



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

## **CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS DE PARED GRUESA**

**Michael Arturo Gómez Medrano**

Asesorado por el Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Guatemala, agosto de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

## **CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS DE PARED GRUESA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**MICHAEL ARTURO GOMEZ MEDRANO**

ASESORADO POR EL ING. LUIS MANUEL SANDOVAL MENDOZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
EXAMINADOR	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

### **CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS DE PARED GRUESA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha agosto de 2011.



**Michael Arturo Gómez Medrano**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 16 de Mayo de 2012

Ingeniero

Pedro Antonio Aguilar Polanco

Jefe del Departamento de Hidráulica

Facultad de Ingeniería

Después de revisar el trabajo de graduación del estudiante Michael Arturo Gómez Medrano, quien se identifica con carné No. 2005-15925, titulado CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS DE PARED GRUESA, 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](http://www.ingenieria-usac.edu.gt)



Guatemala,  
18 de junio de 2012

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

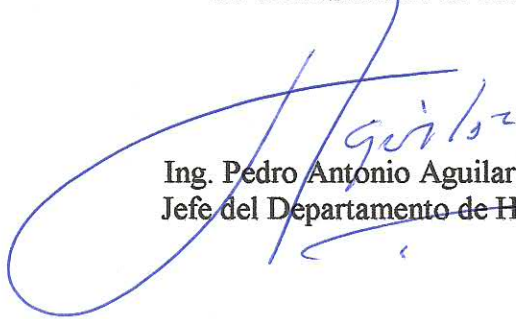
Estimado Ingeniero Montenegro,

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS DE PARED GRUESA**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Michael Arturo Gómez Medrano, quien contó con la asesoría del Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza.

Considero este trabajo está bien desarrollado y representa un aporte para el área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Jefe del Departamento de Hidráulica



FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO  
DE  
HIDRAULICA  
USAC

/bbdeb.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
[www.ingenieria-usac.edu.gt](http://www.ingenieria-usac.edu.gt)



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza y del Jefe del Departamento de Hidráulica, Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco al trabajo de graduación del estudiante Michael Arturo Gómez Medrano, titulado **CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS DE PARED GRUESA**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, agosto de 2012.

/bbdeb.





Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 400.2011

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS DE PARED GRUESA**, presentado por el estudiante universitario **Michael Arturo Gómez Medrano**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 27 de agosto de 2012

/gdech





## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por ser el creador y darme la vida, gracias por sus bendiciones recibidas en mi vida.
<b>Mi padres</b>	A mi padre por su trabajo y esfuerzo que Dios lo tenga en su gloria, a mi madre por su esmero y dedicación, además de su amor y comprensión a lo largo de mi vida.
<b>Mis hermanos</b>	Por ser una parte importante de mi vida y apoyarme siempre.
<b>Mis sobrinos</b>	Por su cariño y apoyo.
<b>Mis cuñados</b>	Por su aprecio y amistad.
<b>Ing. Luis Manuel Sandoval</b>	Por su amistad y el apoyo que me brindó al asesorarme en mi trabajo de graduación.
<b>Ing. Fredy Contreras</b>	Por su amistad y apoyo brindado en la elaboración de los dispositivos.

**Bienvenido García**

Por su amistad incondicional y el apoyo que me brindó en la realización de mi trabajo de graduación.

**Mis amigos**

Por lo momentos pasados a lo largo de la carrera.

**Universidad de San Carlos  
de Guatemala**

En especial a la Facultad de ingeniería.

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Mis padres</b>	Esteban Gómez Álvarez (q.e.p.d.) e Isabel Medrano López.
<b>Mis abuelos</b>	Por su cariño y afecto.
<b>Mis hermanos</b>	Silvia, Francis, Cristy, Alfredo (q.e.p.d.), Sergio y Jakeline Gómez Medrano.
<b>Mis sobrinos</b>	Esteban y Jenifer Lainez Gómez, Javier Alfredo Villatoro Gómez, Sergio Andrés Gómez Girón y Santiago Arenas Gómez.
<b>Mis cuñados</b>	Javier Villatoro y Francisco Arenas.
<b>Mi familia en general</b>	Por sus consejos y apoyo.
<b>Mis amigos y compañeros</b>	Por los momentos compartidos a lo largo de mi vida.
<b>La Facultad de Ingeniería</b>	Por formarme académicamente.
<b>La Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por los momentos vividos en ella.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XIII
GLOSARIO .....	XV
RESUMEN .....	XVII
OBJETIVOS .....	XIX
INTRODUCCIÓN .....	XXI
1. MEDICIÓN DE CAUDALES .....	1
1.1. Hidrometría .....	1
1.1.1. Definición .....	1
1.1.2. Importancia de la medición de caudales .....	1
1.2. Instrumentos de medición de flujo en canales abiertos.....	2
1.2.1. Canal Parshall .....	2
1.2.2. Perfil de Creager .....	4
1.2.3. Vertederos.....	6
1.2.4. Compuerta .....	9
1.2.5. Otros métodos, método hidráulico, perfil de velocidades .....	11
2. VERTEDEROS .....	21
2.1. Definición de vertederos .....	21
2.2. Clasificación de los vertederos.....	22
2.2.1. Vertederos de pared gruesa.....	23
2.2.1.1. Rectangular .....	23
2.2.1.2. De cresta redondeada .....	27

2.2.2.	Vertederos de pared delgada.....	29
2.2.3.	Ecuaciones para el cálculo de caudal para secciones rectangulares en vertederos de pared gruesa .....	30
2.2.4.	Vertederos con descarga libre .....	32
2.2.5.	Vertederos con descarga ahogada .....	32
2.3.	Clasificación en función del espesor de pared y el tirante sobre la cresta .....	33
3.	ENSAYO DE VERTEDEROS .....	35
3.1.	Diseño y construcción de vertederos para determinación de caudales.....	35
3.1.1.	Vertedero rectangular con descarga libre .....	37
3.2.	Procedimiento para la realización de los ensayos. Tanque Calibrado para la obtención del caudal real observado .....	37
3.3.	Calibración de los vertederos ensayados y determinación de las fórmulas experimentales .....	41
3.3.1.	Calibración de los vertederos rectangulares de pared gruesa y cálculo de las ecuaciones experimentales.....	41
3.3.1.1.	Ensayo para vertedero rectangular de pared gruesa de espesor de pared de 12 cm y ancho de solera de 40 cm ....	41
3.3.1.1.1.	Obtención de resultados.....	42
3.3.1.1.2.	Cálculo del caudal con la fórmula general o caudal teórico .....	47

3.3.1.2.	Ensayo para vertedero rectangular de pared gruesa de espesor de pared de 22 cm ancho de solera de 40 cm.....	51
3.3.1.2.1.	Obtención de resultados.....	52
3.3.1.2.2.	Cálculo del caudal con la fórmula general o caudal teórico .....	55
3.3.1.3.	Ensayo para vertedero rectangular de pared gruesa de espesor de pared de 25 cm y ancho de solera de 40cm .....	59
3.3.1.3.1.	Obtención de resultados.....	60
3.3.1.3.2.	Cálculo del caudal con la fórmula general o caudal teórico.....	63
3.3.1.4.	Ensayo para vertedero rectangular de pared gruesa de espesor de pared de 12 cm y ancho de solera de 52 cm .....	67
3.3.1.4.1.	Obtención de resultados.....	68
3.3.1.4.2.	Cálculo del caudal con la fórmula general o caudal teórico.....	72



3.3.1.5.	Ensayo para vertedero rectangular de pared gruesa de espesor de pared de 18 cm y ancho de solera de 52 cm .....	75
3.3.1.5.1.	Obtención de resultados.....	76
3.3.1.5.2.	Cálculo del caudal con la fórmula general o caudal teórico .....	80
3.3.1.6.	Ensayo para vertedero rectangular de pared gruesa de espesor de pared de 25 cm y ancho de solera de 52 cm .....	84
3.3.1.6.1.	Obtención de resultados.....	85
3.3.1.6.2.	Cálculo del caudal con la fórmula general o caudal teórico .....	88
3.3.1.7.	Ensayo para vertedero rectangular de pared gruesa de espesor de pared de 12 cm y ancho de solera de 76 cm .....	92
3.3.1.7.1.	Obtención de resultados.....	93
3.3.1.7.2.	Cálculo del caudal con la fórmula general o caudal teórico .....	97

3.3.1.8.	Ensayo para vertedero rectangular de pared gruesa de espesor de pared de 16 cm y ancho de solera de 76 cm .....	101
3.3.1.8.1.	Obtención de resultados .....	102
3.3.1.8.2.	Cálculo del caudal con la fórmula general o caudal teórico.....	105
3.3.1.9.	Ensayo para vertedero rectangular de pared gruesa de espesor de pared de 25 cm y ancho de solera de 76 cm .....	109
3.3.1.9.1.	Obtención de resultados .....	110
3.3.1.9.2.	Cálculo del caudal con la fórmula general o caudal teórico.....	115
CONCLUSIONES .....		119
RECOMENDACIONES .....		121
BIBLIOGRAFÍA.....		123



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Canal de aforo Parshall.....	3
2.	Planta de canal Parshall .....	3
3.	Perfil de Creager .....	4
4.	Gráfica de Creager.....	5
5.	Vertedero rectangular .....	6
6.	Vertedero rectangular .....	7
7.	Vertedero de cresta delgada .....	8
8.	Vertedero de cresta ancha.....	9
9.	Compuerta plana.....	10
10.	Sección transversal.....	16
11.	Velocidades constatadas en el canal de Sudbury (valores en m/s) .....	17
12.	Variación de las velocidades en las verticales (1), (2) y (3) .....	18
13.	Variación de la velocidad con la profundidad .....	18
14.	Vertedero fabricado con mampostería sobre el río Segura, Murcia, España.....	22
15.	Vertederos de pared delgada y pared delgada .....	24
16.	Vertedero de pared delgada.....	24
17.	Vertedero de pared gruesa .....	25
18.	Vertedero de cresta redondeada.....	28
19.	Vertedero de cresta delgada .....	29
20.	Aplicación de Bernoulli .....	
21.	Vertedero con descarga libre .....	32

22.	Vertedero con descarga ahogada .....	33
23.	Canal.....	35
24.	Equipo para estrangular el flujo .....	36
25.	Dimensiones internas del canal .....	36
26.	Dimensiones de vertedero rectangular de pared gruesa $e = 12\text{ cm}$ y $b = 40\text{ cm}$ .....	37
27.	Vertedero instalado .....	38
28.	Vertedero en funcionamiento .....	38
29.	Zona aireada bajo el vertedero .....	39
30.	Toma de lecturas de carga $H$ .....	39
31.	Depósito utilizado para aforo volumétrico .....	40
32.	Toma de volumen en el depósito .....	40
33.	Vertedero instalado .....	42
34.	Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas $H$ .....	45
35.	Curva de calibración .....	46
36.	Determinación del coeficiente de descarga .....	48
37.	Comparación de caudales .....	50
38.	Vertedero instalado .....	51
39.	Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas $H$ .....	53
40.	Curva de calibración .....	55
41.	Determinación del coeficiente de descarga .....	56
42.	Comparación de caudales .....	58
43.	Vertedero instalado .....	59
44.	Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas $H$ .....	61
45.	Curva de calibración .....	63
46.	Determinación del coeficiente de descarga .....	64
47.	Comparación de caudales .....	66
48.	Vertedero instalado .....	67
49.	Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas $H$ .....	69

50.	Curva de calibración .....	71
51.	Determinación del coeficiente de descarga.....	73
52.	Comparación de caudales.....	75
53.	Vertedero instalado .....	76
54.	Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H.....	78
55.	Curva de calibración .....	80
56.	Determinación del coeficiente de descarga.....	81
57.	Comparación de caudales.....	83
58.	Vertedero instalado .....	84
59.	Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H.....	86
60.	Curva de calibración .....	88
61.	Determinación del coeficiente de descarga.....	90
62.	Comparación de caudales.....	92
63.	Vertedero instalado .....	93
64.	Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H.....	95
65.	Curva de calibración .....	97
66.	Determinación del coeficiente de descarga.....	98
67.	Comparación de caudales.....	100
68.	Vertedero instalado .....	101
69.	Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H.....	103
70.	Curva de calibración .....	105
71.	Determinación de coeficiente de descarga .....	106
72.	Comparación de caudales.....	108
73.	Vertedero instalado .....	109
74.	Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H.....	112
75.	Curva de calibración .....	114
76.	Determinación del coeficiente de descarga.....	116
77.	Comparación de caudales.....	118

## TABLAS

I.	Valores indicativos del coeficiente de rugosidad, $n$ de Manning .....	14
II.	Valores de $\mu$ .....	26
III.	Datos obtenidos ensayo de vertedero rectangular de pared gruesa $e= 12$ cm y $b= 40$ cm.....	42
IV.	Caudales observados .....	43
V.	Logaritmos de caudales observados y cargas .....	44
VI.	Caudales observados y generados con la ecuación de calibración.	46
VII.	Caudales observados y teóricos .....	48
VIII.	Comparación de caudales teórico y corregido .....	49
IX.	Comparación de caudales .....	50
X.	Datos obtenidos de ensayo de vertedero rectangular de pared gruesa $e= 22$ cm y $b= 40$ cm.....	51
XI.	Caudales observados .....	52
XII.	Logaritmos de caudales observados y de cargas .....	53
XIII.	Caudales observados y generados con la ecuación de calibración.	54
XIV.	Caudales observados y teóricos .....	56
XV.	Comparación de caudales teórico y corregido .....	57
XVI.	Comparación de caudales .....	58
XVII.	Datos obtenidos ensayo de vertedero rectangular de pared gruesa $e= 25$ cm y $b= 40$ cm .....	59
XVIII.	Caudales observados .....	60
XIX.	Logaritmos de caudales observados y de cargas .....	61
XX.	Caudales observados y generados con la ecuación de calibración.	62
XXI.	Caudales observados y teóricos .....	64
XXII.	Comparación de caudales teórico y corregido .....	65
XXIII.	Comparación de caudales .....	66



XXIV.	Datos obtenidos ensayo de vertedero rectangular de pared gruesa $e = 12$ cm y $b = 52$ cm .....	67
XXV.	Caudales observados.....	68
XXVI.	Logaritmos de caudales observados y de cargas .....	69
XXVII.	Caudales observados y generados con la ecuación de calibración .....	71
XXVIII.	Caudales observados y teóricos .....	72
XXIX.	Comparación de caudales teórico y corregido .....	74
XXX.	Comparación de caudales.....	74
XXXI.	Datos obtenidos ensayo de vertedero rectangular de pared gruesa $e = 18$ cm y $b = 52$ cm .....	76
XXXII.	Caudales observados.....	77
XXXIII.	Logaritmos de caudales observados y cargas .....	78
XXXIV.	Caudales observados y generados con la ecuación de calibración .....	79
XXXV.	Caudales observados y teóricos .....	81
XXXVI.	Comparación de caudales teórico y corregido .....	82
XXXVII.	Comparación de caudales.....	83
XXXVIII.	Datos obtenidos ensayo de vertedero rectangular de pared gruesa $e = 25$ cm y $b = 52$ cm .....	84
XXXIX.	Caudales observados.....	85
XL.	Logaritmos de caudales observados y de cargas .....	86
XLI.	Caudales observados y generados con la ecuación de calibración .....	87
XLII.	Caudales observados y teóricos.....	89
XLIII.	Comparación de caudales teórico y corregido .....	91
XLIV.	Comparación de caudales.....	91
XLV.	Datos obtenidos ensayo de vertedero rectangular de pared gruesa $e = 12$ cm y $b = 76$ cm .....	93

XLVI.	Caudales observados .....	94
XLVII.	Logaritmos de caudales observados y de cargas.....	95
XLVIII.	Caudales observados y generados con la ecuación de calibración .....	96
XLIX.	Caudales observados y teóricos.....	98
L.	Comparación de caudales teórico y corregido.....	99
LI.	Comparación de caudales .....	100
LII.	Datos obtenidos ensayo de vertedero rectangular de pared gruesa $e = 16$ cm y $b = 76$ cm .....	101
LIII.	Caudales observados .....	102
LIV.	Logaritmos de caudales observados y de cargas.....	103
LV.	Caudales observados y generados con la ecuación de calibración .....	104
LVI.	Caudales observados y teóricos.....	106
LVII.	Comparación de caudales teórico y corregidos.....	107
LVIII.	Comparación de caudales .....	108
LIX.	Datos obtenidos ensayo de vertedero rectangular de pared gruesa $e = 25$ cm y $b = 76$ cm .....	110
LX.	Caudales observados .....	111
LXI.	Logaritmos de caudales observados y de cargas.....	112
LXII.	Caudales observados y generados con la ecuación de calibración .....	114
LXIII.	Caudales observados y teóricos.....	115
LXIV.	Comparación de caudales teórico y corregidos.....	117
LXV.	Comparación de caudales .....	117

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$g$	Aceleración de la gravedad
$H$	Altura de carga alcanzada por el agua
$B$	Ancho del canal de acceso al vertedero
$\theta$	Ángulo teta
$Q$	Caudal
$K$	Coeficiente
$C_d$	Coeficiente de descarga
$b$	Cresta o borde horizontal del vertedero
$dA$	Diferencial de área
$dQ$	Diferencial de caudal
$d$	Distancia aguas arriba del vertedero para efectuar lecturas de carga

<b>e</b>	Espesor del vertedero
<b>l</b>	Litro
<b>μ</b>	Mu
<b>π</b>	Pi
<b>s</b>	Segundo
<b>t</b>	Tiempo
<b>v</b>	Velocidad
<b>V</b>	Volumen

## **GLOSARIO**

<b>Aforar</b>	Medir la cantidad de agua que lleva una corriente en una unidad de tiempo.
<b>Aforo</b>	Acción y efecto de aforar.
<b>Canal</b>	Es un conducto en el que el líquido fluye con una superficie sometida a la presión atmosférica.
<b>Caudal</b>	Volumen de agua que pasa por unidad de tiempo por una sección normal determinada de una corriente líquida.
<b>Corriente</b>	Movimiento de traslación continua y permanente o accidental de las aguas de un canal, río o del mar, en dirección determinada.
<b>Cresta</b>	Es el borde horizontal por donde fluye el agua.
<b>Fluido</b>	Sustancia que se deforma continuamente al ser sometida a esfuerzo de corte.
<b>Flujo</b>	Movimiento de un fluido.
<b>Vertedero</b>	Dispositivo utilizado para regular y medir caudales en cauces de ríos y canales abiertos.



## **RESUMEN**

Ante la importancia que representa para el estudiante de Ingeniería Civil el conocimiento y el adquirir criterio para la selección de un método de aforo en ríos, represas, hidroeléctricas, etc. Se presenta este trabajo de graduación, en el cual se enfatiza el estudio del funcionamiento de los vertederos de pared gruesa de sección geométrica rectangular.

En este documento se detalla el principio de funcionamiento, diseño, construcción, instalación y el método de ensayo de vertederos de pared gruesa en el Laboratorio de Hidráulica. Contiene también una recopilación bibliográfica de los principios básicos de funcionamiento de los vertederos de pared gruesa.

Además se presentan los métodos de corrección de las fórmulas teóricas que presentan algunos autores para la obtención de caudales, así como el método para encontrar las ecuaciones de calibración propias. Además se presenta la comparación de los resultados entre ambos métodos, para así obtener un mejor criterio sobre cuál utilizar.





## **OBJETIVOS**

### **General**

Construir y analizar el comportamiento de vertederos de pared gruesa de sección rectangular y calibrarlos para proponer una ecuación que de el caudal en función de la altura del vertedero.

### **Específicos**

1. Comparar los caudales dados por las ecuaciones teóricas propuestas en los textos con los caudales observados, mediante ensayos de laboratorio.
2. Determinar un factor de corrección que ajuste los valores de caudal de las ecuaciones de cada uno de los vertederos de pared gruesa con los caudales reales observados.
3. Proponer ecuaciones que involucren directamente la altura del vertedero.
4. Contar con vertederos de pared gruesa que puedan instalarse en estructuras de aforo y que brinden el caudal con adecuada precisión.
5. Elaborar un manual que contenga toda la información necesaria sobre este tipo de vertederos.



## INTRODUCCIÓN

En el campo de la ingeniería hidráulica se puede encontrar dispositivos que sirven para medir caudales ya sean de corrientes naturales o artificiales. Estos caudales pueden utilizarse para consumo humano, para riego o para generación de energía hidroeléctrica. Los vertederos de pared gruesa son utilizados para regular caudales en ríos o en canales abiertos. Es posible la obtención del caudal aproximado que circula sobre ellos conociendo la altura del nivel del agua antes del vertedor. Este tipo de vertederos es utilizado principalmente para el control de niveles en los ríos o canales, pero pueden ser también calibrados y usados como estructuras de medición de caudal.

Son estructuras fuertes que no son dañadas fácilmente y pueden manejar grandes caudales.

En el presente trabajo, en el capítulo 1 y 2 se presenta una recopilación bibliográfica de los principios básicos de funcionamiento de los vertederos de pared gruesa, que son estructuras que sirven para medir el caudal en función de la carga. En el capítulo 3 se detalla el funcionamiento, diseño, construcción y métodos de ensayo de vertederos de pared gruesa en el laboratorio de Hidráulica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, efectuando comparaciones de los caudales teóricos con los reales.

Por último se presentan las conclusiones y recomendaciones correspondientes.



# **1. MEDICIÓN DE CAUDALES**

## **1.1. Hidrometría**

Se encarga de medir, registrar, calcular y analizar los volúmenes de agua que circulan en una sección transversal de un río, canal o tubería.

### **1.1.1. Definición**

La Hidrometría, se encarga de medir, registrar, calcular y analizar los volúmenes de agua que circulan en una sección transversal de un río, canal o tubería.

En forma clásica, se define la Hidrometría como la parte de la Hidrología que tiene por objeto medir el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo dentro de una sección transversal de flujo.

La Hidrometría aparte de medir el agua, comprende también el planear, ejecutar y procesar la información que se registra de un sistema de una cuenca hidrográfica, sistema urbano de distribución de agua o de riego.

### **1.1.2. Importancia de la medición de caudales**

Es importante la medición de los caudales de agua, porque sirven para asegurar el mantenimiento para los programas adecuados de suministro, para determinar la cantidad de agua suministrada, descubrir anomalías, estimar y

averiguar el origen de las pérdidas que se produzcan en la conducción y de esta forma controlar el desperdicio del agua.

También con la medición del agua se puede planificar el uso sostenible de este recurso y se puede elaborar una base de datos para la organización de los sistemas de almacenamiento y distribución de agua en las comunidades.

## **1.2. Instrumentos de medición de flujo en canales abiertos**

Existen varios métodos e instrumentos de aforo en canales abiertos, entre las principales se encuentran:

- Canal parshall
- Perfil de Creager
- Vertederos
- Compuertas
- Otros métodos. Método hidráulico. perfil de velocidades

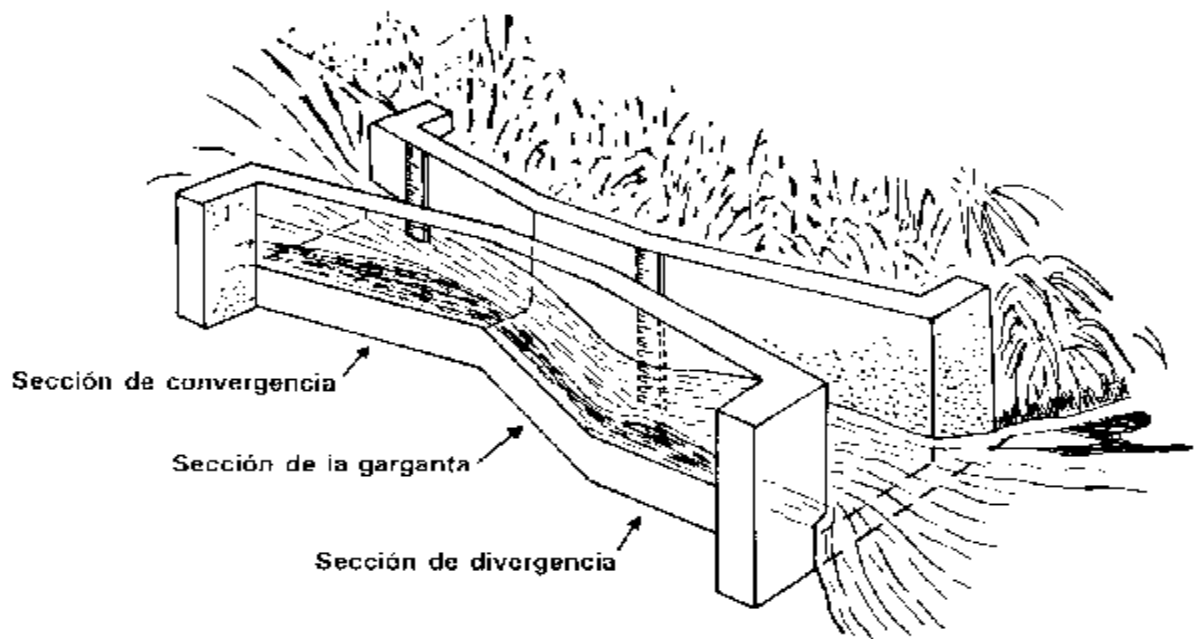
### **1.2.1. Canal Parshall**

Es un aforador constituido por una sección de convergencia, una garganta y una sección de divergencia. Las paredes del dispositivo pueden ser de metal, mampostería, concreto o plástico.

El aforador está constituido por una sección de convergencia con un piso nivelado, una garganta con un piso en pendiente hacia aguas abajo y una sección de divergencia con un piso en pendiente hacia aguas arriba. Gracias a ello el caudal avanza a una velocidad crítica a través de la garganta y con una onda estacionaria en la sección de divergencia.

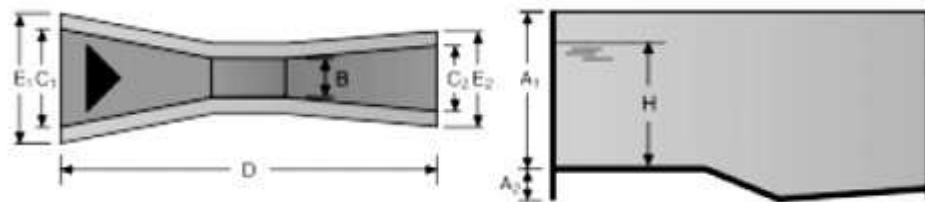


Figura 1. **Canal de aforo Parshall**



Fuente: <http://www.fao.org/docrep/T0848S/t0848s06.htm>. Consultado el 9/10/2011.

Figura 2. **Planta de canal Parshall**



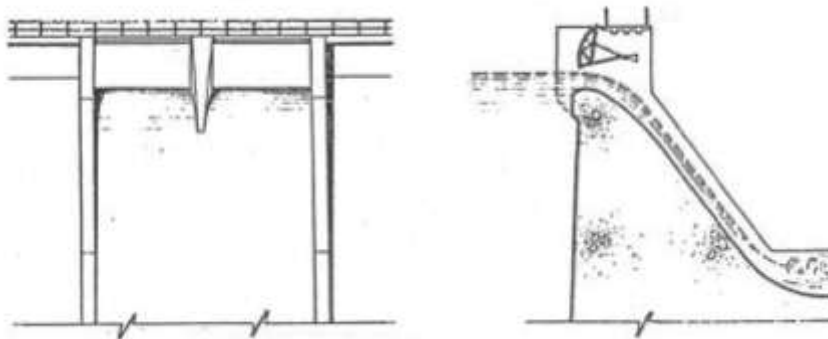
Fuente: <http://www.itp-depuracion.com/catalogo/productos.php?cat=121>.  
Consultado el 9/10/2011.

### 1.2.2. Perfil de Creager

Llamados también cimacios, se usan para evacuar caudales de creciente, pues la forma especial de su cresta permite la máxima descarga al compararlo con otra forma de vertedores para igual altura de carga de agua.

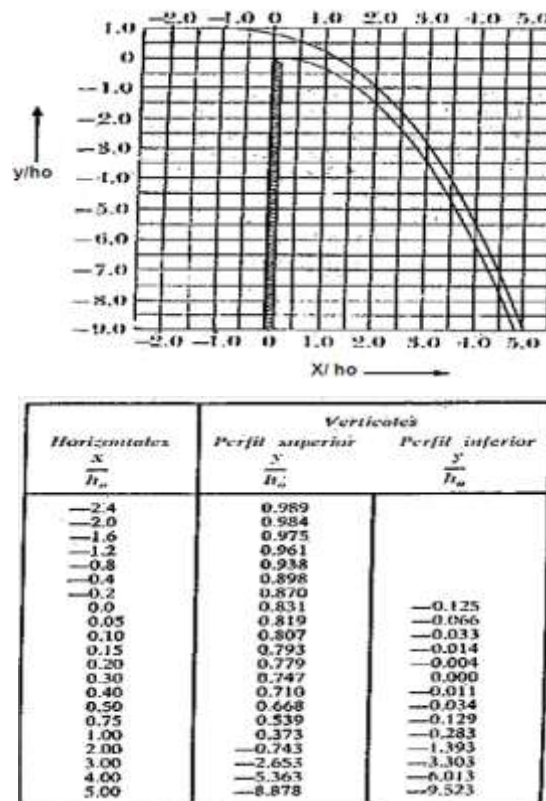
Este vertedero cuyo ancho de cresta, es igual al ancho del canal está diseñado de modo que coincida con la forma de perfil inferior de la lámina vertiente, sobre un vertedero de pared delgada hipotético.

Figura 3. Perfil de Creager



Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. Hidráulica General. p. 268.

Figura 4. Gráfica de Creager



Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. Hidráulica General. p. 270.

La ecuación es:

$$Q = 2 L h^{2/3}$$

Donde:

Q = caudal  $m^3/s$

h = altura sobre la cresta, m

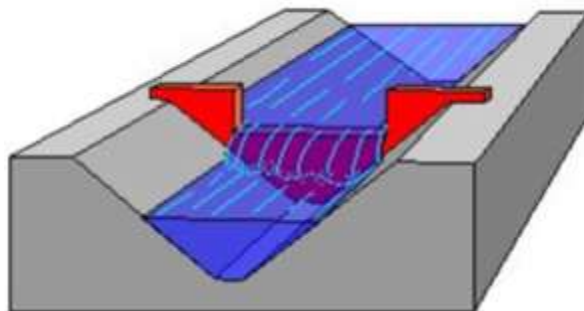
L = ancho de cresta del vertedero, m

### 1.2.3. Vertederos

Sin duda alguna, este método es el más sencillo y utilizado para medir el caudal de agua en canales abiertos. Puesto que son fáciles de fabricar o construir, y que para calcular el caudal simplemente es necesario conocer la carga de agua  $H$  que esté pasando por el vertedero en determinado momento, y utilizar la ecuación que corresponda según la sección del vertedero.

Esta altura debe medirse a una distancia aguas arriba tal, que no sea afectada por la depresión de la superficie del agua que se produce al aproximarse a la cresta.

Figura 5. **Vertedero rectangular**



Fuente: SANDOVAL, Luis. Apuntes sobre vertederos. p.6.

Figura 6. **Vertedero rectangular**



Fuente: SANDOVAL, Luis. Apuntes sobre vertederos. p.6.

Los vertederos ofrecen las siguientes ventajas en la medición del agua.

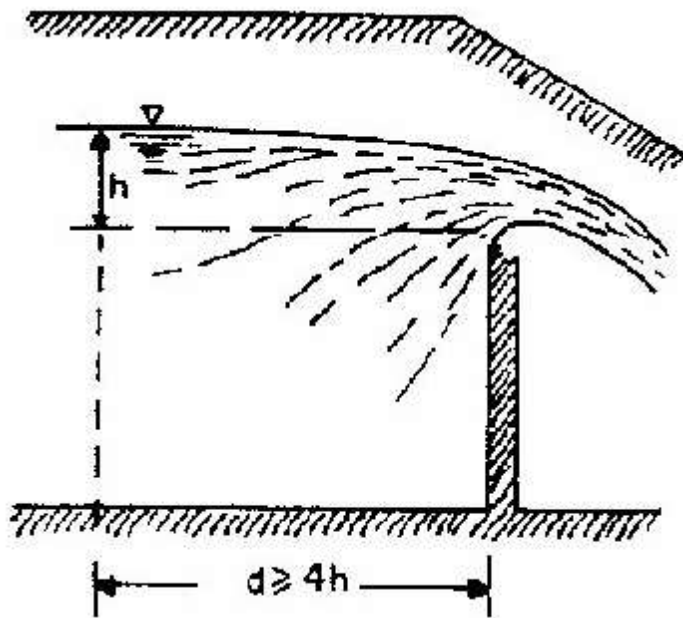
- Se logra precisión en los aforos
- La construcción de la estructura es sencilla
- No son obstruidos por los materiales que flotan en el agua
- La duración del dispositivo es relativamente larga

Hay diferentes clases de vertederos según la forma que se obligue a adoptar a la sección de la vena líquida que circula por la escotadura, de modo que puede ser: rectangular, trapezoidal, triangular, circular o de cualquier otra sección curva.

De acuerdo con el ancho de cresta puede ser:

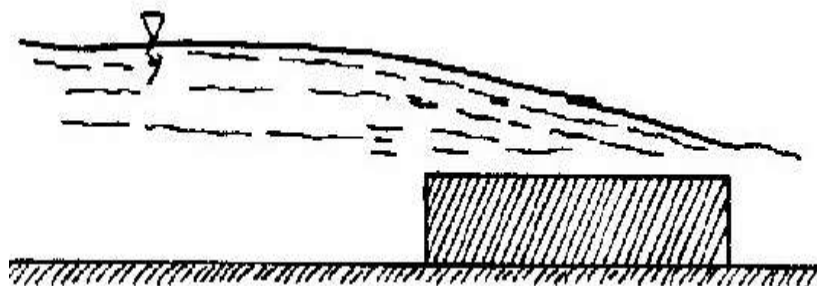
- De cresta delgada
- De cresta ancha

Figura 7. **Vertedero de cresta delgada**



Fuente: VILLÓN, Máximo. Hidráulica de canales. p. 398.

Figura 8. **Vertedero de cresta ancha**



Fuente: VILLÓN, Máximo. Hidráulica de canales. p. 398.

#### **1.2.4. Compuertas**

Las compuertas son equipos mecánicos utilizados para el control del flujo del agua y mantenimiento en los diferentes proyectos de ingeniería, tales como presas, canales y proyectos de riego.

En forma específica una compuerta consiste en una placa móvil, plana o curva, que al levantarse permite graduar la altura del orificio que se va descubriendo, a la vez que controla la descarga producida. El orificio generalmente se hace entre el piso de un canal y el borde inferior de la compuerta, por lo que su ancho coincide con el del canal.

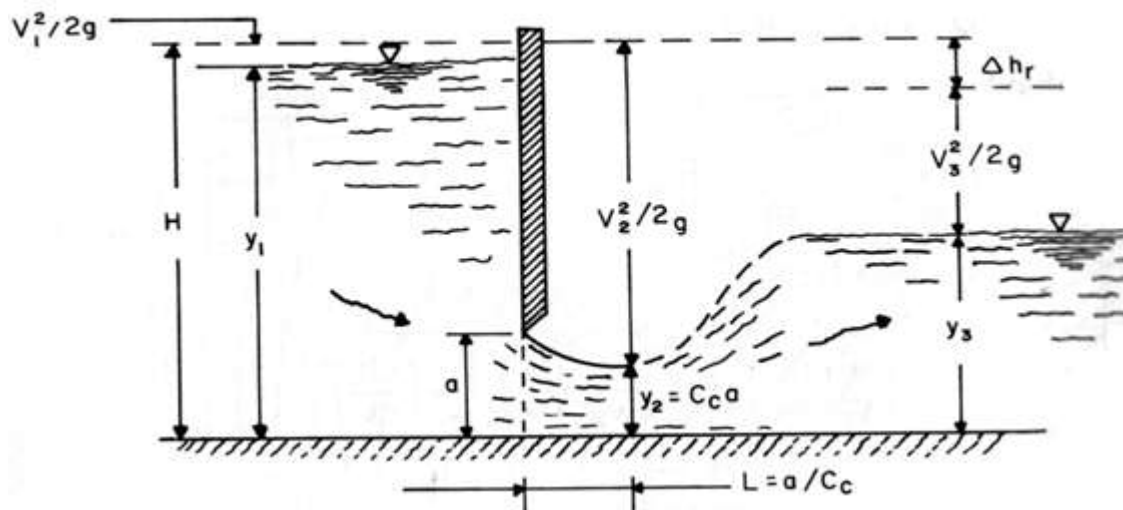
Las diferentes formas de las compuertas dependen de su aplicación, el tipo de compuerta a utilizar dependerá principalmente del tamaño y forma del orificio, de la cabeza estática, del espacio disponible, del mecanismo de apertura y de las condiciones particulares de operación.

Las principales aplicaciones de las compuertas son las siguientes:

- Control de flujo de agua
- Control de inundaciones
- Proyectos de irrigación
- Sistemas de drenaje
- Plantas de tratamiento de aguas
- Crear reservas de agua, etc

Las compuertas pueden funcionar de dos maneras según sea la influencia del régimen que se establece aguas abajo de ella. Si el régimen de aguas abajo no ahoga al torrente que se genera, la compuerta tendrá un funcionamiento libre. Si el régimen de aguas abajo ahoga al torrente, es decir, no es capaz de rechazar el resalto, la compuerta funcionará ahogada.

Figura 9. **Compuerta plana**



Fuente: VILLÓN, Máximo. Hidráulica de canales. p. 393.



### 1.2.5. Otros métodos, método hidráulico, perfil de velocidades

A continuación se presentan otros métodos con los cuales se puede determinar el caudal a través de sus fórmulas.

Método hidráulico:

Este método consiste en determinar el caudal a través del uso de fórmulas hidráulicas para canales abiertos. Entre ellas se mencionan las de Darcy-Weisbach, Chézy y Manning-Strickler. Todas requieren de las características hidráulicas y geométricas de un tramo del río: rugosidad del cauce, pendiente longitudinal del cauce (S), sección hidráulica (A) y perímetro mojado (P), cuyo caudal se quiere determinar.

La fórmula de Darcy-Weisbach para la velocidad media del flujo en canales se expresa de la siguiente manera:

$$V = \sqrt{\frac{8g}{f}} R^{1/2} S^{1/2}$$

Donde:

g = aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

R= radio hidráulico [m], el cual se define como la relación A/P

A= sección hidráulica [m<sup>2</sup>]

P= perímetro mojado [m]

S= gradiente de energía. Para flujo uniforme es igual a la pendiente del cauce [-]

$f$ = factor de fricción que depende de las características del flujo, del fluido y de la rugosidad de la superficie del canal. Tomando en cuenta que el flujo en canales, normalmente es turbulento y régimen hidráulicamente rugoso, y para fines prácticos puede usarse la ecuación de Prandtl-Von Kármán

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2 \log \left( \frac{14,84 R}{\varepsilon} \right)$$

Donde:

$\varepsilon$ = tamaño medio de las rugosidades absolutas de la superficie de contacto. Para concreto los valores típicos de  $\varepsilon$  fluctúan entre 0,5 y 3 milímetros, donde  $\varepsilon$  es 0,5 milímetros cuando la superficie no tiene irregularidades y concreto fundido con formaleta de acero; mientras que 3 milímetros cuando la formaleta es de madera no cepillada. Para canales en tierra uniforme  $\varepsilon$  puede alcanzar 10 milímetros. Para mampostería  $\varepsilon$  puede alcanzar los 20 milímetros. Para el fondo natural de ríos puede variar entre 30 y 900 milímetros.

Otra fórmula común en la hidráulica de canales es la de Chézy, la cual se expresa por:

$$V = CR^{1/2}S^{1/2}$$

Donde:

C= coeficiente de rugosidad, el cual puede calcularse mediante el factor

$$\sqrt{\frac{8g}{f}}$$

o mediante fórmulas como la de Bazin y otras que detallan en la literatura de hidráulica de canales abiertos.

La ecuación más popular en nuestro medio, es la de Manning-Strickler o simplemente Manning, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

Donde:

n= coeficiente de rugosidad [s/m<sup>1/3</sup>]. Valores de n se tabulan en la literatura de canales abiertos; por ejemplo en *Open channel hydraulics de Ven te CHOW [1959]* o en *Guide for selecting Manning's coefficients for natural channels and flood plains [USGS, 1989]*. En dichas referencias se detalla también el procedimiento para elegir valores de n para canales naturales, cuyo valor de rugosidad depende de varios factores, tales como: características de la vegetación, irregularidades del canal, obstrucciones en el canal y alineamiento del canal. La tabla 1 resume algunos valores típicos.

Tabla I. **Valores indicativos del coeficiente de rugosidad, n de MANNING**

MATERIAL	N	1/n
Concreto alisado	0,010 – 0,014	100 – 71
Concreto en bruto	0,015 – 0,020	67 – 50
Ladrillo	0,013 – 0,017	77 – 59
Piedra, según tipo	0,017 – 0,033	59 – 30
Tierra, según tipo	0,018 – 0,030	56 – 33
Cursos naturales pequeños	0,025 – 0,150	40 – 7
Planicies de inundación	0,025 – 0,200	40 – 5

Fuente: SANDOVAL, Luis. Apuntes sobre vertederos. p. 8.

Para el cálculo del caudal en una sección determinada de un canal prismático o canal natural se sigue el procedimiento siguiente:

- Seleccionar un tramo del cauce que sea estable, recto, sin posas ni rápidos, ni islas; asimismo, debe evitarse las cercanías de estructuras que obstaculicen el flujo aguas abajo, como puentes.
- El tramo debe ser alrededor de 10 veces el ancho del río.
- Determinar varias secciones transversales.
- Determinar la pendiente longitudinal a través de métodos de nivelación.
- Estimar la rugosidad y su posible variación a lo largo de cada sección.
- Determinar una sección equivalente (con una sola rugosidad) en el caso de que existen varios tramos con rugosidades diferentes.
- Utilizar una fórmula hidráulica, para el cálculo del caudal en función del nivel del agua; por ejemplo la fórmula de Manning o de Darcy-Weisbach.

Los cálculos se basan en valores promedio de rugosidad y radio hidráulico de las diferentes secciones transversales. Una opción más precisa es utilizar un modelo hidrodinámico con los datos de cada sección transversal. En este caso no se necesita forzosamente un tramo bastante regular sin obstrucciones, ya que el modelo toma las condiciones reales del cauce. Entre los modelos que pueden servir para este propósito se mencionan el HEC-RAS (del Hydrologic Engineering Center del US Army Corps of Engineers), DU-FLOW (International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering de Delft, Holanda), y otros.

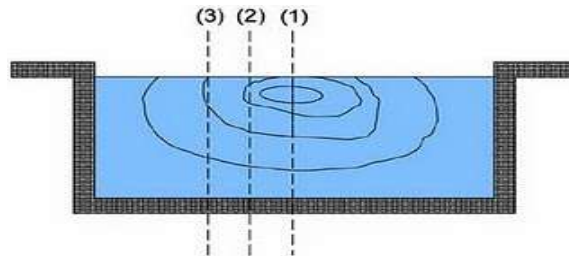
Ya que el perímetro mojado  $P$ , de una misma sección puede incluir tramos de diferentes grados de rugosidad, es necesario, antes de aplicar cualquier fórmula para la velocidad, obtener una rugosidad ponderada. Una ponderación puede hacerse mediante la siguiente ecuación, donde  $i$  es el número de tramos, en la sección, con diferente longitud y rugosidad.

$$n = \left( \sum_{i=1}^n \frac{P_i n_i^{3/2}}{P} \right)^{2/3}$$

Perfil de velocidades:

La variación de velocidad, en las secciones de los canales, viene siendo investigada desde hace mucho tiempo. Para el estudio de la distribución de las velocidades se consideran dos secciones.

Figura 10. **Sección transversal**



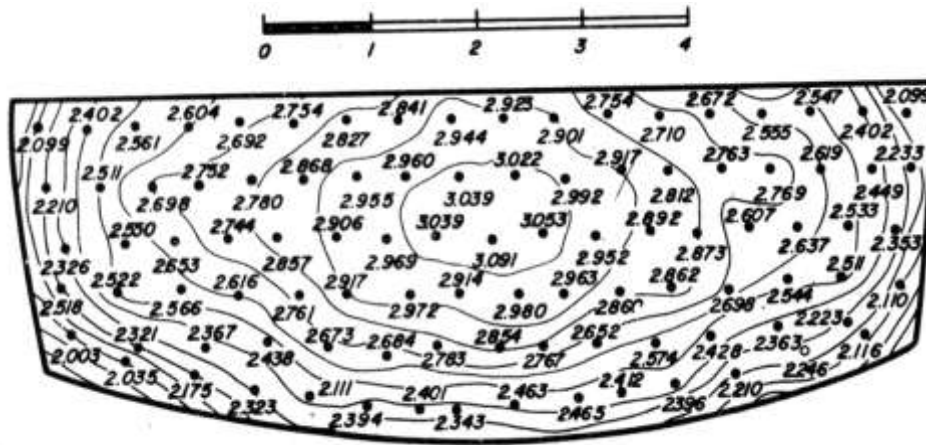
Fuente: AZEVEDO DE, J.M.; ACOSTA, A., Guillermo. Manual de hidráulica. p. 320.

- Sección transversal

La resistencia ofrecida por las paredes y por el fondo del canal, reduce la velocidad. En la superficie libre, la resistencia ofrecida por la atmósfera y por los vientos también influye sobre la velocidad. La velocidad máxima será encontrada en la vertical (1) (central), en un punto más bajo de la superficie libre.

Pueden ser consideradas las curvas *isotacas* que constituyen el lugar geométrico de los puntos de igual velocidad.

Figura 11. Velocidades constatadas en el canal de Sudbury (valores m/s)

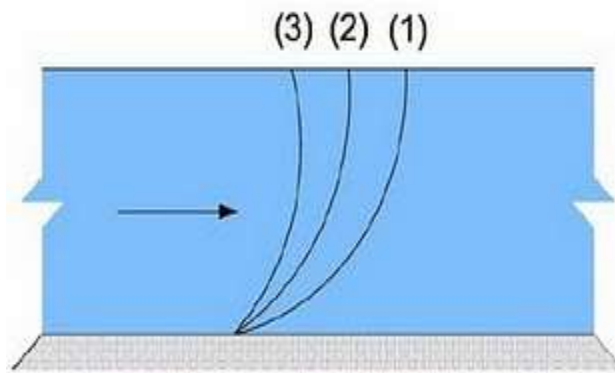


Fuente: AZEVEDO DE, J.M.; ACOSTA, A., Guillermo. Manual de hidráulica. p. 320.

- Sección longitudinal:

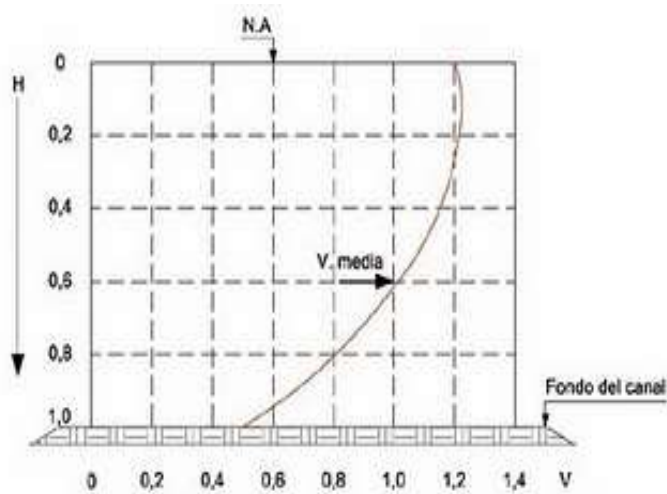
En la figura se muestra la variación de la velocidad en las verticales (1), (2) y (3), indicadas anteriormente. Considerándose la velocidad media en determinada sección como igual a 1,0, se puede trazar el diagrama de variación de la velocidad con la profundidad (figura 10).

Figura 12. **Variación de las velocidades en las verticales (1), (2) y (3)**



Fuente: AZEVEDO DE, J.M.; ACOSTA, A., Guillermo. Manual de hidráulica. p. 321

Figura 13. **Variación de la velocidad con la profundidad**



Fuente: AZEVEDO DE, J.M.; ACOSTA, A., Guillermo. Manual de hidráulica. p. 321.



## Relaciones para la velocidad media

El servicio geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey) presenta las siguientes relaciones de gran utilidad en las determinaciones y estimativos de caudal.

- La velocidad media en una vertical generalmente equivale a 80 por ciento a 90 por ciento de la velocidad superficial.
- La velocidad a los seis décimos de la profundidad, generalmente es la que más se aproxima a la velocidad media.

$$V_{\text{med}} \cong V_{0,6}$$

- Con mayor aproximación que la anterior se tiene

$$V_{\text{med}} \cong \frac{V_{0,2} + V_{0,8}}{2}$$

- La velocidad media también puede ser obtenida partiéndose de

$$V_{\text{med}} \cong \frac{V_{0,2} + V_{0,8} + V_{0,6}}{3}$$

Esta última expresión es más precisa.



## **2. VERTEDEROS**

### **2.1. Definición de vertederos**

La definición 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 el nivel y el caudal. Los canales de corrientes naturales están también sometidos a cambios debidos a erosión o depósitos. Se pueden obtener cálculos mas 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 14.

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

- 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 de flujo en galerías y canales, razón por la cual su estudio es de gran importancia.

Figura 14. **Vertedero fabricado con mampostería sobre río Segura, Murcia, España**



Fuente: <http://chsegura.es/chs/cuenca/restauracionderios/>. Consultado el 10/10/2,011

## **2.2. Clasificación de los vertederos**

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

- Forma:
  - Simples: rectangulares, triangulares, etc.
  - Compuestas: secciones combinadas como los trapezoidales.

- Espesor de la pared:
  - Vertederos de pared delgada:      fabricado de placas o madera biselada.
  - Vertederos de pared gruesa:      con  $e \geq 0,66H$
- Longitud de la cresta:
  - Vertederos sin contracciones laterales:       $L = B$
  - Vertederos con contracciones:       $L < B$

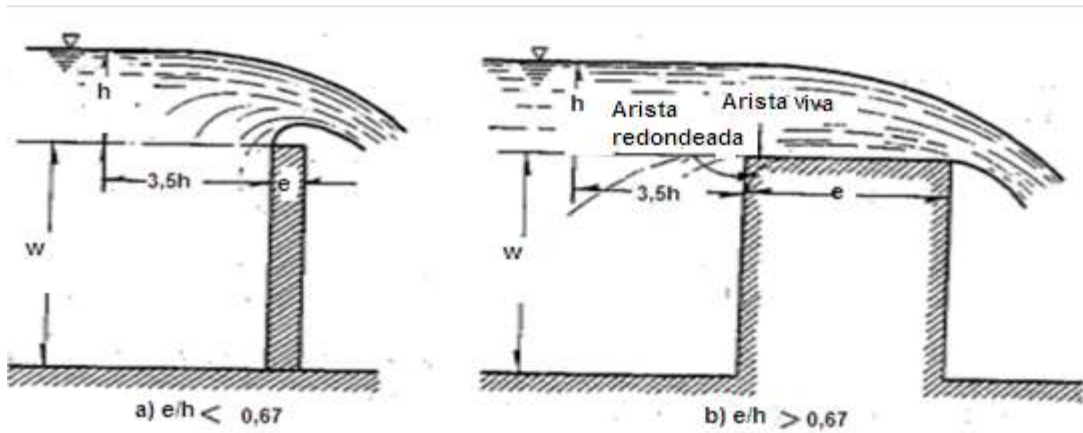
### **2.2.1. Vertederos de pared gruesa**

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.

#### **2.2.1.1. Rectangular**

En forma semejante a los orificios, si la cresta del vertedor no es una arista afilada, se presenta entonces el vertedor de pared gruesa que puede adquirir varias formas, en la figura 15 se presenta la forma más sencilla, la cual consiste en aumentar el espesor de la cresta en un vertedor rectangular sin contracciones laterales.

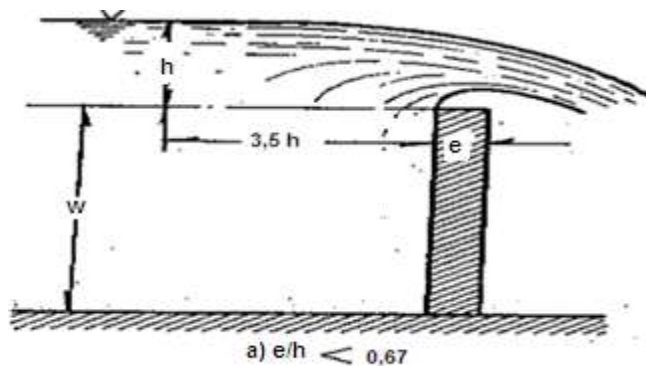
Figura 15. **Vertederos de pared delgada y gruesa**



Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. Hidráulica General. p. 267.

Cuando  $e/h < 0,67$ , el chorro se separa de la cresta y el funcionamiento es idéntico al del vertedor de pared delgada (figura. 16)

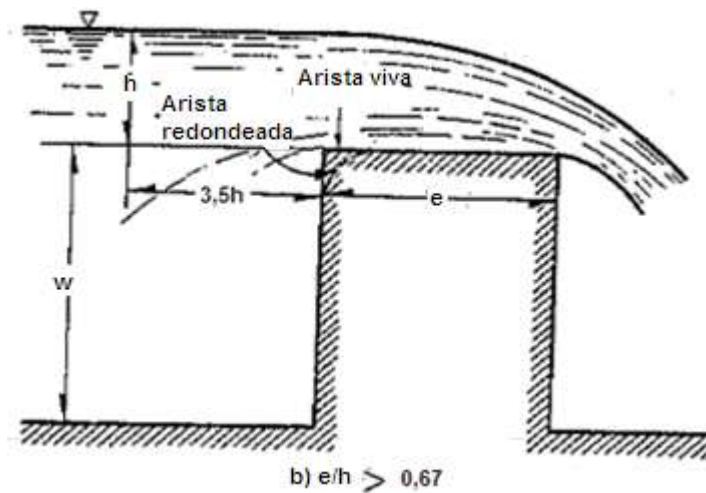
Figura 16. **Vertedero de pared delgada**



Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. Hidráulica General. p. 267.

Cuando  $e/h > 0,67$  el funcionamiento es diferente, pues la lámina vertiente se adhiere a la cresta del vertedor (figura. 17). Se presentan también distintos funcionamientos, dependiendo de la altura  $w$  de la cresta sobre el fondo del canal. Cabe aclarar que los valores del coeficiente de gasto obtenidos por diferentes autores difieren entre sí, de ahí que el procedimiento comúnmente aceptado para evaluarlo, en el caso de que  $e/h > 0,67$  y el vertedor sea rectangular, es el de Bazin; éste consiste en utilizar la ecuación de los vertederos rectangulares, afectada de un coeficiente de reducción  $\varepsilon_1$ , a saber:

Figura 17. **Vertedero de pared gruesa**



Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. Hidráulica General. p. 267.

$$Q = \varepsilon_1 C b h^{3/2} \quad (7,36)$$

Donde C es el coeficiente adecuado de un vertedor de pared delgada sin contracciones laterales, en iguales condiciones de descarga libre, que se evalúa con las ecuaciones de la cuadro 2 y que toma en cuenta la altura w de la cresta sobre el fondo del canal de acceso. El coeficiente  $\varepsilon_1$  depende de la relación e/h según la ecuación:

$$\varepsilon_1 = 0,7 + \frac{0,185}{e/h}$$

válida para relaciones con un valor hasta de e/h = 3.

Tabla II. Valores de  $\mu$

Autor	Fórmula	Límites de aplicación	Observaciones
Hegly (Ref. 30) (1921)	$\mu = \left[ 0.6075 - 0.045 \left( \frac{B-b}{B} \right) + \frac{0.0041}{h} \right] \times \left[ 1 + 0.55 \left( \frac{b}{B} \right)^2 \left( \frac{h}{h+w} \right)^2 \right]$	$0.10 \text{ m} \leq h \leq 0.60 \text{ m}$ $0.50 \text{ m} \leq b \leq 2.00 \text{ m}$ $0.20 \text{ m} \leq w \leq 1.13 \text{ m}$	El primer límite de aplicación es el más importante. Para $h/b > 0.13$ tiene mayor precisión que la fórmula SIAS.
Sociedad de Ingenieros y Arquitectos Suizos (1924) (Ref. 9) (Fórmula SIAS)	$\mu = \left[ 0.578 + 0.037 \left( \frac{b}{B} \right)^2 + \frac{3.615 - 3(b/B)^2}{1000h + 1.6} \right] \times \left[ 1 + 0.5 \left( \frac{b}{B} \right)^2 \left( \frac{h}{h+w} \right)^2 \right]$	$0.025 \leq h \leq 0.80 \text{ m}$ $b \leq 0.3 B$ $w \geq 0.30 \text{ m}$ $\frac{h}{w} \leq 1$ en el caso de contracciones laterales	Para vertedores sin contracciones laterales los límites son: $0.025 \text{ m} \leq h \leq 0.80 \text{ m}$ $0.30 \text{ m} \leq w$ $\frac{h}{w} \leq 1$ Para $h/b \leq 0.13$ , es más precisa que la de Hegly.
Hamilton-Smith	$\mu = 0.616 \left( 1 - \frac{b}{10B} \right)$	$0.075 \text{ m} \leq h \leq 0.60 \text{ m}$ $0.30 \text{ m} \leq b$ $0.30 \text{ m} \leq w$ $h \leq \frac{w}{2}$ $b \leq (B - 2h)$ $\frac{h}{b} \leq 0.5$	Si $B(h+w) < 10bh$ , se deberá reemplazar en la ec. (7.5) el valor de h por h' donde $h' = h + 1.4 \left( \frac{V_o^2}{2g} \right)$ donde: $V_o = \frac{Q}{B(h+w)}$ es la velocidad de llegada
Francis (Ref. 31)	$\mu = 0.623 \left[ 1 - 0.1n \frac{h}{b} \right] \left[ \left( 1 + \frac{V_o^2}{2gh} \right)^{3/2} - \left( \frac{V_o^2}{2gh} \right)^{3/2} \right]$	$0.18 \text{ m} \leq h \leq 0.50 \text{ m}$ $2.40 \text{ m} \leq b \leq 3.00 \text{ m}$ $0.60 \text{ m} \leq w \leq 1.50 \text{ m}$ $b \geq 3h$	$V_o = \frac{Q}{B(h+w)}$ velocidad de llegada. $n = 2$ en vertedores con contracciones laterales $n = 0$ en vertedores sin contracciones laterales.
Rehbock (1929) (Ref. 9)	$\mu = \left[ 0.6035 + 0.0813 \left( \frac{h + 0.0011}{w} \right) \right] \left[ 1 + \frac{0.0011}{h} \right]^{1/2}$	$0.01 \text{ m} \leq h \leq 0.80 \text{ m}$ $b \geq 0.30 \text{ m}$ $w \geq 0.06 \text{ m}$ $\frac{h}{w} \leq 1$	Vale sólo para vertedores sin contracciones laterales. Es muy precisa y de las más utilizadas, por su sencillez

Fuente. SOTELO ÁVILA, Gilberto. Hidráulica General. p. 246.



Cuando  $e/h > 3$  se establecen, sobre la plataforma del vertedor, condiciones de flujo con líneas de corriente paralelas a ella y de distribución de presiones hidrostática; además, se deja sentir la influencia de las pérdidas de energía por fricción y de entrada. En este caso, los resultados experimentales concuerdan con la fórmula de Gibson, para  $\varepsilon_1$ :

$$\varepsilon_1 = 0,75 + \frac{0,1}{e/h}$$

que es válida hasta valores  $e/h = 10$  y para vertederos con descarga libre.

Hay fórmulas generales que permiten tomar en consideración las pérdidas por fricción en el caso que epsilon sea grande, así como la posibilidad de redondear el umbral de entrada (Fig. 15). Considerando válida la Ec. (7,36), el coeficiente C es ahora:

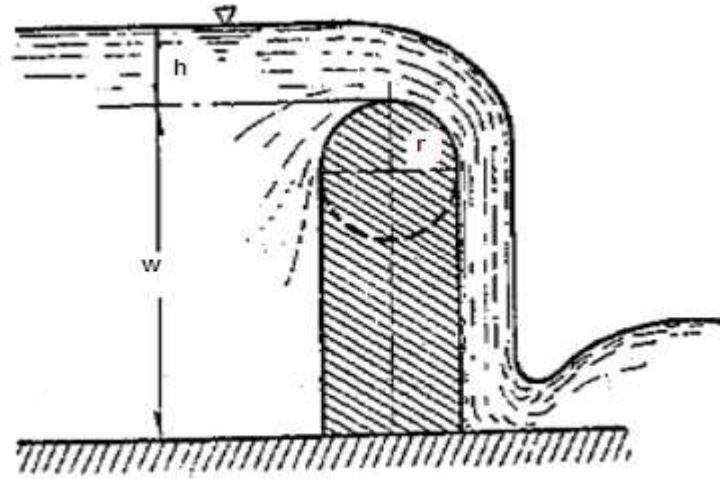
$$C = \mu \frac{2}{3} \sqrt{2g}$$

donde  $\mu$  se obtiene del cuadro 2 (tabla 7.1 del libro de HIDRÁULICA GENERAL, autor: Gilberto Sotelo Ávila).

#### **2.2.1.2. De cresta redondeada**

Cuando la cresta del vertedor se redondea, el coeficiente de gasto **C** aumenta considerablemente respecto del calculado para uno de pared gruesa. Esto se explica por una baja en la contracción del chorro sobre el vertedor, pues actúa sobre las partículas una aceleración centrífuga debido a la curvatura de las líneas de corriente.

Figura 18. **Vertedero de cresta redondeada**



Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. Hidráulica General. p. 270.

En el caso del vertedero de la figura el coeficiente  $\mu$ , de la Ec. 7.36, según *Rehbock* es:

$$\mu = 0,312 + 0,09 \frac{h}{w} + \sqrt{0,30 - 0,01 \left(5 - \frac{h}{r}\right)^2}$$

que vale para

$$h / w \leq 1, w > r > 0,2 \text{ m},$$

$$h / r \leq \left(6 - \frac{20 r}{w + 3r}\right)$$

### 2.2.2. Vertederos de pared delgada

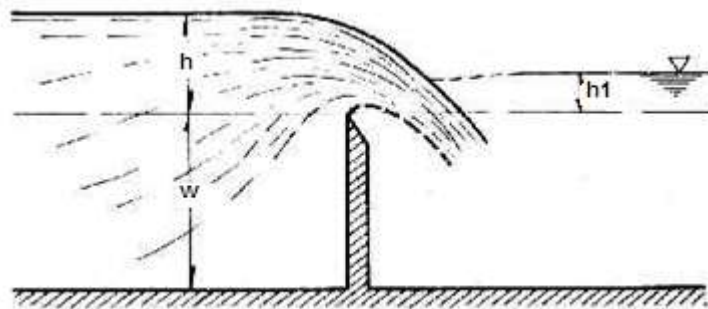
También conocidos como vertederos de cresta delgada o pared aguda. Son los vertederos contruidos de una hoja de metal, de otro material de pequeño espesor o de madera biselada, de tal manera que el chorro salte con libertad conforme deja la cara aguas arriba del vertedero.

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 19. Vertedero de cresta delgada

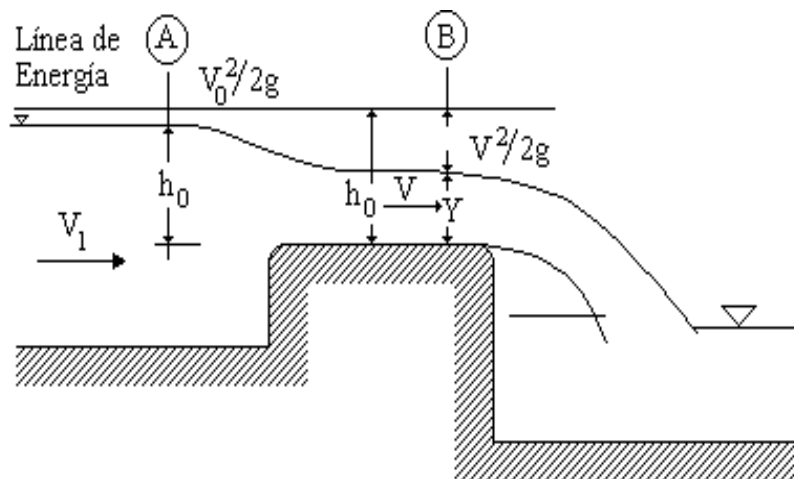


Fuente: <http://fluidos.eia.edu.co>. Consultado el 14/10/2,011

### 2.2.3. Ecuaciones para el cálculo de caudal para secciones rectangulares en vertederos de pared gruesa

A continuación se presenta una figura de la cual en los puntos A y B se toma el Bernoulli:

Figura 20. Aplicación de Bernoulli



Fuente: SANDOVAL, Luis. Apuntes sobre vertederos. p. 8.

quedando de la siguiente forma:

$$Z_A + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} = Z_B + \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + hf_{1-2}$$

$$0 = -Y + \frac{V_B^2}{2g}$$

$$V_2 = \sqrt{2gY}$$

$$d\theta = V * dA$$

$$d\theta = \sqrt{2g} * Y^{1/2} (b dY)$$

$$\int_0^H \sqrt{2g} * b * Y^{1/2} dY \rightarrow \sqrt{2g} * b = \frac{Y^{3/2}}{3/2} \Big|_0^H = \frac{2}{3} \sqrt{2g} b H^{3/2}$$

luego se halla  $\varepsilon_1$  :

$$\varepsilon_1 = 0,7 + \frac{0,185}{e/h}$$

Válida para relaciones con un valor hasta de  $e/h = 3$  y:

$$\varepsilon_1 = 0,75 + \frac{0,1}{e/h}$$

que es válida hasta valores  $e/h = 10$  y para vertederos con descarga libre.

Luego se procede a determinar el coeficiente de descarga  $C_D$  con la ecuación de *Rehbock*:

$$C_D = \left[ 0,6035 + 0,0813 \left( \frac{h+0,0011}{W} \right) \right]$$

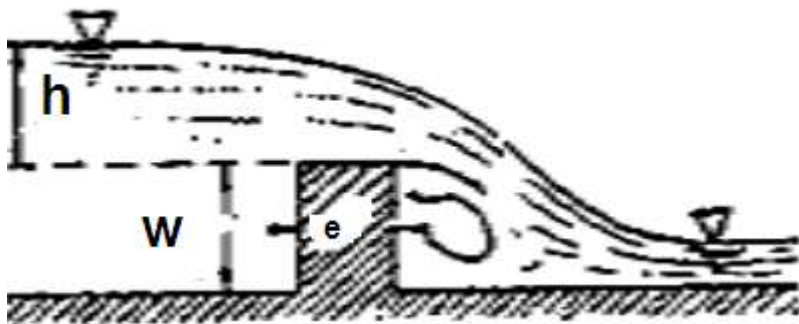
luego se calcula el caudal Q:

$$Q = \varepsilon_1 C_D \frac{2}{3} \sqrt{2g} b H^{3/2}$$

### 2.2.3. Vertederos con descarga libre

La descarga libre tiene lugar cuando el nivel del líquido en el canal de salida, o en el recipiente inferior, está por debajo de la arista o borde inferior del vertedero.

Figura 21. Vertedero con descarga libre

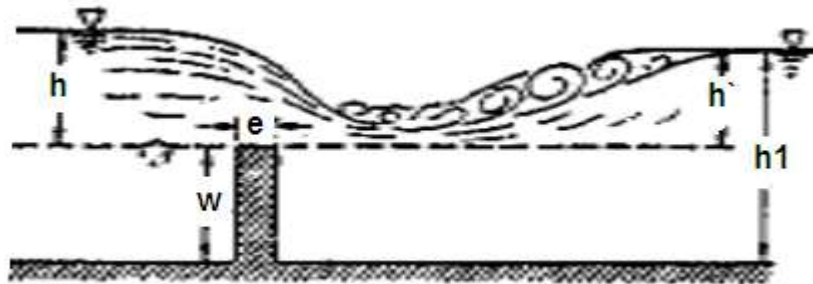


Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. Hidráulica General. p. 268.

### 2.2.4. Vertederos con descarga ahogada

El vertedero, es con descarga ahogada cuando el nivel del líquido en el canal de salida o recipiente inferior está por arriba de la arista o borde superior del orificio.

Figura 22. **Vertedero con descarga ahogada**



Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. Hidráulica General. p. 269.

### 2.3. **Clasificación en función del espesor de pared y el tirante sobre la cresta**

La distinción entre uno u otro, se centra en la influencia de las pérdidas friccionales y en el tipo de distribución de presiones sobre la pared del vertedero. La relación adimensional  $e/H$  se utiliza como criterio básico para distinguirlos. Así:

$0,67 < \frac{e}{H} \leq 3$ . Se trata de un funcionamiento de transición, entre la condición de vertedero de pared delgada y gruesa. No es apreciable todavía la pérdida friccional, y las líneas de flujo tienen aún curvatura apreciable. En consecuencia, la distribución de presiones es no hidrostática.

$3 < \frac{e}{H} \leq 10$ . Aparece el funcionamiento propio del vertedero de pared gruesa. Es necesario tener en cuenta las pérdidas friccionales; las líneas de flujo se aplanan y la distribución de presiones es hidrostática.





### 3. ENSAYO DE VERTEDEROS

#### 3.1. Diseño y construcción de vertederos para determinación de caudales

Como se mencionó anteriormente, un vertedero es un dique o pared que intercepta una corriente de un líquido con superficie libre, causando una elevación del nivel del fluido aguas arriba de la misma y que puede ser utilizado para medir el caudal circulante.

Para la realización de los ensayos, se utilizó el canal ancho que se encuentra en el laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, en el cual el flujo de agua es suministrado por un sistema de bombeo.

Figura 23. **Canal**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Y un equipo para estrangular el flujo del canal para poder obtener soleras o anchos menores de 76 centímetros.

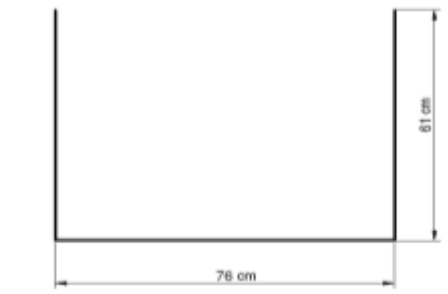
Figura 24. **Equipo para estrangular el flujo**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, USAC.

El canal cuenta con una sección, cuyas dimensiones internas se presentan en la figura 25.

Figura 25. **Dimensiones internas del canal**

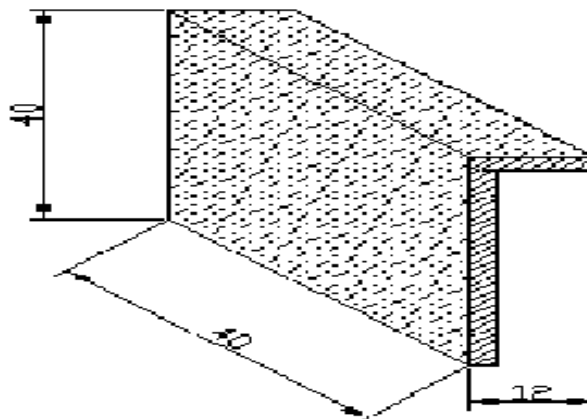


Fuente: elaboración propia.

### 3.1.1. Vertedero rectangular con descarga libre

Se diseñaron y fabricaron nueve vertederos rectangulares de pared gruesa, utilizando madera de pino de 1 pulgada de espesor. Las dimensiones fueron calculadas de acuerdo con la relación  $e/H$ , respetando los parámetros en los que debe estar  $0,67 \geq e/H < 10$ .

Figura 26. Dimensiones de vertedero rectangular de pared gruesa  $e=12$  cm y  $b = 40$  cm



Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Procedimiento para la realización de los ensayos. Tanque calibrado para la obtención del caudal real observado

- Fijar el vertedero rectangular de pared gruesa al canal, utilizando tuercas y silicón como sellador para evitar filtraciones en sus bordes.

Figura 27. **Vertedero instalado**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Encender la bomba y suministrar agua al canal hasta llegar al nivel de la cresta, a esta altura de carga se le denominará  **$H_o$** , a partir de la cual se empezarán a tomar lecturas, haciendo la observación que las válidas serán la que presenten zona aireada bajo la lámina vertiente. Ver figura 29.

Figura 28. **Vertedero en funcionamiento**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 29. **Zona aireada bajo el vertedero**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, USAC.

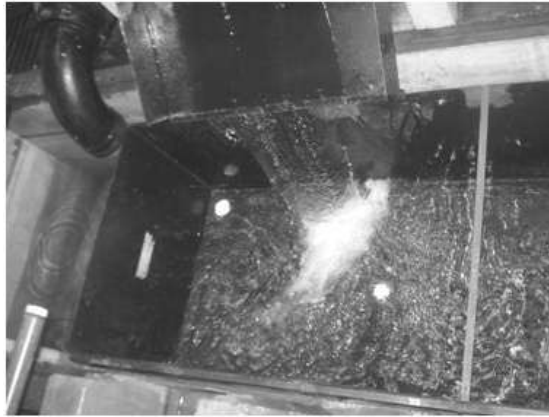
- Realizar toma de lecturas de carga  $H$  y para cada una de ellas se efectúan 3 aforos volumétricos, midiendo el volumen de un depósito y tomando lectura de los tiempos de llenado, utilizando un cronómetro. Esto se puede observar en las figuras 30 y 31.

Figura 30. **Toma de lecturas de carga  $H$**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 31. **Depósito utilizado para aforo volumétrico**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 32. **Toma de volumen en el depósito**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, USAC.

### **3.3. Calibración de los vertederos ensayados y determinación de las fórmulas experimentales**

Se ensayan los vertederos de pared gruesa para comparar los caudales reales, con los caudales teóricos obtenidos por las ecuaciones de los textos consultados.

#### **3.3.1. Calibración de los vertederos rectangulares de pared gruesa y cálculo de las ecuaciones experimentales**

Este ensayo se realizó utilizando el canal ancho, al cual se le pueden adaptar distintos tipos de vertederos, cuenta con un pozo tranquilizador, un tanque calibrado que es utilizado para el aforo volumétrico y se encuentra en el laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, abastecido de agua por medio de un sistema de bombeo.

##### **3.3.1.1. Ensayo para vertedero rectangular de pared gruesa de espesor de pared de 12 cm y ancho de solera de 40 cm**

Se tomaran los respectivos tiempos, para calcular los caudales reales y compararlos con los caudales teóricos.

Figura 33. **Vertedero instalado**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla III. **Datos obtenidos ensayo de vertedero rectangular de pared gruesa e=12cm y b=40cm**

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
1,9	247	429,2	243	432,6	250	426,9
3,3	108	404	109	405,1	111	407,4
4,1	94	513	96	514,1	101	517,5
5,1	71	518,7	71	517,5	71	521
6,7	45	516,4	45,18	514,1	46	518,7

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.1.1.1. **Obtención de resultados**

Con los datos obtenidos en el ensayo, se procede a calcular los tres caudales por el método volumétrico, para cada altura; y luego se obtiene el promedio que será el caudal real observado.

$$Q_{\text{observado}} = V/t$$



Donde:

$$Q_{\text{observado}} = l/s$$

$$V = \text{litros}$$

$$t = \text{segundos}$$

Tabla IV. **Caudales observados**

H (cm)	Qr1 (l/s)	Qr2 (l/s)	Qr3 (l/s)	Qr (l/s)
1,9	1,738	1,780	1,708	1,742
3,3	3,741	3,717	3,670	3,709
4,1	5,457	5,355	5,124	5,312
5,1	7,306	7,289	7,338	7,311
6,7	11,476	11,379	11,276	11,377

Fuente: elaboración propia.

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

$$Q = KH^n$$

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:

$$\log Q = \log K + n \log H$$

De donde se observa que tiene la forma de la ecuación general de una recta:

$$Y = mX + b$$

Donde:

$$Y = \text{Log } Q$$

$$m = n$$

$$X = \text{Log } H$$

$$b = \text{Log } K$$

El procedimiento a seguir para la obtención de resultados es:

- Aplicar logaritmos a los caudales reales y a las alturas H:

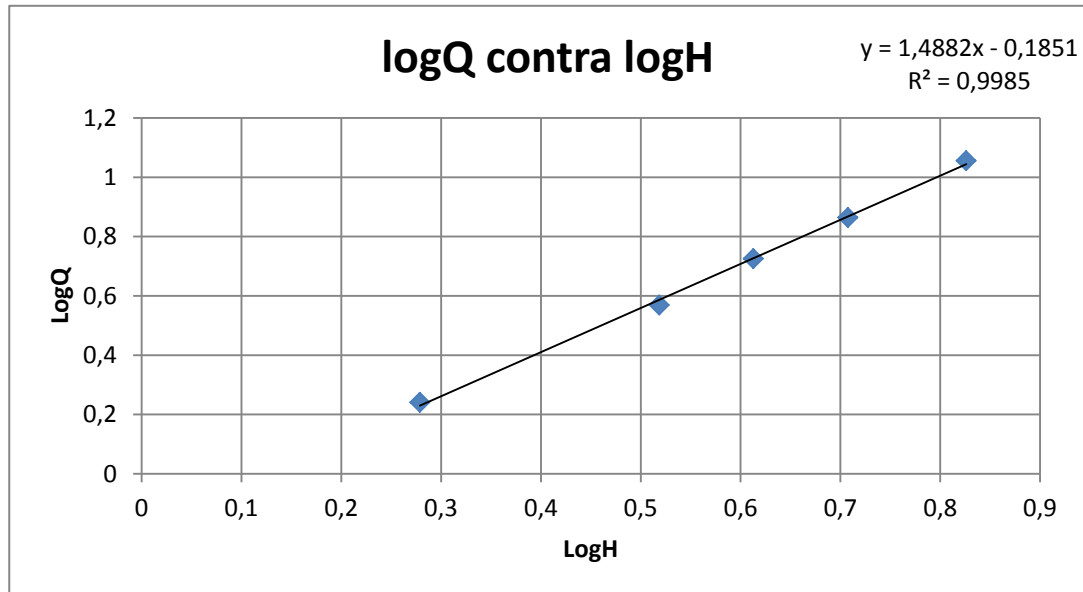
Tabla V. **Logaritmos de caudales observados y de cargas**

H (cm)	Qr (l/s)	LogH	LogQ
1,9	1,742	0,2788	0,2410
3,3	3,709	0,4624	0,5693
4,1	5,312	0,5911	0,7253
5,1	7,311	0,6902	0,8640
6,7	11,377	0,7709	1,560

Fuente: elaboración propia.

- Plotear las columnas LogH contra LogQ.
- Generar una línea de tendencia que mejor se ajuste a dicha dispersión y obtener su ecuación.

Figura 34. Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H



Fuente: elaboración propia.

- Del gráfico se obtiene la ecuación  $Y = 1,4882x - 0,1851$ , de donde se obtienen los valores de K y de n.

Siendo  $n = 1,4882$  y  $K = \text{Log}^{-1}(-0,1851) = 0,6529$

- Con los parámetros anteriores se obtiene la ecuación generada específica para el vertedero rectangular de pared gruesa  $e=12\text{cm}$  y  $b=40\text{cm}$ .

$$Q_{\text{generado}} = 0,6529H^{1,4882} \quad \Rightarrow \quad \text{Ec. calibración}$$

Donde:

$$Q_{\text{generado}} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

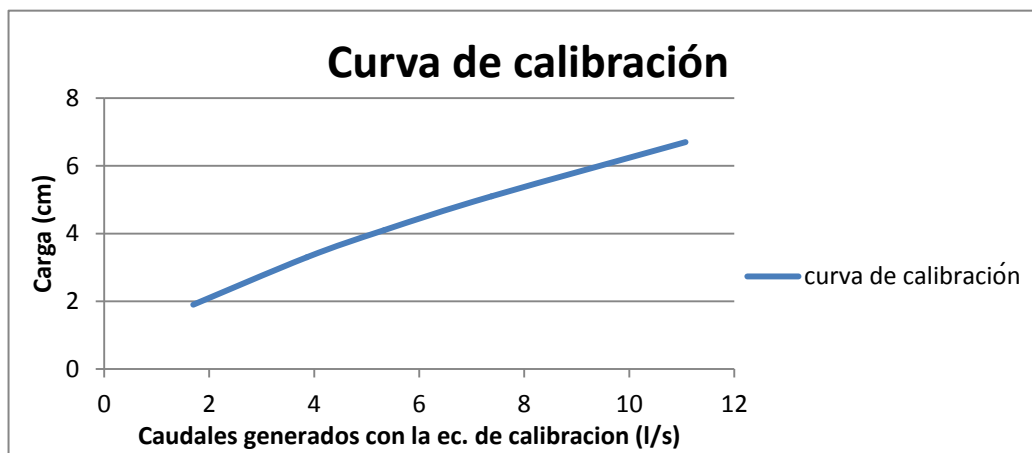
Con la ecuación de calibración ya definida se calculan los caudales generados y se comparan con los observados, a la vez que se estima el porcentaje de error entre ambos y se presenta la curva de calibración de este vertedero.

Tabla VI. **Caudales observados y generados con la ecuación de calibración**

H (cm)	Qobservado (l/s)	Qgenerado con ec. calibrada (l/s)	error (%)
1,9	1,7418	1,6970	2,5726
3,3	3,7092	3,8592	4,0451
4,1	5,3121	5,3308	0,3511
5,1	7,3108	7,3765	0,8892
6,7	11,3769	11,0716	2,6830

Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **Curva de calibración**



Fuente: elaboración propia.

### 3.3.1.1.2. Cálculo del caudal con la fórmula general o caudal teórico

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

$$Q \text{ teórico} = \varepsilon_1 C_D \frac{2}{3} \sqrt{2g} b H^{3/2}$$

Donde:

Q teórico= l/s

$\varepsilon_1$  = epsilon

$C_D$  = coeficiente de descarga

b= ancho de solera (cm)

H= carga (cm)

se halla  $\varepsilon_1$  :

$$\varepsilon_1 = 0,7 + \frac{0,185}{e/h}$$

Válida para relaciones con un valor hasta de  $e/h = 3$  y:

$$\varepsilon_1 = 0,75 + \frac{0,1}{e/h}$$

que es válida hasta valores  $e/h = 10$  y para vertederos con descarga libre.

Luego se halla el coeficiente de descarga  $C_D$  con la ecuación de *Rehbock*:

$$C_D = \left[ 0,6035 + 0,0813 \left( \frac{h+0,0011}{w} \right) \right] \left[ 1 + \frac{0,0011}{h} \right]^{3/2}$$

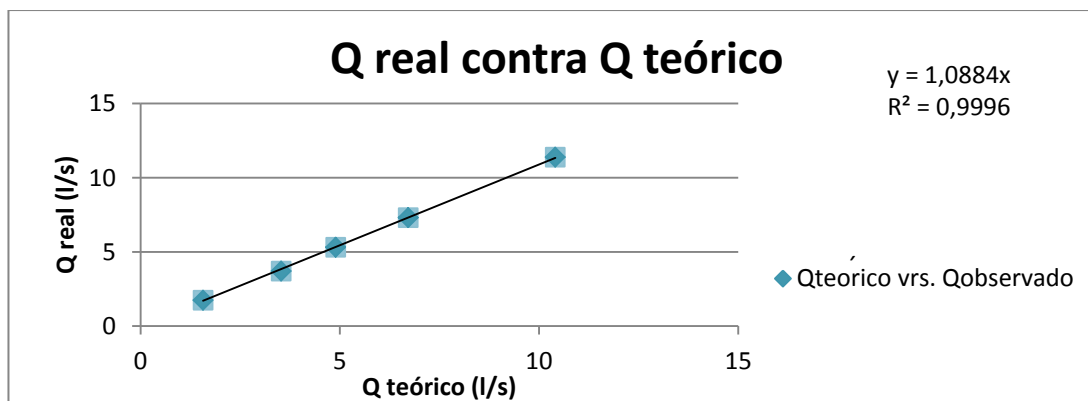
Tabla VII. Caudales observados y teóricos

H (cm)	Q observado (l/s)	Q teórico (l/s)
1,9	1,7418	1,5662
3,3	3,7092	3,5301
4,1	5,3121	4,8971
5,1	7,3108	6,7164
6,7	11,3769	10,4097

Fuente: elaboración propia.

Nota: para obtener el F.C., se plotean los valores de Q real sobre el eje vertical y los valores de Q teórico sobre el eje horizontal ambos en litros/segundo, se observa que los puntos ploteados definen una línea recta.

Figura 36. Determinación del coeficiente de descarga



Fuente. elaboración propia.

El factor de corrección será: F.C.= 1,0884

Quedando la ecuación corregida de la siguiente forma:

$$Q_{\text{real}} = \varepsilon_1 * (1,0884) * C_D * \frac{2}{3} \sqrt{2g} b H^{3/2}$$

Operando:

$$Q_{\text{real}} = \varepsilon_1 * 3,2140 * C_D * b H^{3/2}$$

Donde:

$$Q_{\text{teórico}} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

$$b = \text{cm}$$

Tabla VIII. **Comparación de caudales teórico y corregido**

H (cm)	Q observado (l/s)	Q teórico (l/s)	Q corregido (l/s)
1,9	1,7418	1,5662	1,7047
3,3	3,7092	3,5301	3,5301
4,1	5,3121	4,8971	4,8971
5,1	7,3108	6,7164	6,7164
6,7	11,3769	1,4097	10,4097

Fuente: elaboración propia.

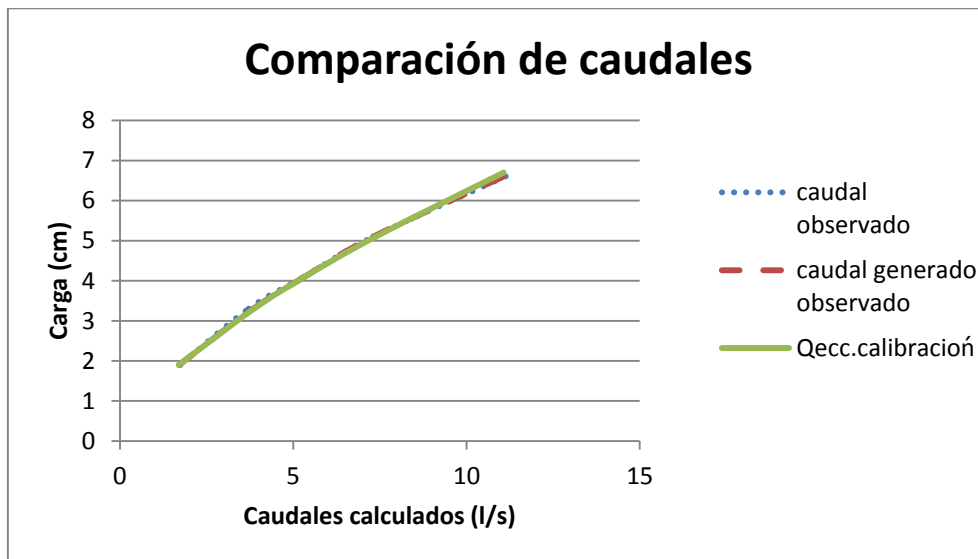
Concluyendo con la comparación de los resultados obtenidos.

Tabla IX. **Comparación de caudales**

H (cm)	Q observado (l/s)	Q generado con ec. Calibrada	Q corregido (l/s)
1,9	1,7418	1,6970	1,7047
3,3	3,7092	3,8592	3,5301
4,1	5,3121	5,3308	4,8971
5,1	7,3108	7,3765	6,7164
6,7	11,3769	11,0716	10,4097

Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Comparación de caudales**



Fuente: elaboración propia.



### 3.3.1.2. Ensayo para vertedero rectangular de pared gruesa de espesor de pared de 22 cm ancho de solera de 40 cm

El ensayo para este vertedero sigue el mismo procedimiento efectuado con el vertedero rectangular de pared gruesa, detallado en el inciso 3.2.

Figura 38. **Vertedero instalado**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla X. **Datos obtenidos ensayo de vertedero rectangular de  
pared gruesa  $e=22$  cm y  $b=40$  cm**

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
2,0	195	284,6	191	283,5	189	281,2
3,1	97	289,2	98,82	288,1	98,03	281,2
4,4	48,82	281,2	49,02	282,4	49,23	282,4
5,7	32,43	284,6	33,0	285,8	33,14	285,8
6,7	35,17	401,7	35,35	402,8	34,95	400,5
7,8	28,75	398,2	28,44	397,1	28,31	395,9
9,0	21,60	397,1	21,20	395,9	22,16	401,7

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.1.2.1. Obtención de resultados

El proceso para la determinación de caudales con el vertedero rectangular de pared gruesa con  $e = 22$  cm y  $b = 40$  cm, es similar al efectuado con anterioridad, descrito en el inciso 3.2.

Tabla XI. **Caudales observados**

<b>H (cm)</b>	<b>Qr1 (l/s)</b>	<b>Qr2 (l/s)</b>	<b>Qr3 (l/s)</b>	<b>&lt;Qr&gt; (l/s)</b>
2,0	1,46	1,48	1,49	1,477
3,1	2,96	2,93	2,94	2,946
4,4	5,76	5,76	5,74	5,761
5,7	8,78	8,66	8,62	8,664
6,7	11,42	11,39	11,47	11,392
7,8	13,85	13,98	13,98	13,973
9,0	18,38	18,67	18,13	18,478

Fuente: elaboración propia.

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

$$Q = KH^n$$

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

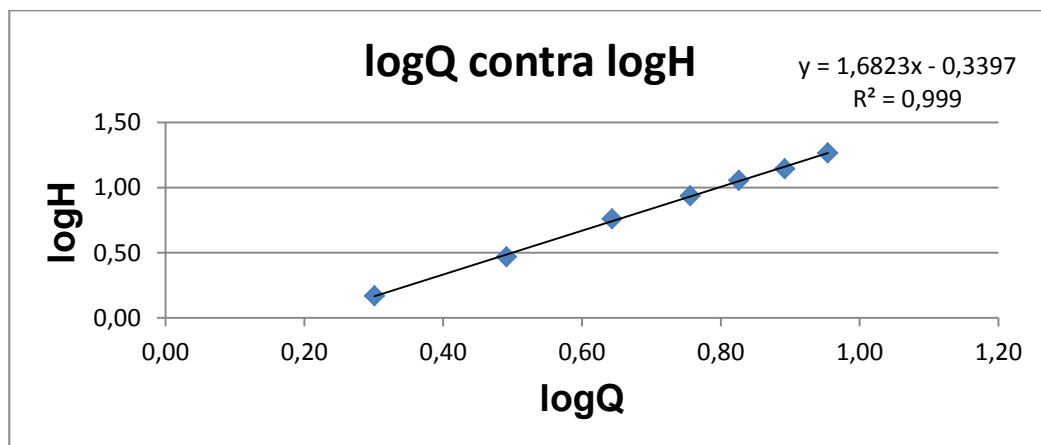
Tabla XII. **Logaritmo de caudales observados y de cargas**

H (cm)	Qr = V/t (l/s)	Log H	Log Q
2,0	1,477	0,3010	0,1694
3,1	2,946	0,4914	0,4692
4,4	5,761	0,6435	0,7605
5,7	8,664	0,7559	0,9377
6,7	11,392	0,8261	1,0566
7,8	13,973	0,8921	1,1453
9,0	18,478	0,9542	1,2667

Fuente: elaboración propia.

Al igual que para el vertedero anterior se genera la gráfica de logaritmos, en la cual se agrega una línea de tendencia que brinda la ecuación de la recta, obteniendo de ella el valor de  $n$  y de  $K$ .

Figura 39. **Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H**



Fuente: elaboración propia.

- Del gráfico se obtiene la ecuación  $Y = 1,6823x - 0,3397$ , de donde se obtienen los valores de K y de n.

$$\text{Siendo } n = 1,6823 \text{ y } K = \text{Log}^{-1}(-0,3397) = 0,4574$$

- Con los parámetros anteriores se obtiene la ecuación generada específica para el vertedero rectangular de pared gruesa  $e = 22 \text{ cm}$  y  $b = 40 \text{ cm}$ .

$$Q_{\text{generado}} = 0,4574H^{1,6823} \quad \Longrightarrow \quad \text{Ec. calibración}$$

Donde:

$$Q_{\text{generado}} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

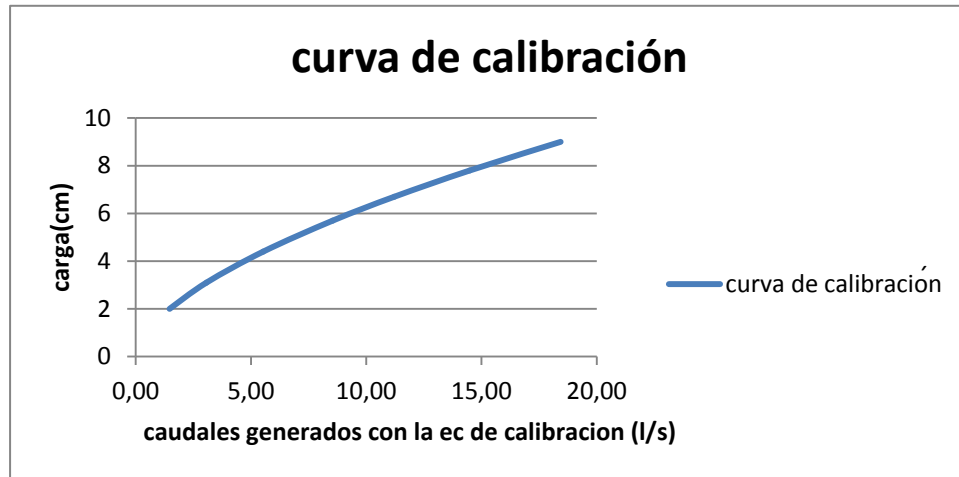
Con la ecuación de calibración ya definida se calculan los caudales generados y se comparan con los observados, a la vez que se estima el porcentaje de error entre ambos y se presenta la curva de calibración de este vertedero.

Tabla XIII. **Caudales observados y generados con la ecuación de calibración**

H (cm)	Q observado V/t	Q generado con ec. calibrada (l/s)	error (%)
2,0	1,477	1,4680	0,6247
3,1	2,946	3,0684	4,1646
4,4	5,761	5,5307	3,9949
5,7	8,664	8,5488	1,3305
6,7	11,392	11,2202	1,5066
7,8	13,973	14,4900	3,6987
9,0	18,478	18,4339	0,2402

Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Curva de calibración**



Fuente: elaboración propia.

### 3.3.1.2.2. **Cálculo del caudal con la fórmula general o caudal teórico**

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

$$Q \text{ teórico} = \varepsilon_1 C_D \frac{2}{3} \sqrt{2g} b H^{3/2}$$

Donde:

Q teórico= l/s

$\varepsilon_1$  = epsilon

$C_D$  = coeficiente de descarga

b= ancho de solera (cm)

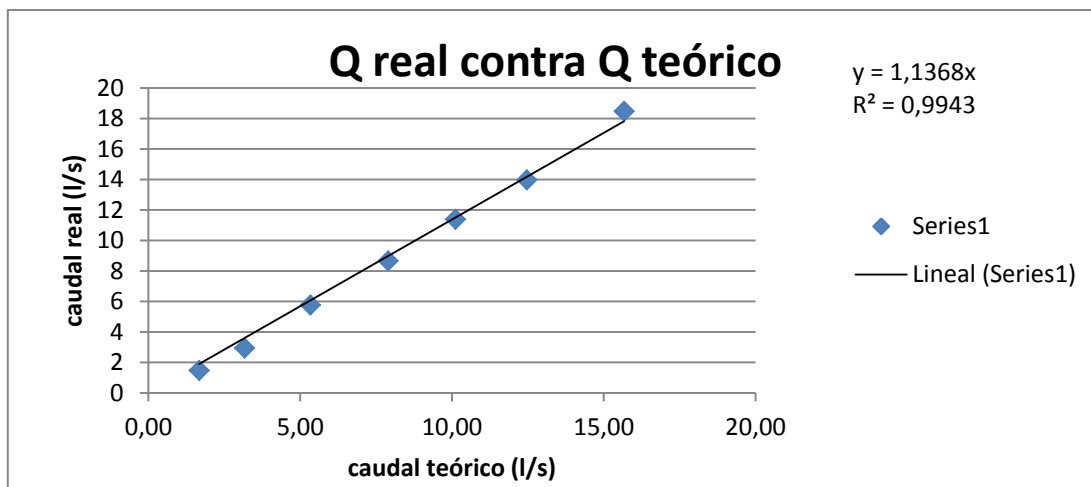
H= carga (cm)

Tabla XIV. Caudales observados y teóricos

H (cm)	Q observado (l/s)	Q teórico (l/s)
2,0	1,477	1,6703
3,1	2,946	3,1664
4,4	5,761	5,3370
5,7	8,664	7,8974
6,7	11,392	10,1137
7,8	13,973	12,4645
9,0	18,478	15,6704

Fuente: elaboración propia.

Figura 41. Determinación del coeficiente de descarga



Fuente: elaboración propia.

El factor de corrección será: F.C. = 1,1368

Quedando la ecuación corregida de la siguiente forma:

$$Q_{\text{real}} = \varepsilon_1 * (1,1368) * C_D * \frac{2}{3} \sqrt{2g} b H^{3/2}$$

Operando:

$$Q_{\text{real}} = \varepsilon_1 * 3,3569 * C_D * b H^{3/2}$$

Donde:

$$Q_{\text{teórico}} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

$$b = \text{cm}$$

Tabla XV. **Comparación de caudales teórico y corregido**

H (cm)	Q observado (l/s)	Q teórico (l/s)	Q corregido (l/s)
2,0	1,477	1,6703	1,8988
3,1	2,946	3,1664	3,5996
4,4	5,761	5,3370	6,0671
5,7	8,664	7,8974	8,9778
6,7	11,392	10,1137	11,4973
7,8	13,973	12,4645	14,1697
9,0	18,478	15,6704	17,8141

Fuente: elaboración propia.

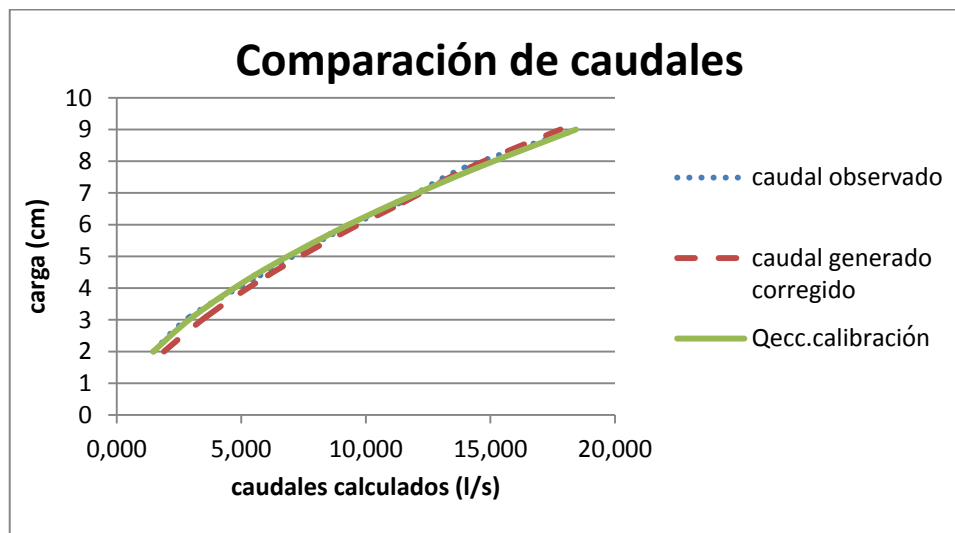
Concluyendo con la comparación de los resultados obtenidos.

Tabla XVI. **Comparación de caudales**

H (cm)	Q observado (l/s)	Q generado con ec. Calibrada (l/s)	Q corregido (l/s)
2,0	1,477	1,4680	1,8988
3,1	2,946	3,0684	3,5996
4,4	5,761	5,5307	6,0671
5,7	8,664	8,5488	8,9778
6,7	11,392	11,2202	11,4973
7,8	13,973	14,4900	14,1697
9,0	18,478	18,4339	17,8141

Fuente: elaboración propia.

Figura 42. **Comparación de caudales**



Fuente: elaboración propia.



### 3.3.1.3. Ensayo para vertedero rectangular de pared gruesa de espesor de pared de 25 cm y ancho de solera de 40 cm

El ensayo para este vertedero sigue el mismo procedimiento efectuado con el vertedero rectangular de pared gruesa, detallado en el inciso 3.2.

Figura 43. **Vertedero instalado**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla XVII. **Datos obtenidos ensayo de vertedero rectangular de pared gruesa  $e= 25$  cm y  $b= 40$  cm**

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
3,3	86	289,2	79	280,1	81	283,5
4,3	50	280,1	51,0	283,5	50,78	281,2
5,5	48,0	395,9	49,78	400,5	50,31	404,0
6,7	35,0	406,3	35,0	407,4	35,31	407,4
7,9	27,0	405,1	27,0	404,0	26,66	402,8
9,3	17,81	402,8	17,56	402,8	17,68	404,0

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.1.3.1. Obtención de resultados

El proceso para la determinación de caudales con el vertedero rectangular de pared gruesa con  $e = 25$  cm y  $b = 40$  cm, es similar al efectuado con anterioridad, descrito en el inciso 3.2.

Tabla XVIII. **Caudales observados**

<b>H (cm)</b>	<b>Qr1 (l/s)</b>	<b>Qr2 (l/s)</b>	<b>Qr3 (l/s)</b>	<b>&lt;Qr&gt; (l/s)</b>
3,3	3,3628	3,5456	3,5000	3,4695
4,3	5,6020	5,5588	5,5376	5,5661
5,5	8,2479	8,0454	8,0302	8,1078
6,7	11,6086	11,6068	11,5378	11,5844
7,9	15,0037	14,9630	15,1088	15,0251
9,3	22,6165	22,9385	22,8507	22,8019

Fuente: elaboración propia.

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

$$Q = KH^n$$

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

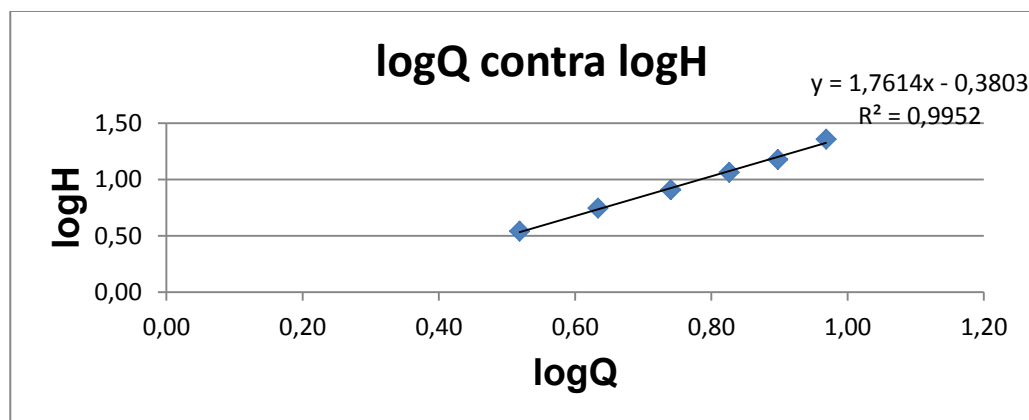
Tabla XIX. **Logaritmo de caudales observados y de cargas**

H (cm)	Qr = V/t (l/s)	Log H	Log Q
3,3	3,4695	0,5185	0,5403
4,3	5,5661	0,6335	0,7456
5,5	8,1078	0,7404	0,9089
6,7	11,5844	0,8261	1,0639
7,9	15,0251	0,8976	1,1768
9,3	22,8019	0,9685	1,3580

Fuente: elaboración propia.

Al igual que para el vertedero anterior se genera la gráfica de logaritmos, en la cual se agrega una línea de tendencia que brinda la ecuación de la recta, obteniendo de ella el valor de n y de K.

Figura 44. **Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H**



Fuente: elaboración propia.

- Del gráfico se obtiene la ecuación  $Y = 1,7614x - 0,3803$ , de donde se obtienen los valores de K y de n.

$$\text{Siendo } n = 1,7614 \text{ y } K = \text{Log}^{-1}(-0,3803) = 0,4165$$

- Con los parámetros anteriores se obtiene la ecuación generada específica para el vertedero rectangular de pared gruesa  $e = 25 \text{ cm}$  y  $b = 40 \text{ cm}$ .

$$Q_{\text{generado}} = 0,4165H^{1,7614} \quad \Longrightarrow \quad \text{Ec. calibración}$$

Donde:

$$Q_{\text{generado}} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

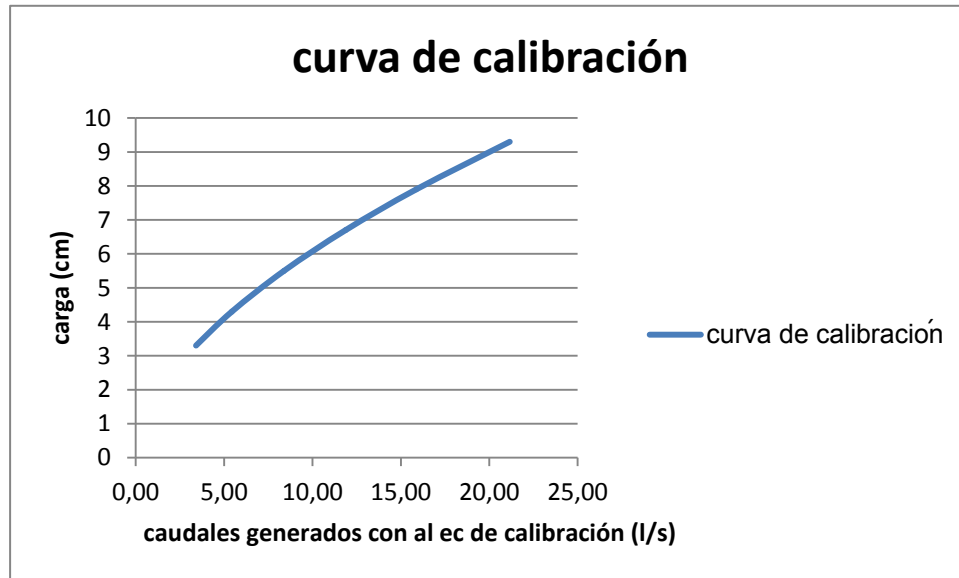
Con la ecuación de calibración ya definida se calculan los caudales generados y se comparan con los observados, a la vez que se estima el porcentaje de error entre ambos y se presenta la curva de calibración de este vertedero.

Tabla XX. **Caudales observados y generados con la ecuación de calibración**

H (cm)	Q observado (l/s)	Q generado con ec. calibrada (l/s)	error (%)
3,3	3,4695	3,4113	1,6749
4,3	5,5661	5,4376	2,3096
5,5	8,1078	8,3886	3,4629
6,7	11,5844	11,8758	2,5155
7,9	15,0251	15,8743	5,6517
9,3	22,8019	21,1593	7,2039

Fuente: elaboración propia.

Figura 45. Curva de calibración



Fuente: elaboración propia.

### 3.3.1.3.2. Cálculo del caudal con la fórmula general o caudal teórico

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

$$Q \text{ teórico} = \varepsilon_1 C_D \frac{2}{3} \sqrt{2g} b H^{3/2}$$

Donde:

Q teórico= l/s

$\varepsilon_1$  = epsilon

$C_D$  = coeficiente de descarga

b= ancho de solera (cm)

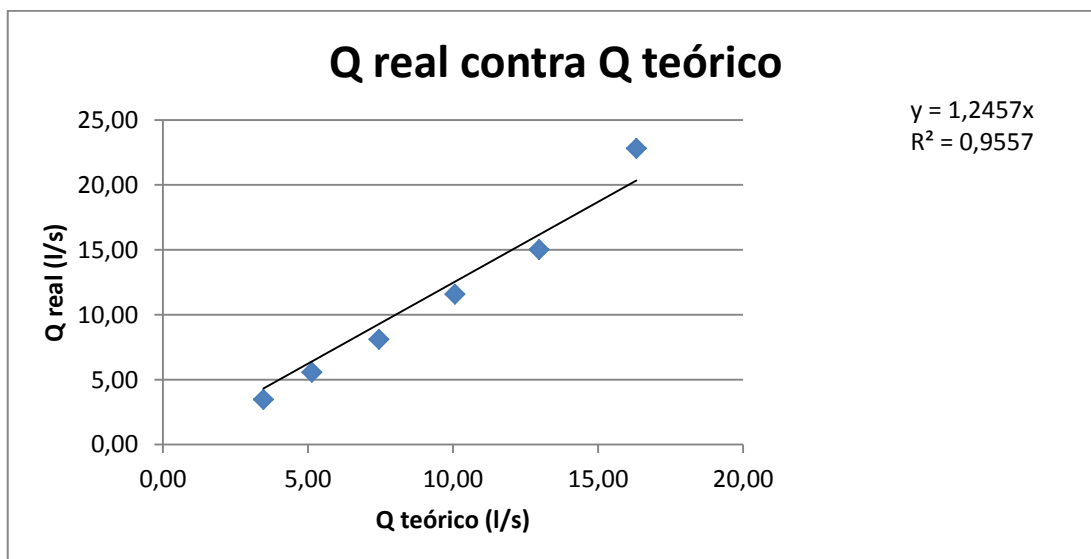
H= carga (cm)

Tabla XXI. Caudales observados y teóricos

H (cm)	Q observado (l/s)	Q teórico (l/s)
3,3	3,4695	3,4652
4,3	5,5661	5,1400
5,5	8,1078	7,4505
6,7	11,5844	10,0664
7,9	15,0251	12,9715
9,3	22,8019	16,3213

Fuente: elaboración propia.

Figura 46. Determinación del coeficiente de descarga



Fuente: elaboración propia.

El factor de corrección será: F.C. = 1,2457

Quedando la ecuación corregida de la siguiente forma:

$$Q_{\text{real}} = \varepsilon_1 * (1,2457) * C_D * \frac{2}{3} \sqrt{2g} b H^{3/2}$$

Operando:

$$Q_{\text{real}} = \varepsilon_1 * 3,6785 * C_D * b H^{3/2}$$

Donde:

$$Q_{\text{teórico}} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

$$b = \text{cm}$$

Tabla XXII. **Comparación de caudales teórico y corregido**

H (cm)	Q observado (l/s)	Q teórico (l/s)	Q corregido (l/s)
3,3	3,4695	3,4652	4,3166
4,3	5,5661	5,1400	6,4029
5,5	8,1078	7,4505	9,2811
6,7	11,5844	10,0664	12,5397
7,9	15,0251	12,9715	16,1586
9,3	22,8019	16,3213	20,3314

Fuente: elaboración propia.

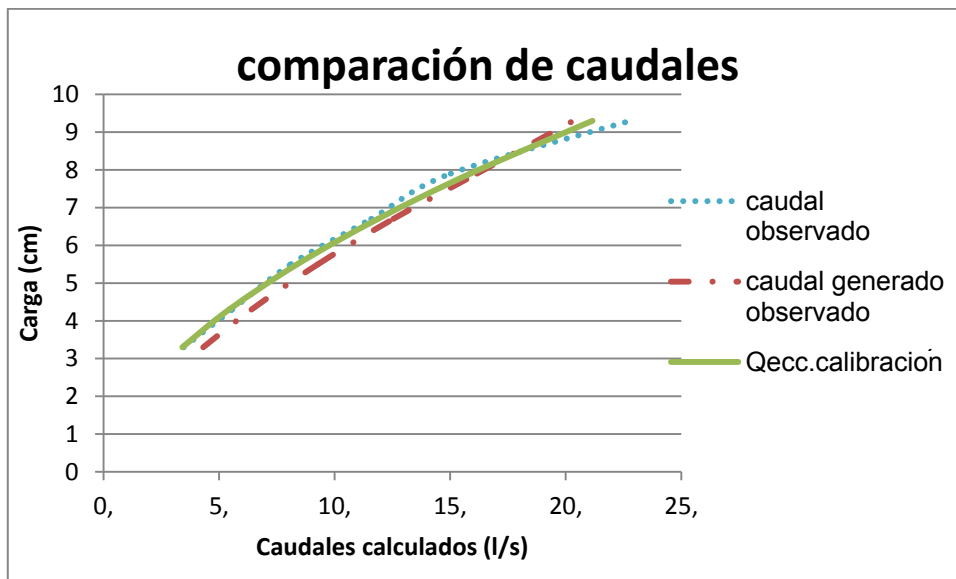
Concluyendo con la comparación de los resultados obtenidos.

Tabla XXIII. **Comparación de caudales**

H (cm)	Q observado (l/s)	Q generado con ec. Calibrada	Q corregido (l/s)
3,3	3,4695	3,4113	4,3166
4,3	5,5661	5,4376	6,4029
5,5	8,1078	8,3886	9,2811
6,7	11,5844	11,8758	12,5397
7,9	15,0251	15,8743	16,1586
9,3	22,8019	21,1593	20,3314

Fuente: elaboración propia.

Figura 47. **Comparación de caudales**



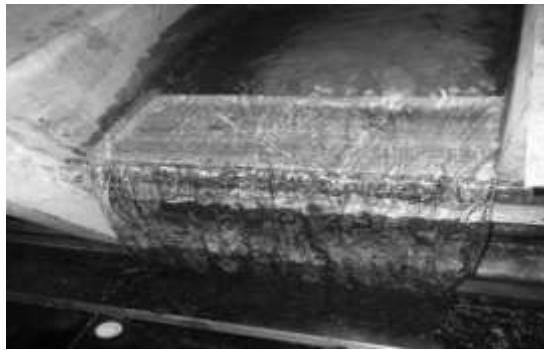
Fuente: elaboración propia.



**3.3.1.4. Ensayo para vertedero rectangular de pared gruesa de espesor de pared de 12 cm y ancho de solera de 52 cm**

El ensayo para este vertedero sigue el mismo procedimiento efectuado con el vertedero rectangular de pared gruesa, detallado en el inciso 3.2.

Figura 48. **Vertedero instalado**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla XXIV. **Datos obtenidos ensayo de vertedero rectangular de pared gruesa  $e = 12$  cm y  $b = 52$  cm**

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
1,7	168,16	284,6	170,16	285,8	169,66	284,6
2,7	86,81	286,9	87,22	286,9	85,82	285,8
3,8	50,44	285,8	50,31	284,6	51,06	288,1
5,0	29,81	292,7	29,47	291,5	29,79	292,7
6,1	31,69	405,1	31,47	404,0	32,31	408,6
7,1	22,47	415,4	22,56	416,6	22,44	415,4
7,6	18,72	417,7	18,41	415,4	18,64	416,6

Fuente: elaboración propia.

#### 3.3.1.4.1. Obtención de resultados

El proceso para la determinación de caudales con el vertedero rectangular de pared gruesa con  $e = 12 \text{ cm}$  y  $b = 52 \text{ cm}$ , es similar al efectuado con anterioridad, descrito en el inciso 3.2.

Tabla XXV. **Caudales observados**

<b>H (cm)</b>	<b>Qr1 (l/s)</b>	<b>Qr2 (l/s)</b>	<b>Qr3 (l/s)</b>	<b>&lt;Qr&gt; (l/s)</b>
1,7	1,69	1,68	1,67	1,68
2,7	3,30	3,29	3,33	3,31
3,8	5,67	5,66	5,64	5,66
5,0	9,81	9,89	9,83	9,85
6,1	12,78	12,84	12,65	12,76
7,1	18,49	18,46	18,51	18,49
7,6	22,31	22,56	22,34	22,40

Fuente: elaboración propia.

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

$$Q = KH^n$$

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

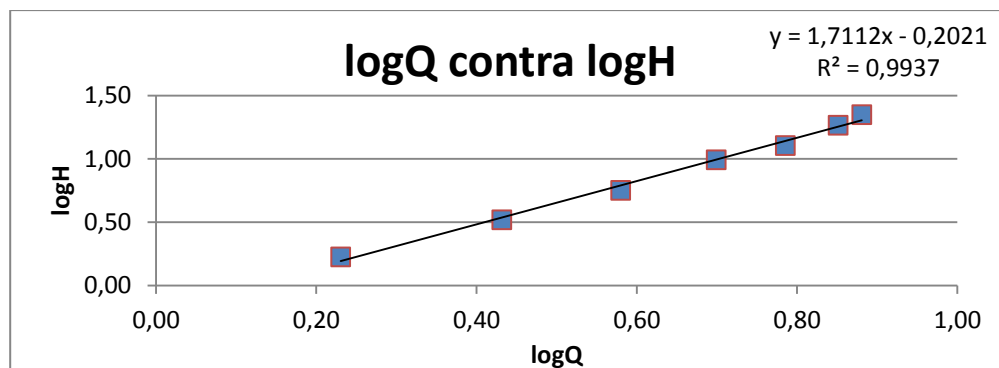
Tabla XXVI. **Logaritmo de caudales observados y de cargas**

H (cm)	Qr = V/t (l/s)	Log H	Log Q
1,7	1,68	0,2304	0,2261
2,7	3,31	0,4314	0,5196
3,8	5,66	0,5798	0,7524
5,0	9,85	0,6990	0,9932
6,1	12,76	0,7853	1,1057
7,1	18,49	0,8513	1,2668
7,6	22,40	0,8808	1,3503

Fuente: elaboración propia.

Al igual que para el vertedero anterior se genera la gráfica de logaritmos, en la cual se agrega una línea de tendencia que brinda la ecuación de la recta, obteniendo de ella el valor de n y de K.

Figura 49. **Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H**



Fuente: elaboración propia.

Del gráfico se obtiene la ecuación  $Y = 1,7112x - 0,2021$ , de donde se obtienen los valores de K y de n.

$$\text{Siendo } n = 1,7112 \text{ y } K = \text{Log}^{-1}(-0,2021) = 0,6279$$

Con los parámetros anteriores se obtiene la ecuación generada específica para el vertedero rectangular de pared gruesa  $e = 12 \text{ cm}$  y  $b = 52 \text{ cm}$ .

$$Q_{\text{generado}} = 0,6279H^{1,7112} \quad \Longrightarrow \quad \text{Ec. calibración}$$

Donde:

$$Q_{\text{generado}} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

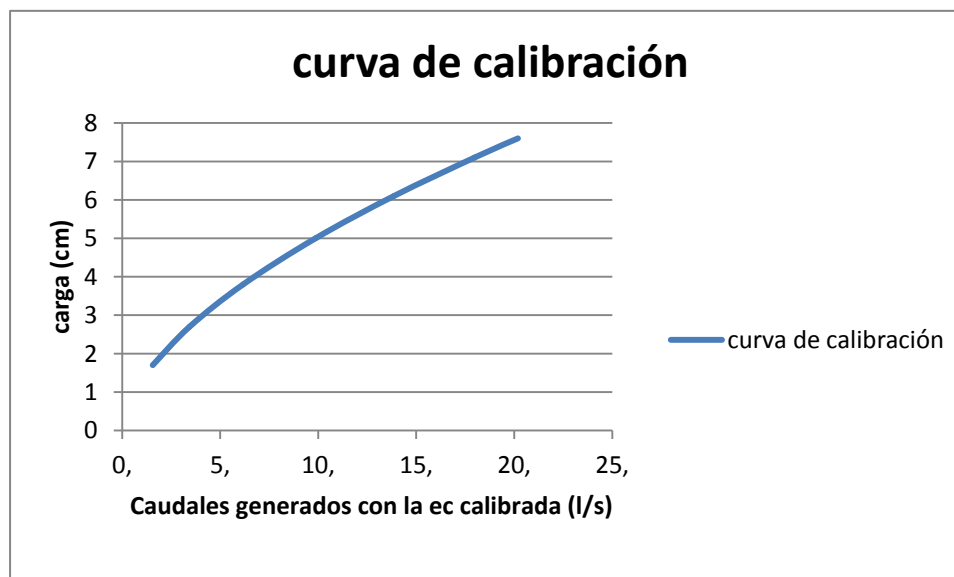
Con la ecuación de calibración ya definida se calculan los caudales generados y se comparan con los observados, a la vez que se estima el porcentaje de error entre ambos y se presenta la curva de calibración de este vertedero.

Tabla XXVII. **Caudales observados y generados con la ecuación de calibración**

H (cm)	Q observado (l/s)	Q generado con ec. calibrada (l/s)	error (%)
1,7	1,68	1,5568	7,5074
2,7	3,31	3,4359	3,8608
3,8	5,66	6,1662	9,0366
5,0	9,85	9,8621	0,1709
6,1	12,76	13,8595	8,6533
7,1	18,49	17,9706	2,7852
7,6	22,40	20,1901	9,8852

Fuente: elaboración propia.

Figura 50. **Curva de calibración**



Fuente: elaboración propia.

### 3.3.1.4.2. Cálculo del caudal con la fórmula general o teórico

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

$$Q \text{ teórico} = \varepsilon_1 C_D \frac{2}{3} \sqrt{2g} b H^{3/2}$$

Donde:

Q teórico= l/s

$\varepsilon_1$  = epsilon

$C_D$  = coeficiente de descarga

b= ancho de solera (cm)

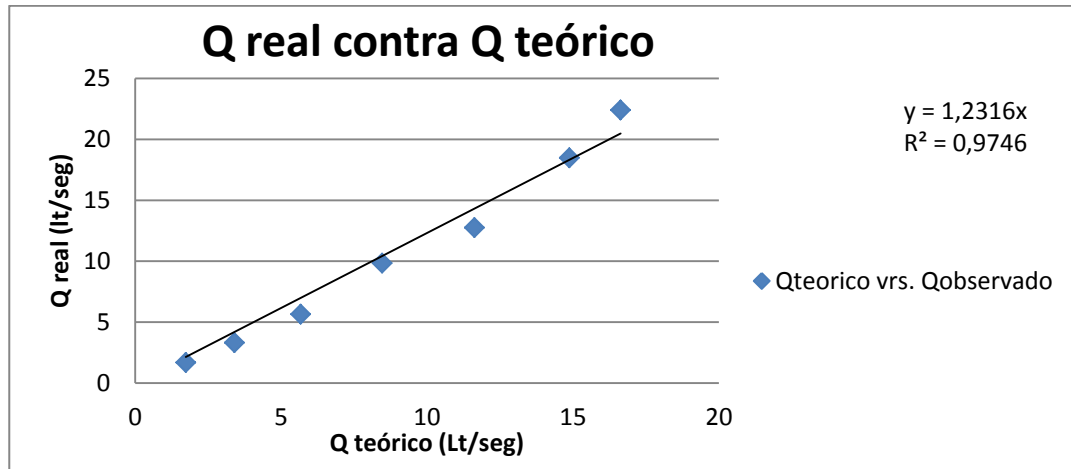
H= carga (cm)

Tabla XXVIII. Caudales observados y teóricos

H (cm)	Q observado (l/s)	Q teórico (l/s)
1,7	1,68	1,735
2,7	3,31	3,404
3,8	5,66	5,674
5,0	9,85	8,462
6,1	12,76	11,625
7,1	18,49	14,875
7,6	22,40	16,633

Fuente: elaboración propia.

Figura 51. **Determinación del coeficiente de descarga**



Fuente: elaboración propia.

El factor de corrección será: F.C. = 1,0517

Quedando la ecuación corregida de la siguiente forma:

$$Q_{\text{real}} = \varepsilon_1 * (1,2316) * C_D * \frac{2}{3} \sqrt{2g} b H^{3/2}$$

Operando:

$$Q_{\text{real}} = \varepsilon_1 * 3,6368 * C_D * b H^{3/2}$$

Donde:

$$Q_{\text{teórico}} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

$$b = \text{cm}$$

Tabla XXIX. **Comparación de caudales teórico y corregido**

H (cm)	Q observado (l/s)	Q teórico (l/s)	Q corregido (l/s)
1,7	1,68	1,735	2,1368
2,7	3,31	3,404	4,1923
3,8	5,66	5,674	6,9884
5,0	9,85	8,462	10,4212
6,1	12,76	11,625	14,3179
7,1	18,49	14,875	18,3200
7,6	22,40	16,633	20,4849

Fuente: elaboración propia.

Concluyendo con la comparación de los resultados obtenidos.

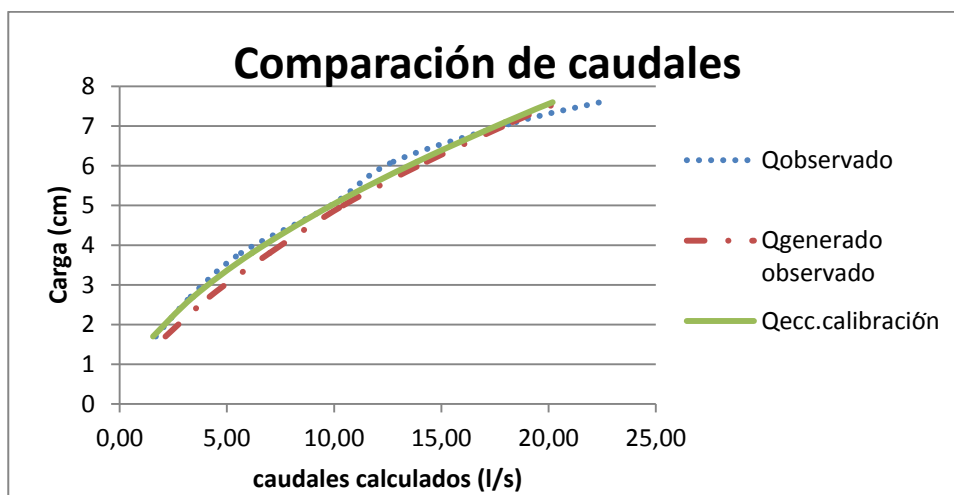
Tabla XXX. **Comparación de caudales**

H (cm)	Q observado (l/s)	Q generado con ec. Calibrada	Q corregido (l/s)
1,7	1,68	1,5568	2,1368
2,7	3,31	3,4359	4,1923
3,8	5,66	6,1662	6,9884
5,0	9,85	9,8621	10,4212
6,1	12,76	13,8595	14,3179
7,1	18,49	17,9706	18,3200
7,6	22,40	20,1901	20,4849

Fuente: elaboración propia.



Figura 52. Comparación de caudales

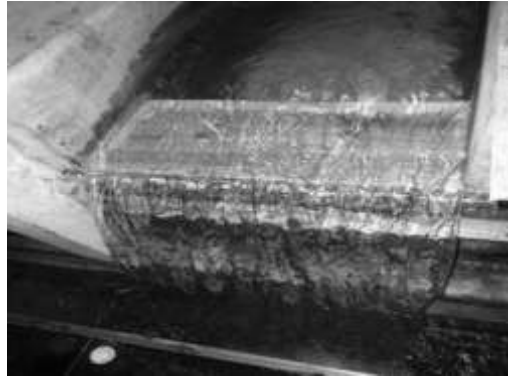


Fuente: elaboración propia.

#### 3.3.1.5. Ensayo para vertedero rectangular de pared gruesa de espesor de pared de 18 cm y ancho de solera de 52 cm

El ensayo para este vertedero sigue el mismo procedimiento efectuado con el vertedero rectangular de pared gruesa, detallado en el inciso 3.2.

Figura 53. **Vertedero instalado**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla XXXI. **Datos obtenidos ensayo de vertedero rectangular de pared gruesa  $e= 18\text{ cm}$  y  $b= 52\text{ cm}$**

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
2,5	98,56	284,6	98,13	283,5	97,31	283,5
3,8	52,38	283,5	53,79	285,8	53,91	285,8
5,1	31,09	284,6	31,53	285,8	32,33	288,1
6,3	22,35	295,0	21,96	293,8	22,31	295,0
7,2	16,29	283,5	16,68	285,8	16,72	286,9
7,5	16,32	295,0	16,40	295,0	16,38	296,1
7,9	19,84	405,1	19,59	404,0	19,87	406,3

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.1.5.1. **Obtención de resultados**

El proceso para la determinación de caudales con el vertedero rectangular de pared gruesa con  $e= 18\text{ cm}$  y  $b= 52\text{ cm}$ , es similar al efectuado con anterioridad, descrito en el inciso 3.2.

Tabla XXXII. **Caudales observados**

<b>H (cm)</b>	<b>Qr1 (l/s)</b>	<b>Qr2 (l/s)</b>	<b>Qr3 (l/s)</b>	<b>&lt;Qr&gt; (l/s)</b>
2,5	2,8876	2,8890	2,9134	2,8967
3,8	5,4124	5,3133	5,3014	5,3424
5,1	9,1541	9,0644	8,8975	9,0386
6,3	13,1991	13,3789	13,2228	13,2669
7,2	17,5108	17,1343	17,1591	17,2681
7,5	18,0760	17,9878	18,0760	18,0469
7,9	20,4183	20,6228	20,4479	20,4963

Fuente: elaboración propia.

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

$$Q = KH^n$$

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

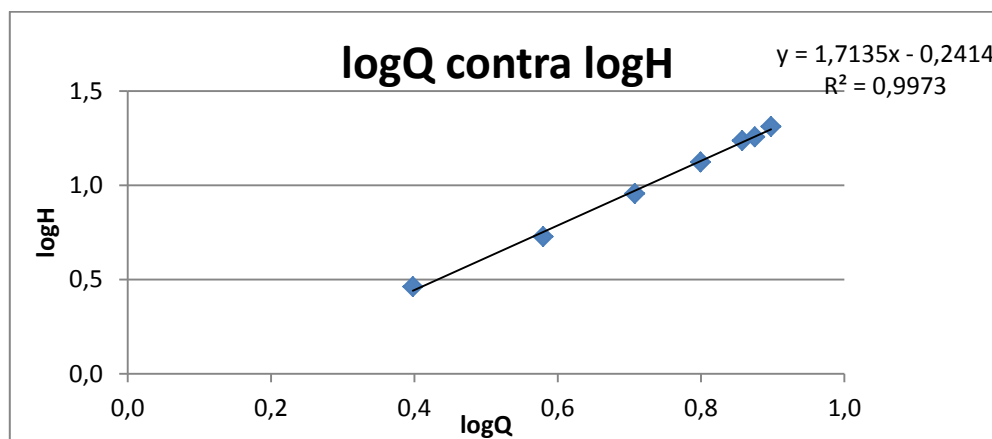
Tabla XXXIII. **Logaritmo de caudales observados y de cargas**

H (cm)	Qr = V/t (l/s)	Log H	Log Q
2,5	2,8967	0,3979	0,4619
3,8	5,3424	0,5798	0,7277
5,1	9,0386	0,7076	0,9561
6,3	13,2669	0,7993	1,1228
7,2	17,2681	0,8573	1,2372
7,5	18,0469	0,8751	1,2564
7,9	20,4963	0,8976	1,3117

Fuente: elaboración propia.

Al igual que para el vertedero anterior se genera la gráfica de logaritmos, en la cual se agrega una línea de tendencia que brinda la ecuación de la recta, obteniendo de ella el valor de n y de K.

Figura 54. **Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H**



Fuente: elaboración propia.

Del gráfico se obtiene la ecuación  $Y = 1,7135x - 0,2414$ , de donde se obtienen los valores de K y de n.

$$\text{Siendo } n = 1,7135 \text{ y } K = \text{Log}^{-1}(-0,2414) = 0,5735$$

Con los parámetros anteriores se obtiene la ecuación generada específica para el vertedero rectangular de pared gruesa  $e = 18 \text{ cm}$  y  $b = 52 \text{ cm}$ .

$$Q_{\text{generado}} = 0,5735H^{1,7135} \quad \Longrightarrow \quad \text{Ec. calibración}$$

Donde:

$$Q_{\text{generado}} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

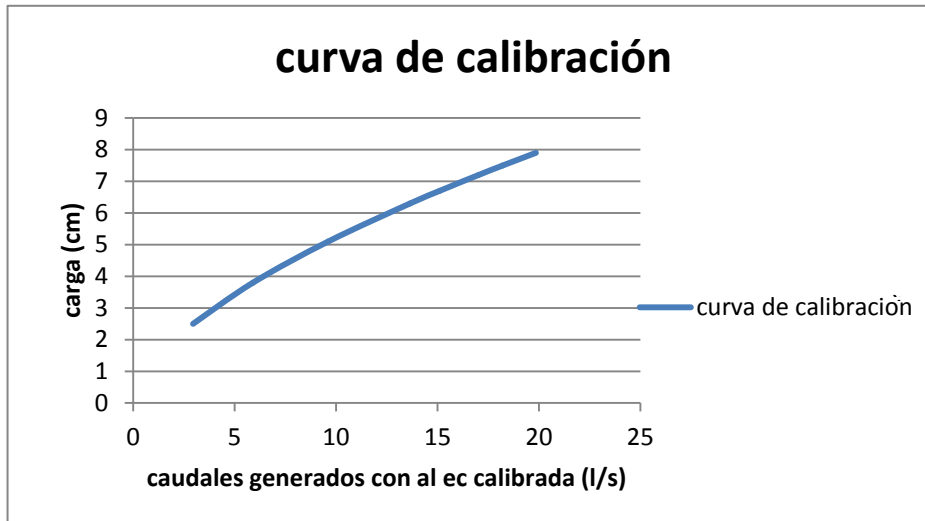
Con la ecuación de calibración ya definida se calculan los caudales generados y se comparan con los observados, a la vez que se estima el porcentaje de error entre ambos y se presenta la curva de calibración de este vertedero.

**Tabla XXXIV. Caudales observados y generados con la ecuación de calibración**

H (cm)	Q observado (l/s)	Q generado con ec. calibrada (l/s)	error (%)
2,5	2,8967	2,7568	4,8286
3,8	5,3424	5,6493	5,7451
5,1	9,0386	9,3531	3,4789
6,3	13,2669	13,4339	1,2590
7,2	17,2681	16,8878	2,2022
7,5	18,0469	18,1114	0,3571
7,9	20,4963	19,7978	3,4080

Fuente: elaboración propia.

Figura 55. **Curva de calibración**



Fuente: elaboración propia.

### 3.3.1.5.2. **Cálculo del caudal con la fórmula general o caudal teórico**

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

$$Q \text{ teórico} = \varepsilon_1 C_D \frac{2}{3} \sqrt{2g} b H^{3/2}$$

Donde:

$Q \text{ teórico}$  = l/s

$\varepsilon_1$  = epsilon

$C_D$  = coeficiente de descarga

$b$  = ancho de solera (cm)

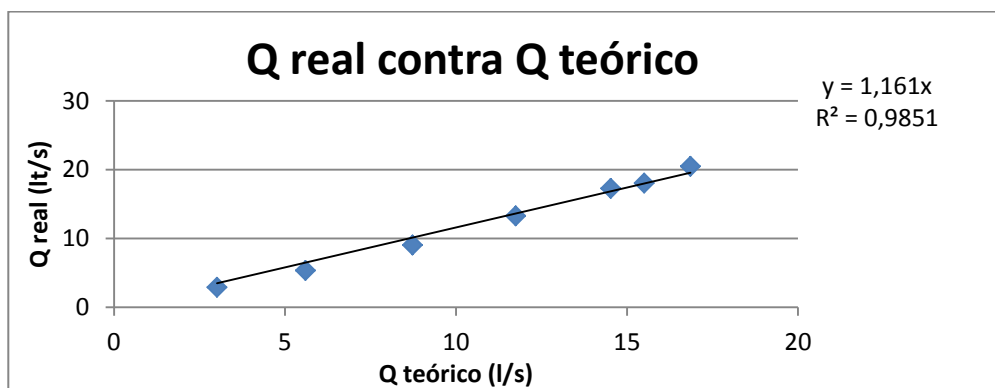
$H$  = carga (cm)

Tabla XXXV. Caudales observados y teóricos

H (cm)	Q observado (l/s)	Q teórico (l/s)
2,5	2,8967	3,0111
3,8	5,3424	5,5976
5,1	9,0386	8,7280
6,3	13,2669	11,7495
7,2	17,2681	14,5251
7,5	18,0469	15,5051
7,9	20,4963	16,8542

Fuente: elaboración propia.

Figura 56. Determinación del coeficiente de descarga



Fuente: elaboración propia.

El factor de corrección será: F.C. = 1,161

Quedando la ecuación corregida de la siguiente forma:

$$Q_{\text{real}} = \varepsilon_1 * (1,161) * C_D * \frac{2}{3} \sqrt{2g} b H^{3/2}$$

Operando:

$$Q_{\text{real}} = \varepsilon_1 * 3,4283 * C_D * b H^{3/2}$$

Donde:

$$Q_{\text{teórico}} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

$$b = \text{cm}$$

Tabla XXXVI. **Comparación de caudales teórico y corregido**

H (cm)	Q observado (l/s)	Q teórico (l/s)	Q corregido (l/s)
2,5	2,8967	3,0111	3,4959
3,8	5,3424	5,5976	6,4988
5,1	9,0386	8,7280	10,1332
6,3	13,2669	11,7495	13,6412
7,2	17,2681	14,5251	16,8636
7,5	18,0469	15,5051	18,0014
7,9	20,4963	16,8542	19,5677

Fuente: elaboración propia.

Concluyendo con la comparación de los resultados obtenidos.

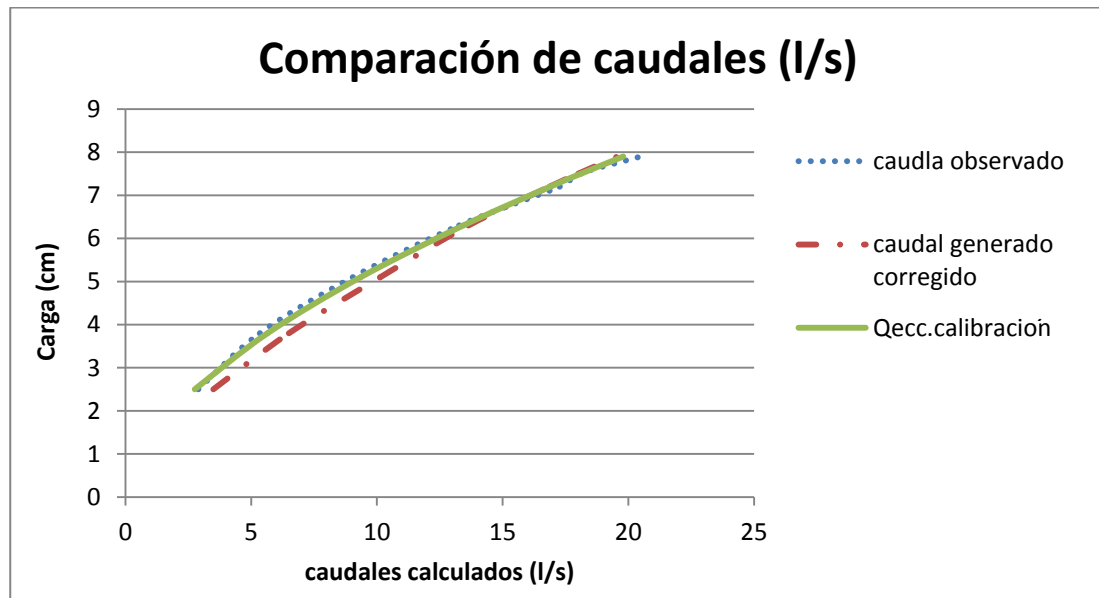


Tabla XXXVII. **Comparación de caudales**

H (cm)	Q observado(l/s)	Q generado con ec. Calibrada	Q corregido (l/s)
2,5	2,8967	2,7568	3,4959
3,8	5,3424	5,6493	6,4988
5,1	9,0386	9,3531	10,1332
6,3	13,2669	13,4339	13,6412
7,2	17,2681	16,8878	16,8636
7,5	18,0469	18,1114	18,0014
7,9	20,4963	19,7978	19,5677

Fuente: elaboración propia.

Figura 57. **Comparación de caudales**

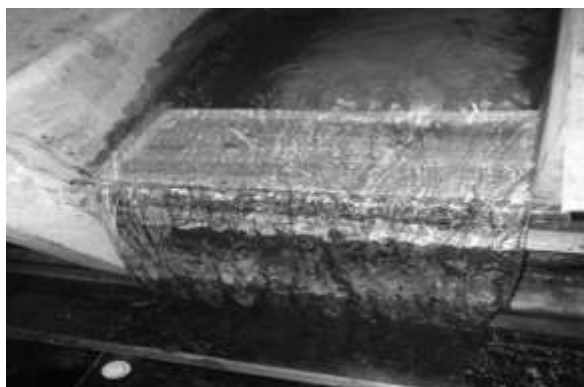


Fuente: elaboración propia.

### 3.3.1.6. Ensayo para vertedero rectangular de pared gruesa de espesor de pared de 25 cm y ancho de solera de 52 cm

El ensayo para este vertedero sigue el mismo procedimiento efectuado con el vertedero rectangular de pared gruesa, detallado en el inciso 3.2.

Figura 58. **Vertedero instalado**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla XXXVIII. **Datos obtenidos ensayo de vertedero rectangular de pared gruesa  $e = 25$  cm y  $b = 52$  cm**

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
2,0	178,69	281,2	156,28	282,4	166,93	283,5
3,1	75,06	283,5	76,44	284,6	78,38	285,8
4,3	40,97	284,6	41,35	284,6	40,69	284,6
4,4	39,0	272,0	41,53	282,4	40,41	275,5
5,6	25,54	290,4	26,25	293,8	26,02	292,7
6,7	19,0	285,8	19,22	286,9	19,30	289,2
7,9	13,81	286,9	13,88	285,8	13,75	284,6

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.1.6.1. Obtención de resultados

El proceso para la determinación de caudales con el vertedero rectangular de pared gruesa con  $e = 25 \text{ cm}$  y  $b = 52 \text{ cm}$ , es similar al efectuado con anterioridad, descrito en el inciso 3.2.

Tabla XXXIX. Caudales observados

H (cm)	Qr1 (l/s)	Qr2 (l/s)	Qr3 (l/s)	<Qr> (l/s)
2,0	1,57	1,80	1,69	1,6930
3,1	3,78	3,72	3,65	3,7155
4,3	6,94	6,88	6,99	6,9412
4,4	6,73	6,79	6,82	6,8640
5,6	11,37	11,19	11,25	11,2706
6,7	15,04	14,92	14,98	14,9846
7,9	20,77	20,59	20,86	20,6879

Fuente: elaboración propia.

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

$$Q = KH^n$$

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

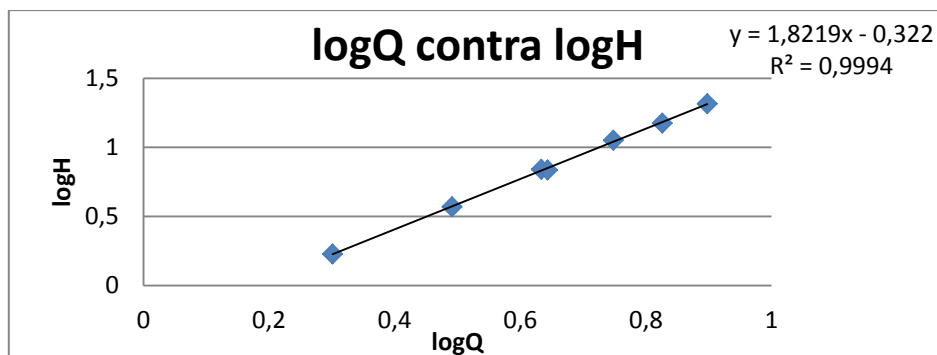
Tabla XL. **Logaritmo de caudales observados y de cargas**

H (cm)	Qr = V/t (l/s)	Log H	Log Q
2,0	1,6930	0,3010	0,2287
3,1	3,7155	0,4914	0,5700
4,3	6,9412	0,6335	0,8414
4,4	6,8640	0,6435	0,8366
5,6	11,2706	0,7482	1,0519
6,7	14,9846	0,8261	1,1756
7,9	20,6879	0,8976	1,3157

Fuente: elaboración propia.

Al igual que para el vertedero anterior se genera la gráfica de logaritmos, en la cual se agrega una línea de tendencia que brinda la ecuación de la recta, obteniendo de ella el valor de n y de K.

Figura 59. **Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H**



Fuente: elaboración propia.

Del gráfico se obtiene la ecuación  $Y = 1,8219x - 0,322$ , de donde se obtienen los valores de K y de n.

$$\text{Siendo } n = 1,8219 \text{ y } K = \text{Log}^{-1}(-0,322) = 0,4764$$

Con los parámetros anteriores se obtiene la ecuación generada específica para el vertedero rectangular de pared gruesa  $e = 25 \text{ cm}$  y  $b = 52 \text{ cm}$ .

$$Q_{\text{generado}} = 0,4764H^{1,8219} \quad \Longrightarrow \quad \text{Ec. calibración}$$

Donde:

$$Q_{\text{generado}} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

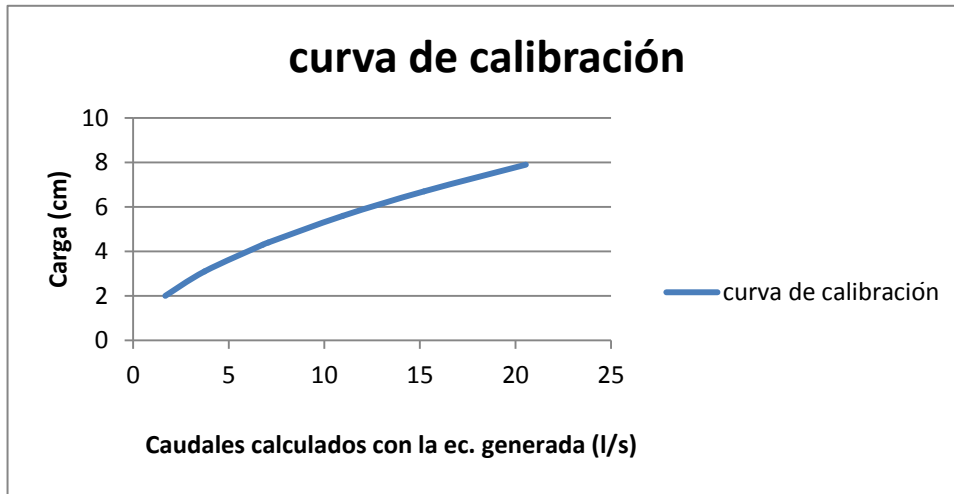
Con la ecuación de calibración ya definida se calculan los caudales generados y se comparan con los observados, a la vez que se estima el porcentaje de error entre ambos y se presenta la curva de calibración de este vertedero.

Tabla XLI. **Caudales observados y generados con la ecuación de calibración**

H (cm)	Q observado (l/s)	Q generado con ec. calibrada (l/s)	error (%)
2,0	1,6930	1,6843	0,5142
3,1	3,7155	3,7427	0,7318
4,3	6,9412	6,7934	2,1292
4,4	6,8640	7,0840	3,2056
5,6	11,2706	10,9925	2,4678
6,7	14,9846	15,2404	1,7075
7,9	20,6879	20,5759	0,5415

Fuente: elaboración propia.

Figura 60. **Curva de calibración**



Fuente: elaboración propia.

### 3.3.1.6.2. **Cálculo del caudal con la fórmula general o caudal teórico**

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

$$Q \text{ teórico} = \varepsilon_1 C_D \frac{2}{3} \sqrt{2g} b H^{3/2}$$

Donde:

$Q$  teórico= l/s

$\varepsilon_1$  = epsilon

$C_D$  = coeficiente de descarga

$b$ = ancho de solera (cm)

$H$ = carga (cm)

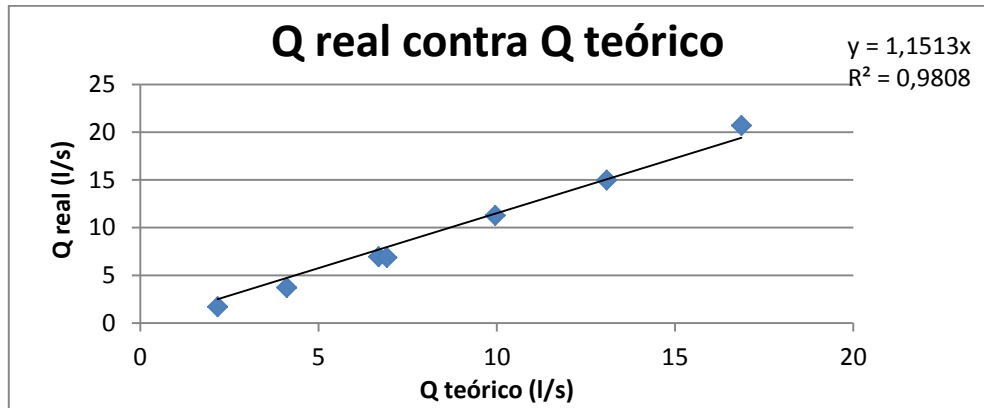
El procedimiento para calcular el épsilon y el coeficiente de descarga están descritos en el capítulo 2.3.

Tabla XLII. **Caudales observados y teóricos**

<b>H (cm)</b>	<b>Q observado(l/s)</b>	<b>Q teórico (l/s)</b>
2,0	1,6930	2,1682
3,1	3,7155	4,1072
4,3	6,9412	6,6820
4,4	6,8640	6,9165
5,6	11,2706	9,9542
6,7	14,9846	13,0863
7,9	20,6879	16,8629

Fuente: elaboración propia.

Figura 61. **Determinación del coeficiente de descarga**



Fuente: elaboración propia.

El factor de corrección será: F.C. = 1,1513

Quedando la ecuación corregida de la siguiente forma:

$$Q_{\text{real}} = \varepsilon_1 * (1,1513) * C_D * \frac{2}{3} \sqrt{2g} b H^{3/2}$$

Operando:

$$Q_{\text{real}} = \varepsilon_1 * 3,3997 * C_D * b H^{3/2}$$

Donde:

$$Q_{\text{teórico}} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

$$b = \text{cm}$$



Tabla XLIII. **Comparación de caudales teórico y corregido**

H (cm)	Q observado (l/s)	Q teórico (l/s)	Q corregido (l/s)
2,0	1,6930	2,1682	2,4963
3,1	3,7155	4,1072	4,7287
4,3	6,9412	6,6820	7,6930
4,4	6,8640	6,9165	7,9630
5,6	11,2706	9,9542	11,4603
6,7	14,9846	13,0863	15,0663
7,9	20,6879	16,8629	19,4143

Fuente: elaboración propia.

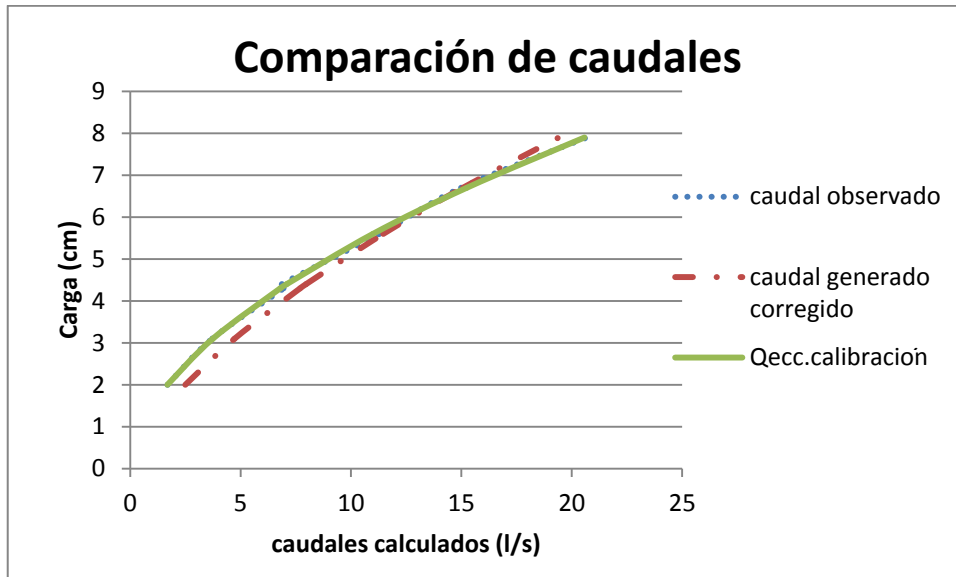
Concluyendo con la comparación de los resultados obtenidos.

Tabla XLIV. **Comparación de caudales**

H (cm)	Q observado(l/s)	Q generado con ec. Calibrada	Q corregido (l/s)
2,0	1,6930	1,6843	2,4963
3,1	3,7155	3,7427	4,7287
4,3	6,9412	6,7934	7,6930
4,4	6,8640	7,0840	7,9630
5,6	11,2706	10,9925	11,4603
6,7	14,9846	15,2404	15,0663
7,9	20,6879	20,5759	19,4143

Fuente: elaboración propia.

Figura 62. Comparación de caudales

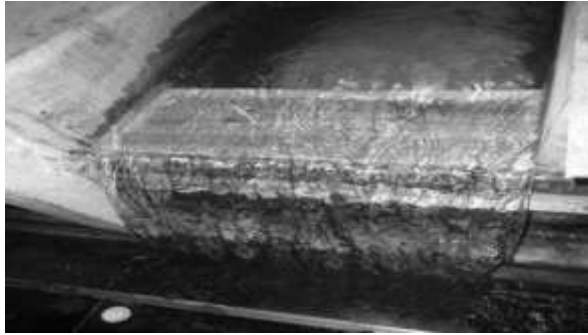


Fuente: elaboración propia.

### 3.3.1.7. Ensayo para vertedero rectangular de pared gruesa de espesor de pared de 12 cm y ancho de solera de 76 cm

El ensayo para este vertedero sigue el mismo procedimiento efectuado con el vertedero rectangular de pared gruesa, detallado en el inciso 3.2.

Figura 63. **Vertedero instalado**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla XLV. **Datos obtenidos ensayo de vertedero rectangular de pared gruesa  $e= 12\text{ cm}$  y  $b= 76\text{ cm}$**

<b>H (cm)</b>	<b>t1 (s)</b>	<b>Vol1 (l)</b>	<b>t2 (s)</b>	<b>Vol2 (l)</b>	<b>t3 (s)</b>	<b>Vol3 (l)</b>
2,2	76,43	167,6	78,85	168,8	79,04	168,8
2,9	89,97	284,6	88,97	282,4	90,72	284,6
3,6	51,35	277,8	52,56	282,4	54,04	288,1
4,3	35,94	283,5	36,31	285,8	36,56	285,8
5,0	26,57	2905,0	26,94	293,8	27,37	296,1
5,8	19,28	295,0	19,91	300,7	19,94	300,7
6,9	13,63	306,4	13,21	305,3	14,03	311,0

Fuente: elaboración propia.

### **3.3.1.7.1. Obtención de resultados**

El proceso para la determinación de caudales con el vertedero rectangular de pared gruesa con  $e= 12\text{ cm}$  y  $b= 76\text{ cm}$ , es similar al efectuado con anterioridad, descrito en el inciso 3.2.

Tabla XLVI. **Caudales observados**

<b>H (cm)</b>	<b>Qr1 (l/s)</b>	<b>Qr2 (l/s)</b>	<b>Qr3 (l/s)</b>	<b>&lt;Qr&gt; (l/s)</b>
2,2	2,1929	2,1408	2,1356	2,1564
2,9	3,1633	3,1741	3,1151	3,1508
3,6	5,4099	5,3729	5,3312	5,3714
4,3	7,8881	7,8711	7,8173	7,8588
5,0	11,1027	10,9057	10,8184	10,9423
5,8	15,3008	15,1030	15,0802	15,1613
6,9	22,4798	23,1113	22,1668	22,5860

Fuente: elaboración propia.

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

$$Q = KH^n$$

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

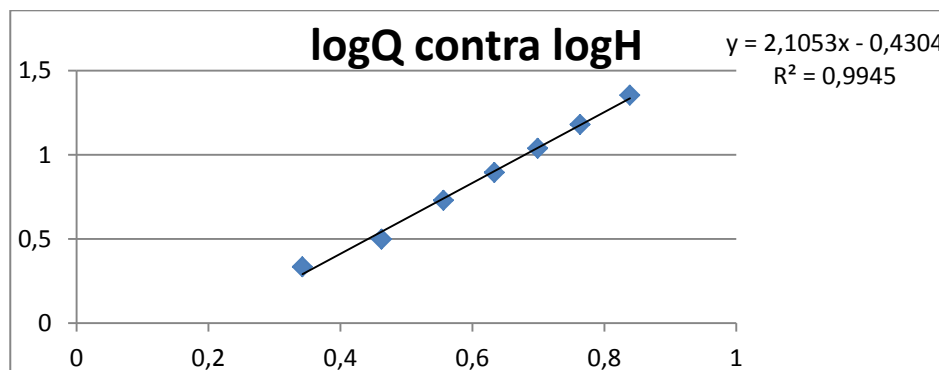
Tabla XLVII. **Logaritmo de caudales observados y de cargas**

H (cm)	Qr = V/t (l/s)	Log H	Log Q
2,2	2,1564	0,3424	0,3337
2,9	3,1508	0,4624	0,4984
3,6	5,3714	0,5563	0,7301
4,3	7,8588	0,6335	0,8954
5,0	10,9423	0,6990	1,0391
5,8	15,1613	0,7634	1,1807
6,9	22,5860	0,8380	1,3538

Fuente: elaboración propia.

Al igual que para el vertedero anterior se genera la gráfica de logaritmos, en la cual se agrega una línea de tendencia que brinda la ecuación de la recta, obteniendo de ella el valor de n y de K.

Figura 64. **Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H**



Fuente: elaboración propia.

Del gráfico se obtiene la ecuación  $Y = 2,1053x - 0,4304$ , de donde se obtienen los valores de K y de n.

$$\text{Siendo } n = 2,1053 \text{ y } K = \text{Log}^{-1}(-0,4304) = 0,3711$$

Con los parámetros anteriores se obtiene la ecuación generada específica para el vertedero rectangular de pared gruesa  $e = 12 \text{ cm}$  y  $b = 76 \text{ cm}$ .

$$Q_{\text{generado}} = 0,3711 H^{2,1053} \quad \Longrightarrow \quad \text{Ec. calibración}$$

Donde:

$$Q_{\text{generado}} = \text{ l/s}$$

$$H = \text{ cm}$$

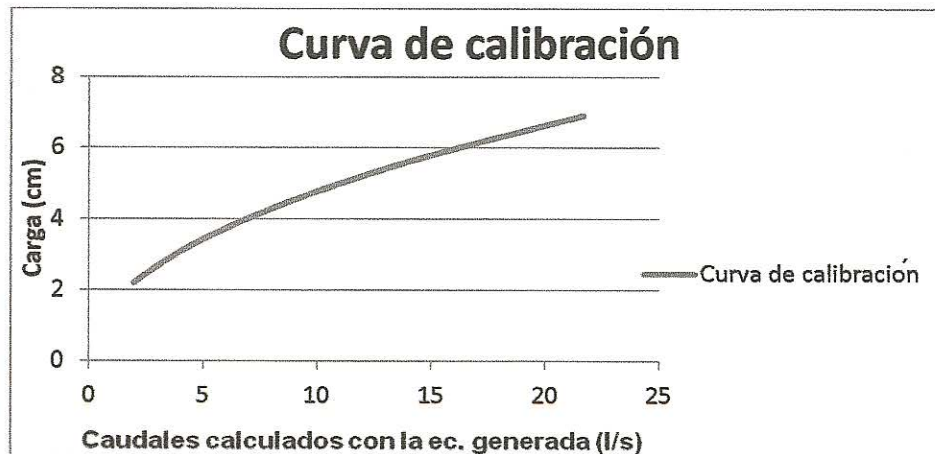
Con la ecuación de calibración ya definida se calculan los caudales generados y se comparan con los observados, a la vez que se estima el porcentaje de error entre ambos y se presenta la curva de calibración de este vertedero.

Tabla XLVIII. **Caudales observados y generados con la ecuación de calibración**

H (cm)	Q observado (l/s)	Q generado con ec. calibrada (l/s)	error (%)
2,2	2,1564	1,9516	9,4976
2,9	3,1508	3,4912	10,8036
3,6	5,3714	5,5040	2,4685
4,3	7,8588	8,0008	1,8060
5,0	10,9423	10,9909	0,4440
5,8	15,1613	15,0223	0,9172
6,9	22,5860	21,6531	4,1303

Fuente: elaboración propia.

Figura 65. Curva de calibración



Fuente: elaboración propia.

### 3.3.1.7.2. Cálculo del caudal con la fórmula general o caudal teórico

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

$$Q \text{ teórico} = \varepsilon_1 C_D \frac{2}{3} \sqrt{2g} b H^{3/2}$$

Donde:

Q teórico= l/s

$\varepsilon_1$  = epsilon

$C_D$  = coeficiente de descarga

b= ancho de solera (cm)

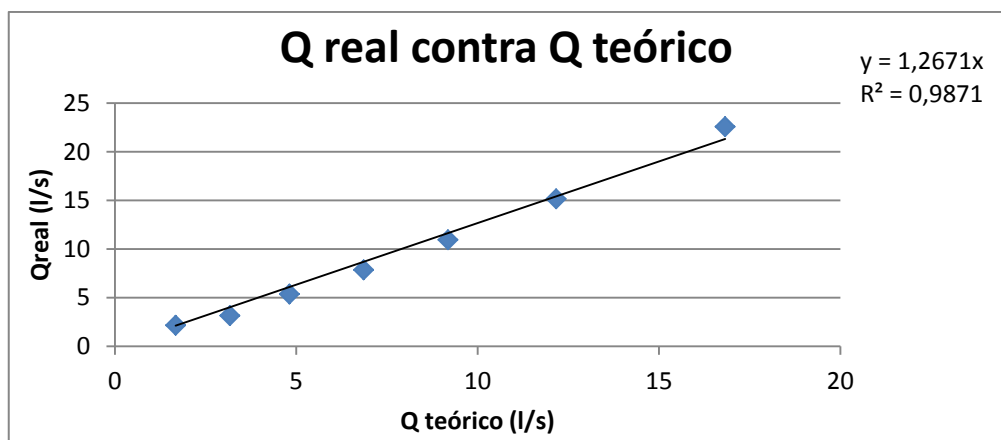
H= carga (cm)

Tabla XLIX. **Caudales observados y teóricos**

H (cm)	Q observado (l/s)	Q teórico (l/s)
2,2	2,1564	1,6725
2,9	3,1508	3,1678
3,6	5,3714	4,8087
4,3	7,8588	6,8583
5,0	10,9423	9,1829
5,8	15,1613	12,1660
6,9	22,5860	16,8248

Fuente: elaboración propia.

Figura 66. **Determinación del coeficiente de descarga**



Fuente: elaboración propia.

El factor de corrección será: F.C. = 1,2671



Quedando la ecuación corregida de la siguiente forma:

$$Q_{\text{real}} = \varepsilon_1 * (1,2672) * C_D * \frac{2}{3} \sqrt{2g} b H^{3/2}$$

Operando:

$$Q_{\text{real}} = \varepsilon_1 * 3,7419 * C_D * b H^{3/2}$$

Donde:

$$Q_{\text{teórico}} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

$$b = \text{cm}$$

Tabla L. **Comparación de caudales teórico y corregido**

H (cm)	Q observado (l/s)	Q teórico (l/s)	Q corregido (l/s)
2,2	2,1564	1,6725	2,1192
2,9	3,1508	3,1678	4,0140
3,6	5,3714	4,8087	6,0931
4,3	7,8588	6,8583	8,6902
5,0	10,9423	9,1829	11,6356
5,8	15,1613	12,1660	15,4155
6,9	22,5860	16,8248	21,3187

Fuente: elaboración propia.

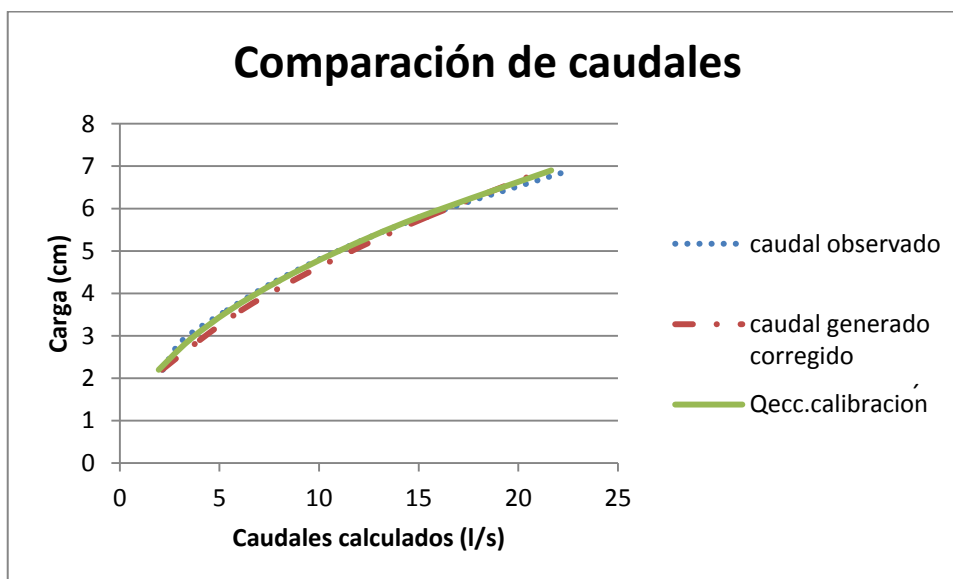
Concluyendo con la comparación de los resultados obtenidos.

Tabla LI. **Comparación de caudales**

H (cm)	Q observado(l/s)	Q generado con ec. Calibrada	Q corregido (l/s)
2,2	2,1564	1,9516	2,1192
2,9	3,1508	3,4912	4,0140
3,6	5,3714	5,5040	6,0931
4,3	7,8588	8,0008	8,6902
5,0	10,9423	10,9909	11,6356
5,8	15,1613	15,0223	15,4155
6,9	22,5860	21,6531	21,3187

Fuente: elaboración propia

Figura 67. **Comparación de caudales**

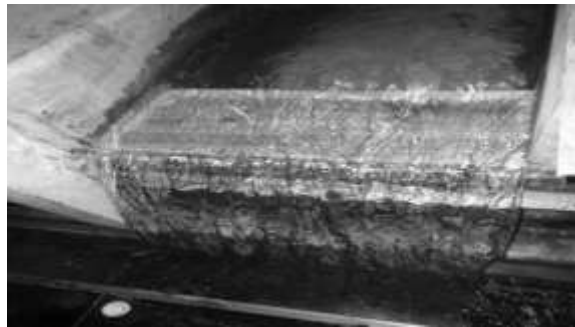


Fuente: elaboración propia.

**3.3.1.8. Ensayo para vertedero rectangular de pared gruesa de espesor de pared de 16 cm y ancho de solera de 76 cm**

El ensayo para este vertedero sigue el mismo procedimiento efectuado con el vertedero rectangular de pared gruesa, detallado en el inciso 3.2.

Figura 68. **Vertedero instalado**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla LII. **Datos obtenidos ensayo de vertedero rectangular de pared gruesa  $e = 16$  cm y  $b = 76$  cm**

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
2,3	120	168,8	127	166,5	129,9	167,6
3,2	51,84	165,3	55,88	168,8	57,34	169,9
3,9	34,12	171,1	35,09	173,4	34,85	171,1
4,7	22,4	174,5	22,41	174,5	22,50	175,7
5,4	27,53	289,2	26,91	285,8	26,81	286,9
6,2	18,94	295,0	19,19	295,0	19,53	297,3
7,0	15,94	323,7	20,94	409,7	393,6	311,0

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.1.8.1. Obtención de resultados

El proceso para la determinación de caudales con el vertedero rectangular de pared gruesa con  $e = 16 \text{ cm}$  y  $b = 76 \text{ cm}$ , es similar al efectuado con anterioridad, descrito en el inciso 3.2.

Tabla LIII. **Caudales observados**

<b>H (cm)</b>	<b>Qr1 (l/s)</b>	<b>Qr2 (l/s)</b>	<b>Qr3 (l/s)</b>	<b>&lt;Qr&gt; (l/s)</b>
2,3	1,4067	1,3110	1,2902	1,3360
3,2	3,1887	3,0208	2,9630	3,0575
3,9	5,0147	4,9416	4,9096	4,9553
4,7	7,7902	7,7867	7,8089	7,7953
5,4	10,5049	10,6206	10,7012	7,7953
6,2	15,5755	15,3726	15,2247	15,3903
7,0	20,3074	19,5654	20,2157	20,0295

Fuente: elaboración propia.

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

$$Q = KH^n$$

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

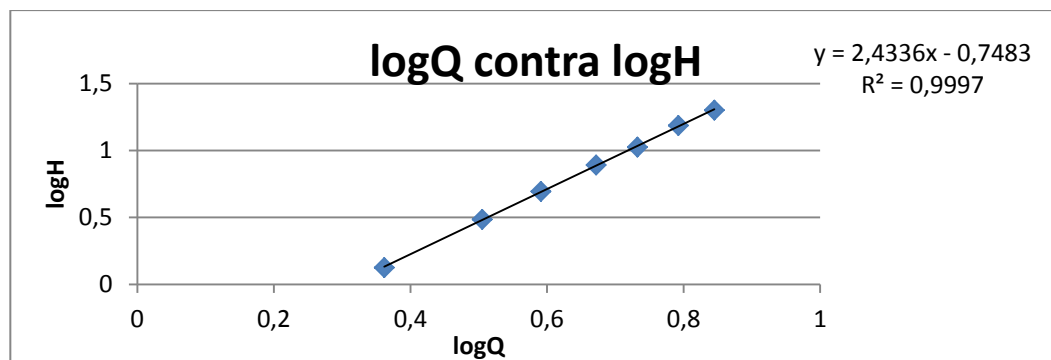
Tabla LIV. **Logaritmo de caudales observados y de cargas**

H (cm)	Qr = V/t (l/s)	Log H	Log Q
2,3	1,3360	0,3617	0,1258
3,2	3,0575	0,5051	0,4854
3,9	4,9553	0,5911	0,6951
4,7	7,7953	0,6721	0,8918
5,4	7,7953	0,7324	1,0257
6,2	15,3903	0,7924	1,1872
7,0	20,0295	0,8451	1,3017

Fuente: elaboración propia.

Al igual que para el vertedero anterior se genera la gráfica de logaritmos, en la cual se agrega una línea de tendencia que brinda la ecuación de la recta, obteniendo de ella el valor de n y de K.

Figura 69. **Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H**



Fuente: elaboración propia.

Del gráfico se obtiene la ecuación  $Y = 2,4336x - 0,7483$ , de donde se obtienen los valores de K y de n.

Siendo  $n = 2,4336$  y  $K = \text{Log}^{-1}(-0,7483) = 0,1785$

Con los parámetros anteriores se obtiene la ecuación generada específica para el vertedero rectangular de pared gruesa  $e = 16 \text{ cm}$  y  $b = 76 \text{ cm}$ .

$$Q_{\text{generado}} = 0,1785H^{2,4336} \quad \Longrightarrow \quad \text{Ec. calibración}$$

Donde:

$$Q_{\text{generado}} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

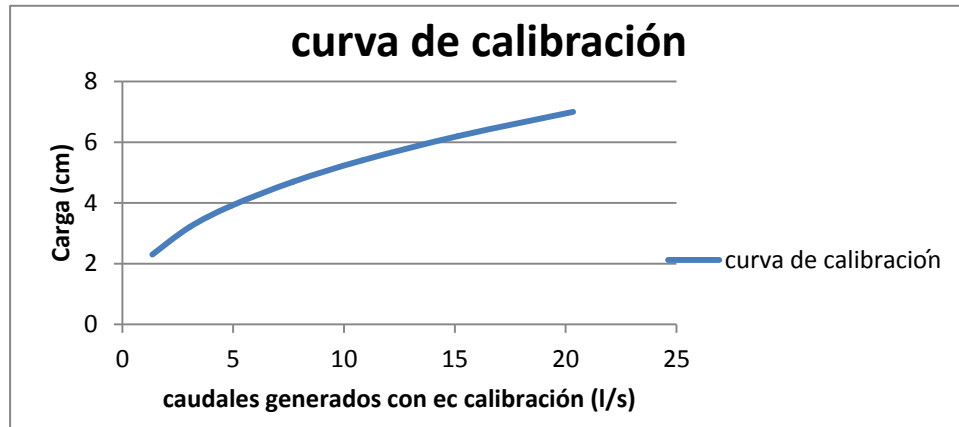
Con la ecuación de calibración ya definida se calculan los caudales generados y se comparan con los observados, a la vez que se estima el porcentaje de error entre ambos y se presenta la curva de calibración de este vertedero.

**Tabla LV. Caudales observados y generados con la ecuación de calibración**

H (cm)	Q observado (l/s)	Q generado con ec. calibrada (l/s)	error (%)
2,3	1,3360	1,3550	1,4243
3,2	3,0575	3,0267	1,0063
3,9	4,9553	4,8984	1,1482
4,7	7,7953	7,7136	1,0479
5,4	7,7953	10,8141	1,9345
6,2	15,3903	15,1357	1,6541
7,0	20,0295	20,3362	1,5309

Fuente: elaboración propia.

Figura 70. **Curva de calibración**



Fuente: elaboración propia.

### 3.3.1.8.2. **Cálculo del caudal con la fórmula general o caudal teórico**

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

$$Q \text{ teórico} = \varepsilon_1 C_D \frac{2}{3} \sqrt{2g} b H^{3/2}$$

Donde:

Q teórico= l/s

$\varepsilon_1$  = epsilon

$C_D$  = coeficiente de descarga

b= ancho de solera (cm)

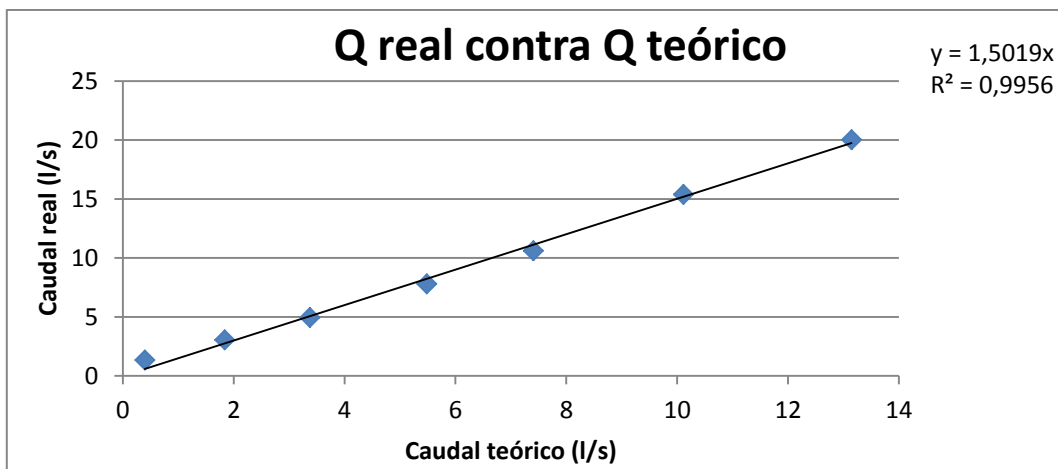
H= carga (cm)

Tabla LVI. Caudales observados y teóricos

H (cm)	Q observado(l/s)	Q teórico (l/s)
2,3	1,3360	0,3958
3,2	3,0575	1,8377
3,9	4,9553	3,3727
4,7	7,7953	5,4846
5,4	7,7953	7,4051
6,2	15,3903	10,1148
7,0	20,0295	13,1463

Fuente: elaboración propia.

Figura 71. Determinación del coeficiente de descarga



Fuente: elaboración propia.



El factor de corrección será: F.C. = 1,5019

Quedando la ecuación corregida de la siguiente forma:

$$Q_{\text{real}} = \varepsilon_1 * (1,5019) * C_D * \frac{2}{3} \sqrt{2g} b H^{3/2}$$

Operando:

$$Q_{\text{real}} = \varepsilon_1 * 4,4350 * C_D * b H^{3/2}$$

Donde:

$$Q_{\text{teórico}} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

$$b = \text{cm}$$

Tabla LVII. **Comparación de caudales teórico y corregido**

H (cm)	Q observado(l/s)	Q teórico (l/s)	Q corregido (l/s)
2,3	1,3360	0,3958	0,5944
3,2	3,0575	1,8377	2,7600
3,9	4,9553	3,3727	5,0654
4,7	7,7953	5,4846	8,2373
5,4	7,7953	7,4051	11,1217
6,2	15,3903	10,1148	15,1915
7,0	20,0295	13,1463	19,7445

Fuente: elaboración propia.

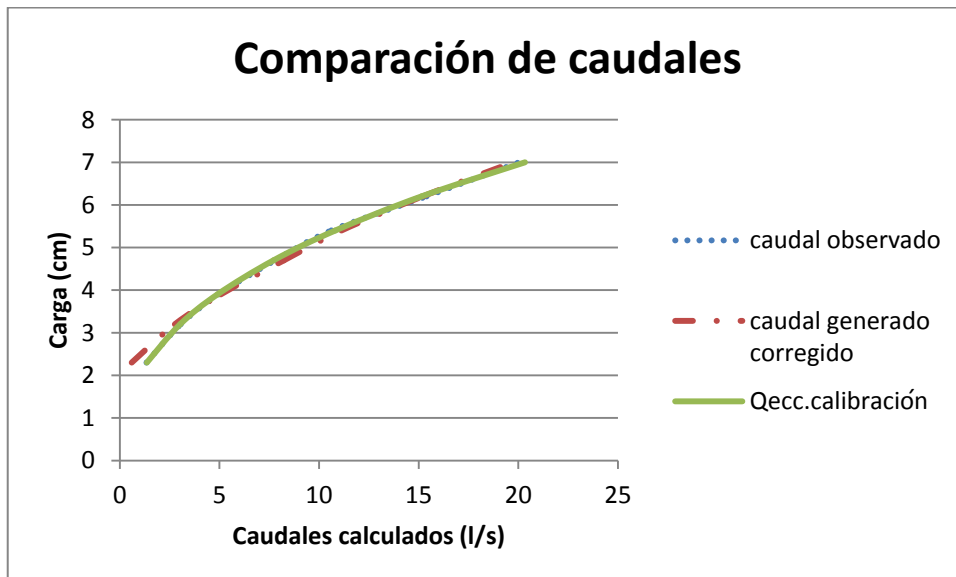
Concluyendo con la comparación de los resultados obtenidos.

Tabla LVIII. **Comparación de caudales**

H (cm)	Q observado (l/s)	Q generado con ec. Calibrada	Q corregido (l/s)
2,3	1,3360	1,3550	0,5944
3,2	3,0575	3,0267	2,7600
3,9	4,9553	4,8984	5,0654
4,7	7,7953	7,7136	8,2373
5,4	7,7953	10,8141	11,1217
6,2	15,3903	15,1357	15,1915
7,0	20,0295	20,3362	19,7445

Fuente: elaboración propia

Figura 72. **Comparación de caudales**

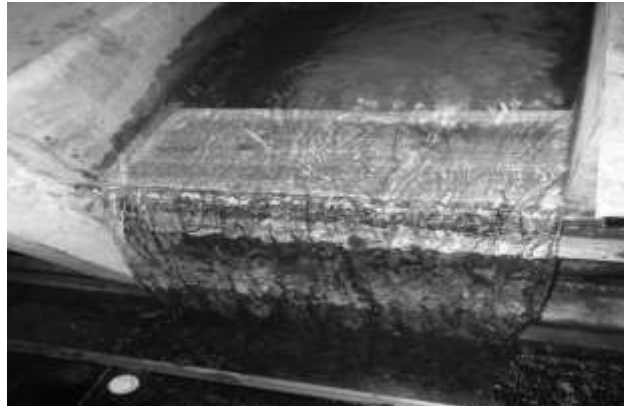


Fuente: elaboración propia.

**3.3.1.9. Ensayo para vertedero rectangular de pared gruesa de espesor de pared de 25 cm y ancho de solera de 76 cm**

El ensayo para este vertedero sigue el mismo procedimiento efectuado con el vertedero rectangular de pared gruesa, detallado en el inciso 3.2.

Figura 73. **Vertedero instalado**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla LIX. **Datos obtenidos ensayo de vertedero rectangular de pared gruesa  $e= 25$  cm y  $b= 76$  cm**

H (cm)	t1 (s)	Vol1 (l)	t2 (s)	Vol2 (l)	t3 (s)	Vol3 (l)
3,0	76,53	166,5	78,88	167,6	79,60	168,8
3,4	57,5	168,8	56,37	166,5	58,28	168,8
3,7	44,28	169,9	44,25	169,9	44,96	171,1
3,9	38,0	168,8	39,44	171,1	39,97	171,1
4,3	29,56	172,2	30,03	173,4	30,25	174,5
4,9	22,22	174,5	22,72	175,7	22,69	174,5
5,6	26,28	290,4	26,04	290,4	26,65	290,4
6,3	19,46	296,1	19,53	298,4	19,66	299,6
7,0	22,78	409,7	22,41	408,6	22,94	412,0

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.1.9.1. Obtención de resultados

El proceso para la determinación de caudales con el vertedero rectangular de pared gruesa con  $e= 25$  cm y  $b= 76$  cm, es similar al efectuado con anterioridad, descrito en el inciso 3.2.

Tabla LX. **Caudales observados**

H (cm)	Qr1 (l/s)	Qr2 (l/s)	Qr3 (l/s)	<Qr> (l/s)
3,0	2,1756	2,1247	2,1206	2,140
3,4	2,9357	2,9537	2,8964	2,929
3,7	3,8369	3,8395	3,8056	3,827
3,9	4,4421	4,3382	4,2807	4,354
4,3	5,8254	5,7742	5,7686	5,789
4,9	7,8533	7,7333	7,6906	7,759
5,6	11,0502	11,1521	10,8968	11,033
6,3	15,2158	15,2791	15,2391	15,245
7,0	17,9851	18,2329	17,9599	18,059

Fuente: elaboración propia.

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

$$Q = KH^n$$

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

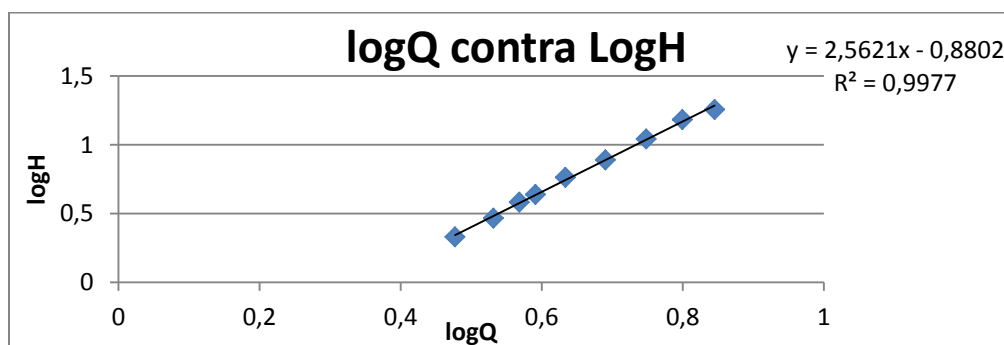
Tabla LXI. **Logaritmo de caudales observados y de cargas**

H (cm)	Qr = V/t (l/s)	Log H	Log Q
3,0	2,140	0,4771	0,3305
3,4	2,929	0,5314	0,4667
3,7	3,827	0,5682	0,5829
3,9	4,354	0,5911	0,6389
4,3	5,789	0,6335	0,7626
4,9	7,759	0,6902	0,8898
5,6	11,033	0,7482	1,0427
6,3	15,245	0,7993	1,1831
7,0	18,059	0,8451	1,2567

Fuente: elaboración propia.

Al igual que para el vertedero anterior se genera la gráfica de logaritmos, en la cual se agrega una línea de tendencia que brinda la ecuación de la recta, obteniendo de ella el valor de n y de K.

Figura 74. **Gráfica de logaritmos de caudal observado y cargas H**



Fuente: elaboración propia.

Del gráfico se obtiene la ecuación  $Y = 2,5621x - 0,8802$ , de donde se obtienen los valores de K y de n.

$$\text{Siendo } n = 2,5621 \text{ y } K = \text{Log}^{-1}(-0,8802) = 0,1317$$

Con los parámetros anteriores se obtiene la ecuación generada específica para el vertedero rectangular de pared gruesa  $e = 25 \text{ cm}$  y  $b = 76 \text{ cm}$ .

$$Q_{\text{generado}} = 0,1317H^{2,5621} \quad \Longrightarrow \quad \text{Ec. calibración}$$

Donde:

$$\begin{aligned} Q_{\text{generado}} &= \text{l/s} \\ H &= \text{cm} \end{aligned}$$

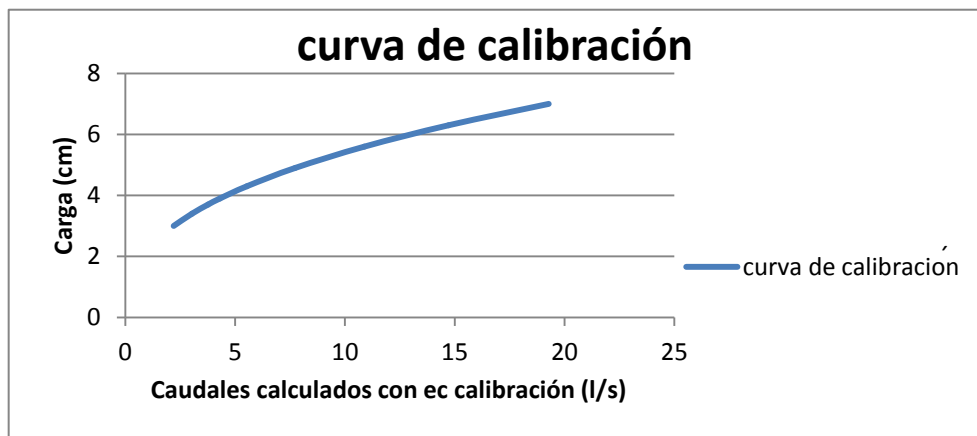
Con la ecuación de calibración ya definida se calculan los caudales generados y se comparan con los observados, a la vez que se estima el porcentaje de error entre ambos y se presenta la curva de calibración de este vertedero.

Tabla LXII. **Caudales observados y generados con la ecuación de calibración**

H (cm)	Q observado (l/s)	Q generado con ec. calibrada (l/s)	error (%)
3,0	2,140	2,1996	2,7705
3,4	2,929	3,0312	3,5051
3,7	3,827	3,7645	1,6431
3,9	4,354	4,3081	1,0479
4,3	5,789	5,5325	4,4370
4,9	7,759	7,7316	0,3545
5,6	11,033	10,8855	1,3373
6,3	15,245	14,7199	3,4420
7,0	18,059	19,2815	6,7678

Fuente: elaboración propia.

Figura 75. **Curva de calibración**



Fuente: elaboración propia.



### 3.3.1.9.2. Cálculo del caudal con la fórmula general o caudal teórico

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

$$Q \text{ teórico} = \varepsilon_1 C_D \frac{2}{3} \sqrt{2g} b H^{3/2}$$

Donde:

Q teórico= l/s

$\varepsilon_1$  = epsilon

$C_D$  = coeficiente de descarga

b= ancho de solera (cm)

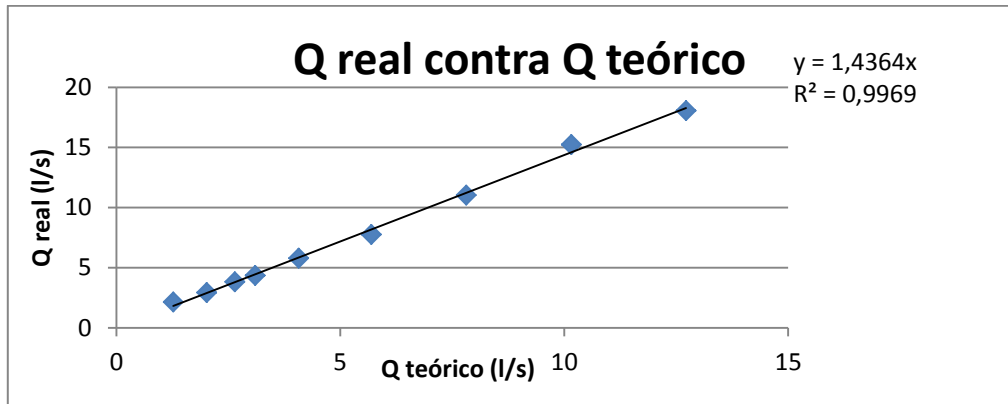
H= carga (cm)

Tabla LXIII. Caudales observados y teóricos

H (cm)	Q observado (l/s)	Q teórico (l/s)
3,0	2,140	1,270
3,4	2,929	2,016
3,7	3,827	2,647
3,9	4,354	3,099
4,3	5,789	4,072
4,9	7,759	5,694
5,6	11,033	7,813
6,3	15,245	10,160
7,0	18,059	12,721

Fuente: elaboración propia.

Figura 76. **Determinación del coeficiente de descarga**



Fuente: elaboración propia.

El factor de corrección será: F.C. = 1,4364

Quedando la ecuación corregida de la siguiente forma:

$$Q_{\text{real}} = \varepsilon_1 * (1,4364) * C_D * \frac{2}{3} \sqrt{2g} b H^{3/2}$$

Operando:

$$Q_{\text{real}} = \varepsilon_1 * 4,2416 * C_D * b H^{3/2}$$

Donde:

$$Q_{\text{teórico}} = \text{l/s}$$

$$H = \text{cm}$$

$$b = \text{cm}$$

Tabla LXIV. **Comparación de caudales teórico y corregido**

H (cm)	Q observado (l/s)	Q teórico (l/s)	Q corregido (l/s)
3,0	2,140	1,270	1,1841
3,4	2,929	2,016	2,8965
3,7	3,827	2,647	3,8028
3,9	4,354	3,099	4,4516
4,3	5,789	4,072	5,8494
4,9	7,759	5,694	8,1790
5,6	11,033	7,813	11,2231
6,3	15,245	10,160	14,5938
7,0	18,059	12,721	18,2723

Fuente: elaboración propia.

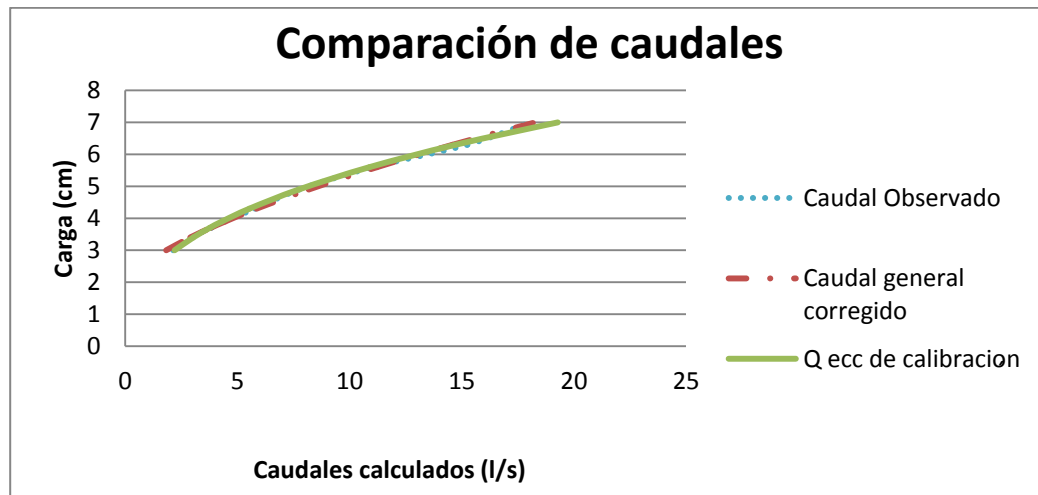
Concluyendo con la comparación de los resultados obtenidos.

Tabla LXV. **Comparación de caudales**

H (cm)	Q observado (l/s)	Q generado con ec. Calibrada	Q corregido (l/s)
3,0	2,140	2,1996	1,1841
3,4	2,929	3,0312	2,8965
3,7	3,827	3,7645	3,8028
3,9	4,354	4,3081	4,4516
4,3	5,789	5,5325	5,8494
4,9	7,759	7,7316	8,1790
5,6	11,033	10,8855	11,2231
6,3	15,245	14,7199	14,5938
7,0	18,059	19,2815	18,2723

Fuente: elaboración propia.

Figura 77. Comparación de caudales



Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

1. Los vertederos rectangulares de pared gruesa, son medidores de caudal que presentan la ventaja de ser de fácil construcción, ya que su diseño es bastante simple.
2. Los vertederos rectangulares de pared gruesa, son apropiados para el aforo de ríos no navegables, sistemas de riego y no presentan obstáculo para sólidos en suspensión.
3. Los vertederos de pared gruesa, son los más adecuados para efectuar aforos de caudales grandes, dado que los de pared delgada se pueden tomar como un orificio, en tanto que los de pared gruesa aprovechan todo el ancho del cauce o canal.
4. Para que un vertedero se pueda clasificar como de pared gruesa, se debe verificar que la relación  $e/H$  esté en el rango de  $0,67 \leq e/H \leq 10$ , según especificaciones.
5. En la determinación del coeficiente de descarga o factor de corrección, se obtuvieron resultados entre 1,088 y 1,1368, los cuales indican que el caudal real observado es entre un 8,8 por ciento y 13,7 por ciento mayor al caudal encontrado con la ecuación teórica de Rehbock.
6. La ecuación de descarga real tiene aplicación únicamente para los vertederos construidos en el laboratorio como parte del presente estudio.

7. La ecuación que describe la descarga real sobre cada uno de los 9 vertederos contruidos con madera genera valores de caudal más cercanos a los observados, según se aprecia en las gráficas de comparación, pudiendo ser utilizada en futuras prácticas de laboratorio para obtener los caudales de referencia.
8. Al comparar el caudal observado en los ensayos con caudal generado según la ecuación de Rehbock afectada con el factor de corrección, difieren con error promedio de 2,1 por ciento, lo cual físicamente equivale a un caudal 0,123 litros/segundo, lo cual no es significativo en la determinación de los caudales reales del canal.
9. El vertedero rectangular de pared gruesa, es un buen elemento de investigación para medición del flujo de agua libre de sedimentos, es fácil de construir, pero su rango de descarga es más restringido que el de otros tipos.

## RECOMENDACIONES

1. Al realizar mediciones de caudal con vertederos de pared gruesa es importante que el flujo sobre la cresta sea aireado con caída libre y no presente escurrimientos en su paredes, ya que éstos afectan la precisión de las fórmulas, dando resultados mayores a los que realmente están ocurriendo.
2. Cuando se proceda a tomar lecturas de carga  $H$  sobre el vertedero, se debe esperar a que se estabilice el flujo de agua en la sección de control en el canal hidrodinámico, para obtener medidas precisas.
3. La carga  $H$  deberá se leída a una distancia aguas arriba de la cresta no menor a cuatro veces la altura máxima esperada sobre la cresta, evitando así el efecto de aceleración al acercarse al vacío.
4. Cuando se procede a tomar la lectura de altura en el tanque de aforo se debe esperar a que se estabilice el flujo para que la medida sea más precisa.
5. Para cargas  $H$  muy pequeñas se recomienda tomar volúmenes de aforo pequeños para que no se desestabilice el flujo.
6. Es necesario darle mantenimiento periódicamente a los vertederos, es decir, limpiar las planchas de madera, y después del ensayo mantenerlas en un lugar seco para evitar su deterioro por humedad o vaciar de inmediato el canal.





## BIBLIOGRAFÍA

1. CADAVID R, Juan H. *Hidráulica de canales fundamentos*. Medellín, Colombia: Fondo, 2006. 203 p.
2. DE AZEVEDO, J. M.; GUILLERMO Acosta, A. *Manual de hidráulica*. México:Harla, 1976. 578 p.
3. LUX MONROY, Manuel Agustín. *Medidores de flujo en canales abiertos*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2010. 109 p
4. SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica general*. México: Limusa, 1997, 267 p
5. VILLÓN, Máximo. *Hidráulica de canales*. Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 1995. 487 p.

