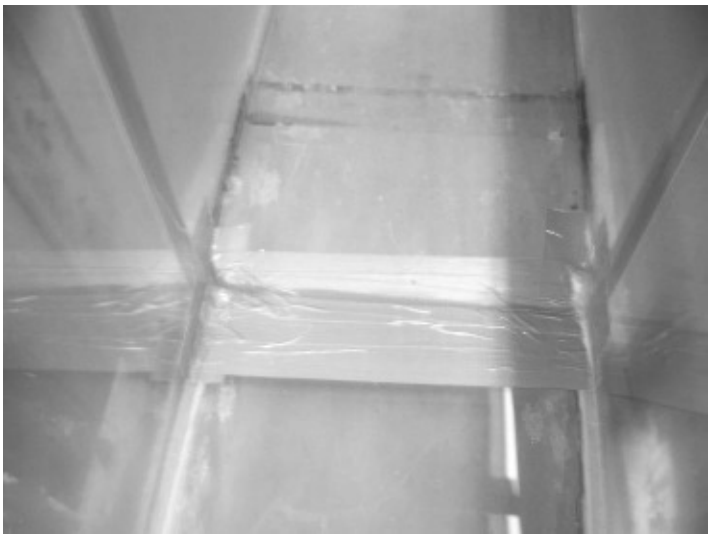


5.2. Calibración del canal Parshall y obtención de su fórmula experimental

Instalar el medidor Parshall dentro del canal hidrodinámico del laboratorio de Hidráulica y para tal efecto se requiere fijar y sellar las paredes de ambos por medio de cinta adhesiva a prueba de agua, conocida comercialmente como Duck Tape, la cual es muy funcional ya que es de fácil instalación y a la vez también brinda facilidad al momento de retirar el medidor luego de ser ensayado.

Figura 57. Instalación del canal Parshall en laboratorio

Figura 58. Fijación del canal Parshall



Luego de instalar el canal Parshall, se verifica que el depósito subterráneo se encuentre lleno previo a poner en funcionamiento la bomba que suministrará el agua que circulará a través del canal hidrodinámico y canal Parshall para realizar los ensayos.

Figura 59. Canal Parshall listo para ensayar

Seguidamente se procede a suministrar la cantidad de agua requerida por medio de la llave que controla el flujo en el canal y se toman diez lecturas en la escala, graduada en centímetros, del medidor Parshall, empezando por alturas pequeñas hasta llegar a las más altas, esperando un tiempo prudencial entre cada lectura para que la altura que indica la escala se estabilice y así obtener medidas precisas. Para cada lectura se realizan dos aforos volumétricos en el tanque que se encuentra al final del canal hidrodinámico, utilizando un cronómetro para la toma de tiempos de llenado.

Figura 60. Canal Parshall en funcionamiento

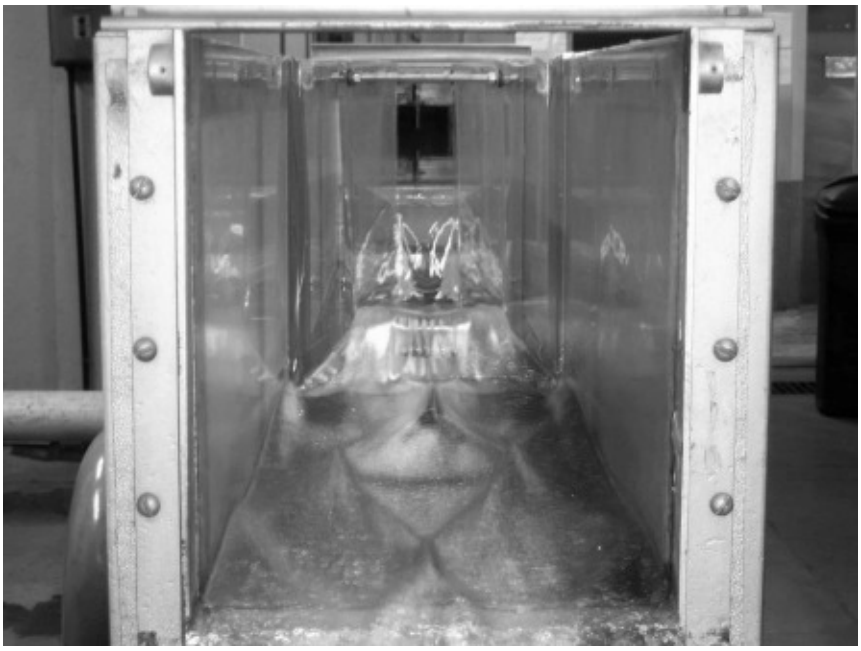
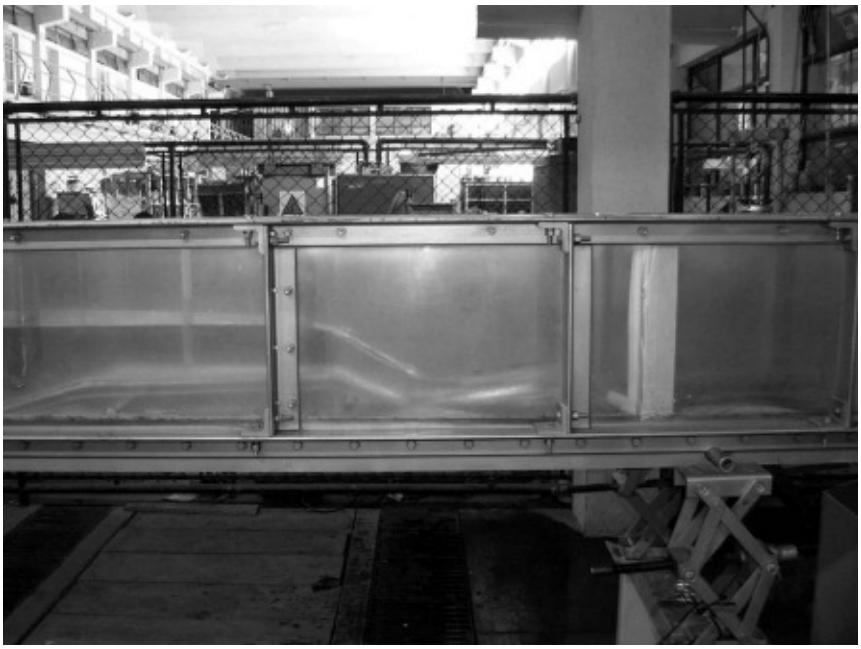


Figura 61. Perfil canal Parshall



Luego de tomar las lecturas de volumen y tiempo, para cada una de las diez diferentes alturas que marca la escala graduada, situada en la sección convergente del canal Parshall, se obtienen los datos que se presentan a continuación:

TABLA XXX. Datos obtenidos en el ensayo

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)
1.9	1345.00	395.60	1342.00	391.00
2.3	857.23	440.40	1116.29	388.00
3.6	437.10	422.10	453.68	400.90
4.2	367.00	443.30	390.70	471.40
4.9	270.17	408.70	280.02	422.10
6.0	188.53	434.90	189.18	424.60
7.1	149.73	437.60	155.40	496.40
8.0	119.00	424.60	119.87	422.10
8.9	101.53	449.10	102.28	440.40
10.2	79.32	452.10	79.40	455.20

Encontrar los caudales para cada lectura con los datos tomados, para ello se utiliza el método volumétrico, dividiendo el volumen entre el tiempo de llenado, esto se realiza para cada una de las dos lecturas tomadas y luego se calcula el promedio de ambos para determinar el caudal real para cada altura de carga medida.

Ejemplo:

Qr1 = V1 / t1 = 395.60 / 1345.00 = 0.2941 l/s

Qr2 = V2 / t2 = 391.00 / 1342.00 = 0.2914 l/s

Con estos dos caudales parciales se procede a calcular el promedio, obteniendo el caudal real, el cual servirá para compararlo con el caudal obtenido con la fórmula generada por el canal Parshall ensayado.

Qr = (Q1 + Q2) / 2 = (0.2941 + 0.2914) / 2 = **0.2927** l/s

Para mayor rapidez y precisión de los cálculos se utiliza la hoja electrónica de Excel, quedando de la siguiente forma:

TABLA XXXI. Caudales reales

H (cm)	Qr1 (l/s)	Qr2 (l/s)	<Qr> = V / t (l/s)
1.9	0.2941	0.2914	0.2927
2.3	0.5137	0.3476	0.4307
3.6	0.9657	0.8837	0.9247
4.2	1.2079	1.2066	1.2072
4.9	1.5128	1.5074	1.5101
6.0	2.3068	2.2444	2.2756
7.1	2.9226	3.1943	3.0585
8.0	3.5681	3.5213	3.5447
8.9	4.4233	4.3058	4.3646
10.2	5.6997	5.7330	5.7163

Como se indicó anteriormente la ecuación general para encontrar el caudal que fluye a través del canal Parshall es del tipo exponencial:

$$\boxed{\mathbf{Q} = \mathbf{K}\,\mathbf{H}^{\mathbf{n}}} \qquad \text{Ec. general}$$

De donde se conoce el valor de "**H**", que es la altura del agua indicada en la escala del canal, por lo que es necesario encontrar los valores de "**K**" y del exponente "**n**".

Aplicando logaritmos a la ecuación general se tiene:

$$\log \mathbf{Q} = \log \mathbf{K} + \mathbf{n} \log \mathbf{H}$$

Ordenando la ecuación de la siguiente forma se obtiene la ecuación de una recta, sustituyendo los términos como se indica:

$$\log \mathbf{Q} = \mathbf{n} \log \mathbf{H} + \log \mathbf{K}$$

$$\boxed{Y = m\,X + b} \Longrightarrow \text{Ec. Recta}$$

Donde:

$$Y = \log \mathbf{Q}$$
$$m = \mathbf{n}$$
$$X = \log \mathbf{H}$$
$$b = \log \mathbf{K}$$

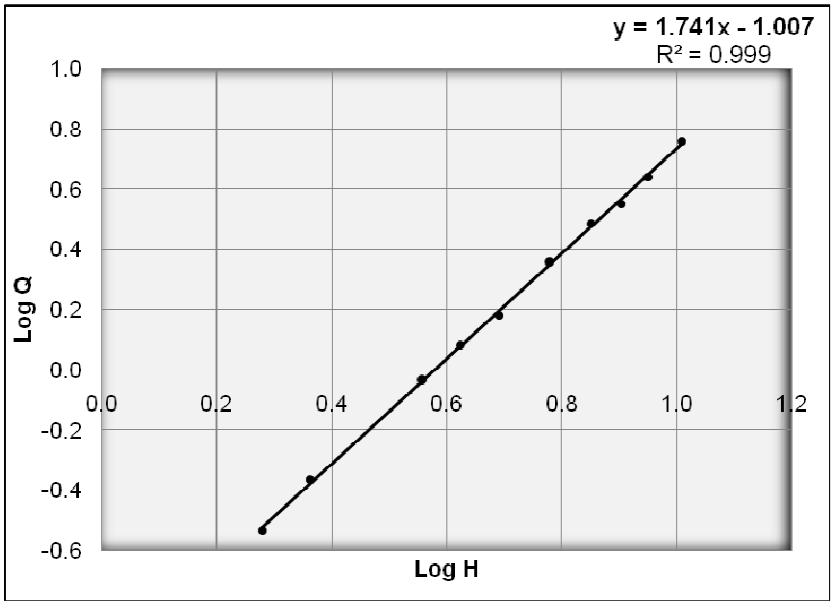
Luego se calculan los logaritmos de los caudales reales calculados y de las alturas tomadas en el ensayo. Esto con el uso de la hoja electrónica Excel.

TABLA XXXII. Logaritmos de "H" y "Qr"

H (cm)	Qr = V / t (l/s)	Log H	Log Q
1.9	0.2927	0.2788	-0.5335
2.3	0.4307	0.3617	-0.3659
3.6	0.9247	0.5563	-0.0340
4.2	1.2072	0.6232	0.0818
4.9	1.5101	0.6902	0.1790
6.0	2.2756	0.7782	0.3571
7.1	3.0585	0.8513	0.4855
8.0	3.5447	0.9031	0.5496
8.9	4.3646	0.9494	0.6399
10.2	5.7163	1.0086	0.7571

Con los logaritmos ya calculados se procede a graficar los valores obtenidos, definiendo en el eje "X" el valor de los logaritmos de "**H**" y en el eje "Y" el de los logaritmos de "**Qr**". La hoja electrónica de Excel contiene una función que genera una línea de tendencia al igual que la ecuación de la gráfica generada, en este caso el de una recta, de la siguiente forma:

Figura 62. Gráfica logaritmos de "H" y "Qr"



Como muestra la grafica anterior, la ecuacion generada por la linea de tendencia es la de una recta de la forma:

$$Y = 1.741\,X - 1.007$$

Sustituyendo valores: $\log \mathbf{Q} = 1.741 \log \mathbf{H} - 1.007$

Según lo establecido anteriormente se puede deducir el valor $\mathbf{n} = 1.741$

También de la misma ecuación se calcula el valor de "**K**":

$$\mathbf{K} = \log^{-1}(-1.007) = 0.098$$

Sustituyendo valores en la ecuación general se obtiene la ecuación generada específica para este canal Parshall con garganta **W** = 3 pulg. (7.6 cm).

$$\boxed{\mathbf{Q_{generado} = 0.098\ H^{1.741}}}$$

Donde: $\mathbf{Q_{generado}}$ = l/s

$\mathbf{H}$ = cm

A efecto de comprobar que la ecuación específica generada que se obtuvo para este canal Parshall sea exacta, se procede a graficar las alturas indicadas en la escala del medidor y los caudales reales calculados, generando una linea de tendencia, la cual generará la ecuación para esta serie de datos. Al realizar la comparación se verifica que es idéntica a la calculada por el procedimiento realizado anteriormente. Por lo que se confirma que el procedimiento matemático efectuado es confiable.

Figura 63. Gráfica alturas y caudales reales

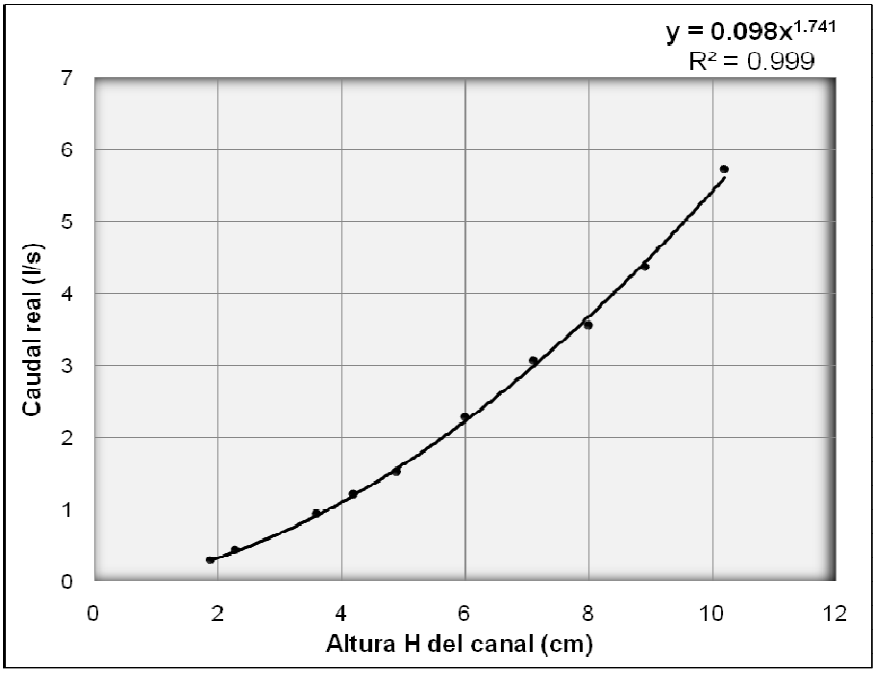
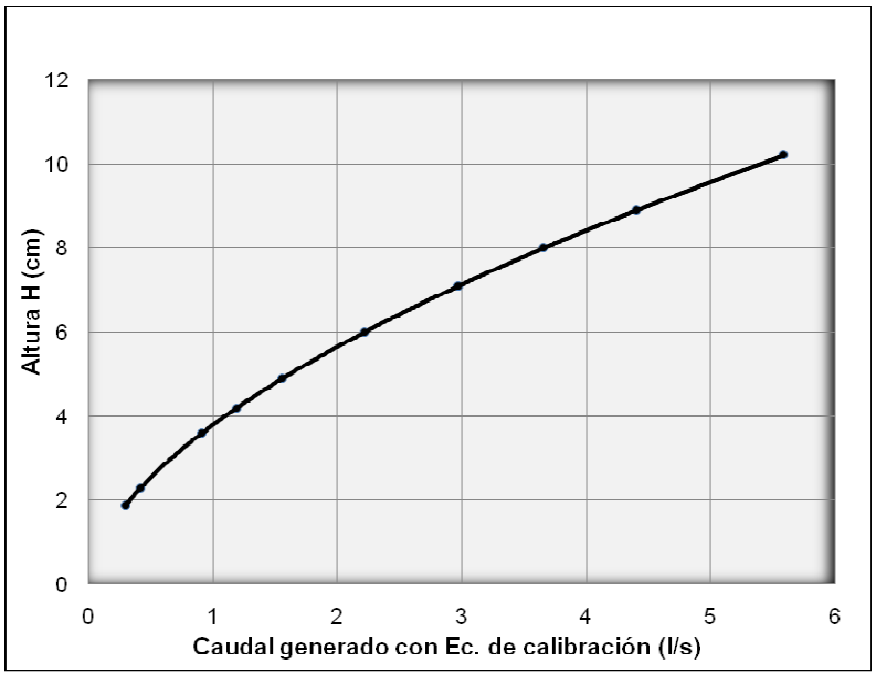


Figura 64. Curva de calibración del canal Parshall ensayado



5.3. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente con los de forma teórica

Al haber encontrado la ecuación generada para el canal Parshall, se procede a calcular con ella los valores de los caudales para cada una de las diez alturas ensayadas y luego se comparan con los caudales reales obtenidos por el método volumetrico, al mismo tiempo que se calcula el porcentaje de error que existe entre cada uno de los caudales comparados.

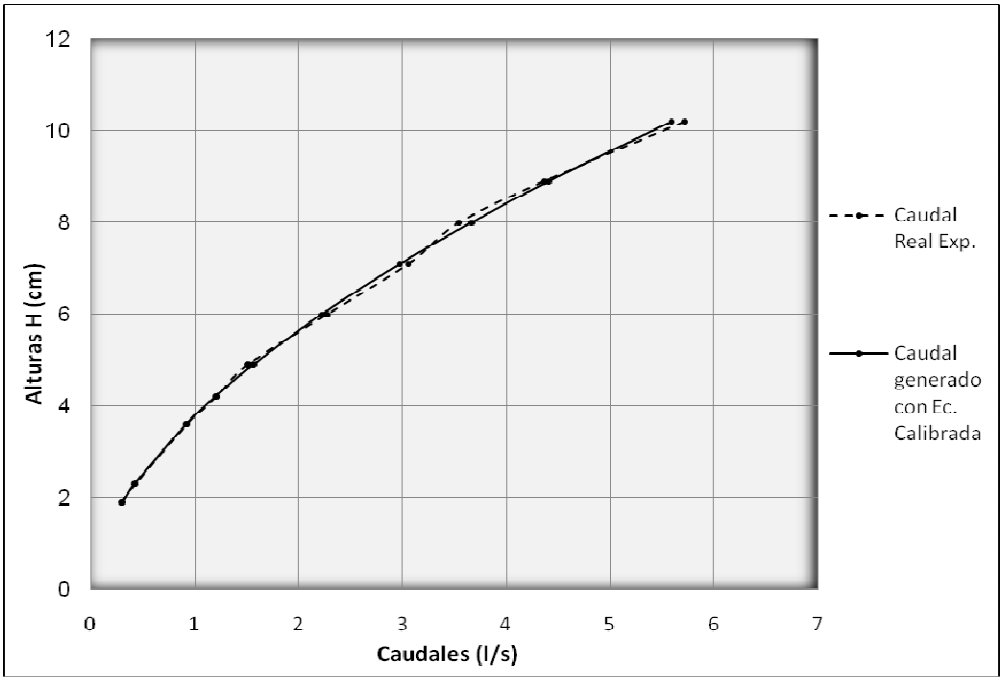
TABLA XXXIII. Comparación de caudales reales y generados con ecuación calibrada

H (cm)	Qr = V / t (l/s)	Qgenerado con Ec. calibrada (l/s)	error (%)
1.9	0.2927	0.2996	2.29
2.3	0.4307	0.4178	3.07
3.6	0.9247	0.9115	1.45
4.2	1.2072	1.1921	1.27
4.9	1.5101	1.5590	3.14
6.0	2.2756	2.2181	2.59
7.1	3.0585	2.9735	2.86
8.0	3.5447	3.6602	3.16
8.9	4.3646	4.4067	0.96
10.2	5.7163	5.5873	2.31

Con base en los resultados obtenidos y de los porcentajes mínimos de error encontrados, se puede afirmar que la ecuación generada que se obtuvo para este canal Parshall es precisa y confiable.

Por último, se genera la gráfica que compara los dos caudales encontrados, en la cual se puede visualizar que entre ambos existe muy poca variación.

Figura 65. Comparación de caudales



Para efecto de comparación de caudales, también se puede encontrar el caudal teórico utilizando los coeficiente **K** y **n** para el sistema métrico, indicados en la tabla III, extraída del Manual de Hidráulica.

$$Q_{teórico} = K\ H^{n}$$

Sustituyendo valores de coeficientes indicados en tabla III y haciendo la conversión para obtener valores de caudal en l/s:

$$Q_{teórico} = 0.176 * (H / 100)^{1.547} * 1000$$

$$\boxed{Q_{teórico} = 0.14175\ H^{1.547}} = \text{l/s}$$

Al hacer la comparación se puede observar que los valores varían en una mínimo porcentaje, con lo cual se concluye que se puede hacer uso de cualquiera de los tres métodos para encontrar caudales como son:

1. Método volumétrico
2. Método con ecuación generada
3. Método con ecuación teórica (coeficientes TABLA III)

TABLA XXXIV. Comparación de caudales

H (cm)	Qr = V / t (l/s)	Qgenerado con Ec. calibrada (l/s)	Qteórico (l/s)
1.9	0.2927	0.2996	0.3826
2.3	0.4307	0.4178	0.5142
3.6	0.9247	0.9115	1.0283
4.2	1.2072	1.1921	1.3052
4.9	1.5101	1.5590	1.6567
6.0	2.2756	2.2181	2.2663
7.1	3.0585	2.9735	2.9404
8.0	3.5447	3.6602	3.5367
8.9	4.3646	4.4067	4.1708
10.2	5.7163	5.5873	5.1501

Como complemento a los resultados obtenidos en el ensayo del canal Parshall con garganta **W** = 3 pulg. (7.6 cm), se incluyen los valores de caudales reales y caudales generados con la ecuación propia del canal ensayado, expresados en l/s.

Habiendo realizado las conversiones respectivas y graficando la relación de alturas y caudales reales, se tiene la ecuación generada de la siguiente forma:

$$\boxed{Q_{generado} = 5.892\ H^{1.741}} \quad = \quad (l/min)$$

Figura 66. Gráfica alturas y caudales reales en l/min

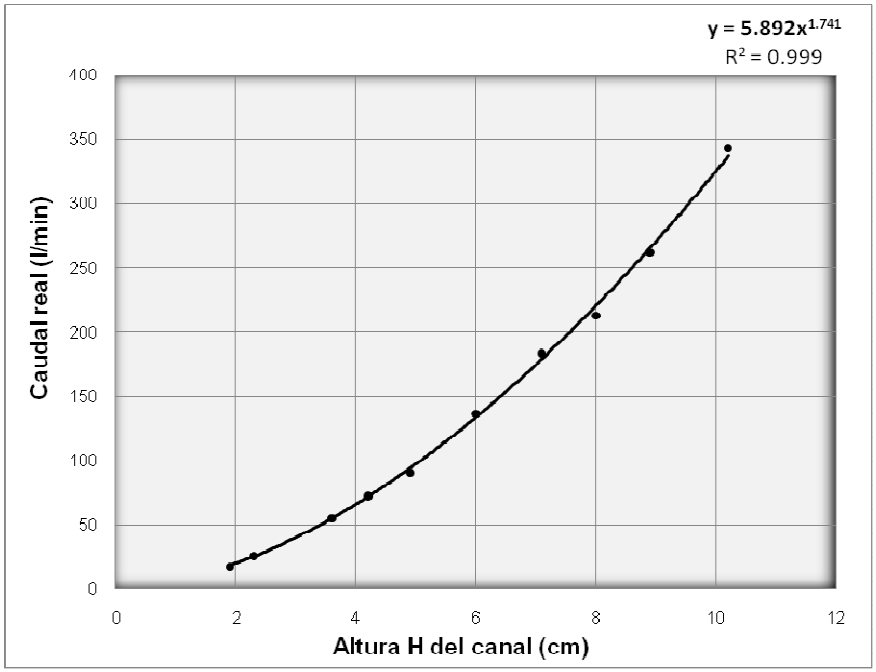


TABLA XXXV. Caudales en l/min

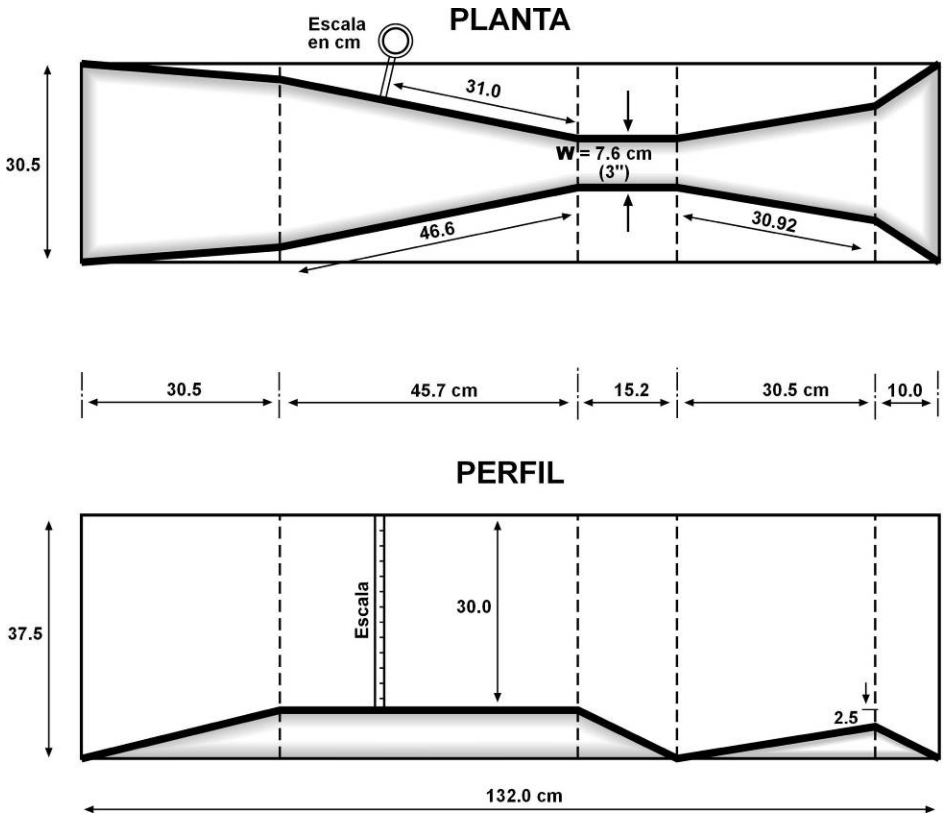
H (cm)	Qr = V / t (l/min)	Qgenerado (l/min)
1.9	17.5645	18.0124
2.3	25.8398	25.1207
3.6	55.4804	54.8006
4.2	72.4336	71.6704
4.9	90.6043	93.7333
6.0	136.5365	133.3595
7.1	183.5079	178.7737
8.0	212.6815	220.0607
8.9	261.8745	264.9420
10.2	342.9808	335.9198

5.4. Instructivo de laboratorio para ensayo con canal Parshall

Marco teórico:

El ensayo de laboratorio está enfocado a conocer el funcionamiento de los aforadores Parshall bajo condiciones reales de trabajo, los cuales son dispositivos muy confiables y de fácil operación. Su uso se extiende a regular y medir el caudal en canales de riego, cauces de ríos no navegables, drenajes, etc.

Para el esayo se utiliza un canal Parsahll fabricado de acrílico transparente, con un espesor de 5 mm, reforzado con barras roscadas de 3/8 pulg. de diámetro, con una garganta **W** = 3 pulg. (7.6 cm). Para el cual se debe encontrar la ecuación generada propia de este dispositivo medidor de caudales.



Equipo:

- Canal Parshall
- Canal hidrodinámico
- Tanque de aquietamiento
- Cronómetro

Procedimiento:

- Instalar el canal Parshall dentro del canal hidrodinámico
- Verificar que el tanque subterráneo se encuentre lleno
- Verificar que la válvula de descarga esté cerrada
- Poner en funcionamiento la bomba y graduar el paso de agua por medio de la válvula de descarga
- Esperar a que se estabilize el flujo de agua a efecto de tomar lecturas precisas, empezando con tirantes bajos e ir aumentando gradualmente
- Tomar la lectura de **H** en centímetros en la escala de canal Parshall
- Para cada altura tomar tiempo de llenado del tanque utilizando el cronómetro
- Tomar la lectura del piezómetro del tanque para concer el volúmen de agua
- Vaciar el tanque
- Aumentar el paso del caudal de agua por medio de la válvula de descarga para tomar la siguiente lectura de **H**
- Repetir el procedimiento para diferentes caudales

Cálculo de la ecuación propia del canal Parshall

- Según diversos experimentos y cálculos se llega a la obtención de la fórmula general para los medidores Parshall, la cuál es de tipo exponencial:

$$\boxed{Q = K H^{n}}$$

De donde se deben encontrar los valores de **K** y **n** a partir de los siguientes datos obtenidos en el ensayo:

altura H (cm)	**tiempo 1** (s)	**volumen 1** (l)	**tiempo 2** (s)	**volumen 2** (l)

- Luego se calculan los caudales por el método volumétrico, que consiste en dividir el volumen medido en el tanque entre el tiempo transcurrido de llenado.

$$Q = \frac{\text{Volumen}}{\text{tiempo}}$$

- Ya calculados ambos caudales se procede a obtener el promedio y así encontrar el caudal real para cada altura **H**.

$$Q_{real} = \frac{(Q1 + Q2)}{2}$$

- Después se encuentran los valores de **K** y **n** de la ecuación general:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{K}\,\mathbf{H}^{\mathbf{n}}$$

Aplicando logaritmos:

$$\log \mathbf{Q} = \log \mathbf{K} + \mathbf{n} \log \mathbf{H}$$

Se obtiene la ecuación de una recta:

$$\boxed{\mathbf{Y} = \mathbf{m}\,\mathbf{X} + \mathbf{b}}$$

Donde:

$$\mathbf{Y} = \log \mathbf{Q}$$
$$\mathbf{m} = \mathbf{n}$$
$$\mathbf{X} = \log \mathbf{H}$$
$$\mathbf{b} = \log \mathbf{K}$$

- Se calculan los logaritmos del caudal real y la altura **H** por medio del programa Excel. Luego se construye la gráfica asignando al eje **X** los valores del logaritmo de **H** y al eje **Y** los del caudal real, al mismo tiempo que se inserta una línea de tendencia que generará la ecuación de la recta.

- Sustituyendo valores en la ecuación de la línea de tendencia, se puede obtener el valor de **n**, que será el número junto a la variable **X.**

- También se obtiene el valor de **K**: $\mathbf{K} = \log^{-1}(\mathbf{b})$

- Con los datos encontrados y sustituyendo valores, se obtiene la ecuación generada propia del canal Parshall:

$$\boxed{Q_{generado} = 0.098\ H^{1.741}}$$

- Con la ecuacion generada ya encontrada, se sustituyen valores de **H** y se obtienen los caudales generados con la ecuación. Se procede a graficar colocando en el eje X los valores de las alturas **H** y en el eje Y los del caudal generado, agragándole una linea de tendencia que brindará la ecuación, que debe ser igual a la encontrada por la forma descrita anteriormente.

- Se comparan ambos caudales: el real y el generado con la ecuación para calcular el porcentaje de error entre ambos, el cual no debería ser mayor al 5%, luego se generan las gráficas de ambos caudales para visualizar de una mejor forma las tendencias que presentan.

CONCLUSIONES

1. Los vertederos son medidores de caudal que presentan la ventaja de ser de fácil elaboración, ya que su diseño es bastante simple y esto representa economía para su construcción.

2. Los vertederos son apropiados para cauces de ríos no navegables, sistemas de riego, no presentan obstáculo para sólidos en suspensión, es necesario darles mantenimiento periódicamente con el fín de evitar la acumulacion de grava o desechos pesados en su parte inferior.

3. Al efectuar aforos con el uso de vertederos, el más adecuado para caudales grandes es el rectangular y para caudales pequeños es el triangular.

4. Para efectos de fabricación se puede indicar que los vertederos son de los dispositivos de aforo más económicos, debido a su sencillez y simplicidad de diseño, mientras que los canales Parshall son de alto costo por su diseño y además requieren de mano de obra precisa en su construcción.

5. El canal Parshall es un medidor de caudal que presenta la ventaja de ser fabricado de diversos materiales por ejemplo: la fibra de vidrio, el acrílico, láminas de acero o fabricados in situ de mampostería como ladrillo, blocks de concreto o fundidos con concreto reforzado.

6. Los canales Parshall también tienen la ventaja de necesitar una sola lectura o medida de carga para la toma de datos.

7. Los canales Parshall por lo general operan con condiciones no sumergidas o de flujo libre, con la profundidad crítica en la sección contraída o garganta y un resalto hidráulico en la sección de salida.

8. Existen varias fórmulas, coeficientes y tablas para designar valores de caudales para determinadas dimensiones de gargantas de canales Parshall, pero se determinó que es más confiable y preciso encontrar la ecuación propia para cada uno que se construya, con base en la calibración experimental de los mismos y obtener porcentajes de error menores al 5%.

RECOMENDACIONES

1. Al realizar mediciones de caudal con vertederos, es importante que el flujo sobre la cresta sea libre y no presente escurrimientos en sus paredes, ya que esto afectará la precisión de las fórmulas, dándo resultados no confiables.

2. Cuando se proceda a tomar lecturas de carga **H,** en vertederos o canal Parshall, se debe esperar a que se estabilice el flujo de agua en el canal hidrodinámico, para obtener medidas precisas.

3. Los canales Parshall son apropiados para regular y medir caudales que trasladen desechos sólidos.

4. Efectuar un mantenimiento periódico a los vertederos, canal Parshall y canal hidrodinámico utilizados en los ensayos de laboratorio, a efecto de obtener medidas precisas y confiables.

BIBLIOGRAFÍA

1. De Azevedo, J. M. y Guillermo Acosta A. **Manual de Hidráulica.** 6ª ed. Mexico: Harla, 1976. 578 pp.

2. Giles, Ronald V. **Mecánica de los fluidos e Hidráulica.** (Schaum). Mexico: McGraw Hill, s.a. 273 pp.

3. Merrit, Frederick S. **Manual del ingeniero civil.** 2ª ed. (vol. IV). Mexico: McGraw Hill, 1996. 170 pp.

4. Streeter, Victor L. y E. Benjamin Wylie. **Mecánica de los Fluidos.** 3ª ed. Mexico: McGraw Hill, 1993. 595 pp.

5. Villón, Máximo. **Hidráulica de canales.** Costa Rica: Tecnológica de Costa Rica, 1995. 487 pp.