



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

EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PERFIL TIPO CREAGER

Jared Alexander Véliz Arrecis

Asesorado por el Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Guatemala, noviembre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PERFIL TIPO CREAGER

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JARED ALEXANDER VÉLIZ ARRECIS

ASESORADO POR EL ING. LUIS MANUEL SANDOVAL MENDOZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

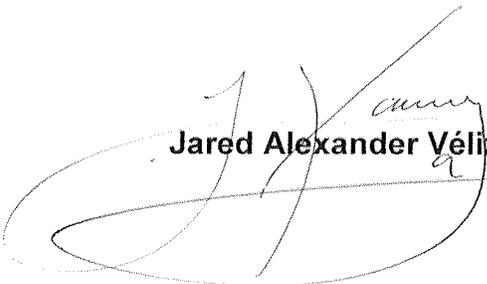
DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel López Juárez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PERFIL TIPO CREAGER

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 15 de abril de 2017.



Jared Alexander Véliz Arrecis

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 02 de Mayo de 2018

Ingeniero

Luis Manuel Sandoval Mendoza

Jefe del Departamento de Hidráulica

Facultad de Ingeniería

Después de revisar el trabajo de graduación del estudiante Jared Alexander Véliz Arrecis, quien se identifica con Registro Académico 2009-15183 CUI No. 2555 62012 0101, titulado **EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PERFIL TIPO CREAGER**, y haber hecho las correcciones necesarias al mismo, lo doy por aprobado y lo autorizo para continuar con el proceso correspondiente.

Sin otro particular, me despido atentamente.

"ID y Enseñad a Todos"

Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Colegiado No. 6496

Docente Departamento de Hidráulica





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala, 23 de Mayo de 2018

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero

Le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado **“EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PERFIL TIPO CREAGER”**, desarrollado por el estudiante de ingeniería civil **Jared Alexander Véliz Arrecis**, quien contó con la asesoría del ingeniero Luis Manuel Sandoval Mendoza.

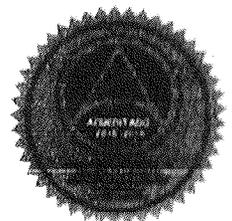
Considero que este trabajo está bien desarrollado y habiendo cumplido con los objetivos doy mi aprobación al mismo, solicitando darle el tramite respectivo.

Sin otro particular, me despido atentamente.

Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
Jefe del Departamento de Hidráulica



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

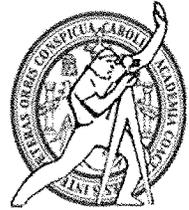




USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor y Coordinador del Departamento de Hidráulica Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza, al trabajo de graduación del estudiante Jared Alexander Véliz Arrecis **EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PERFIL TIPO GREAGER** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, noviembre 2018

/mmm.



Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua

Universidad de San Carlos
de Guatemala

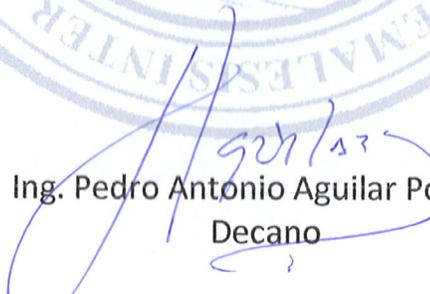


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 478.2018

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: **“EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PERFIL TIPO GREAGER”** presentado por el estudiante universitario: **Jared Alexander Véliz Arrecis** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala noviembre de 2018.

/echm

Mi asesor

Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
Muchas gracias por brindarme su apoyo y,
sobre todo, amistad para lograr alcanzar esta
meta tan anhelada.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi alma mater en esta importante etapa de mi vida, para formarme como profesional y como persona.
Facultad de Ingeniería	Por darme todos los conocimientos necesarios para desenvolverme en el campo laboral.
María del Carmen	Por apoyarme siempre con su amor de madre, compartir conmigo su sabiduría y paciencia, y por siempre guiarme a Dios.
Aníbal Jared	Por cada enseñanza de vida, por demostrarme de lo que somos capaces si hacemos las cosas de la mejor manera.
Stefanie Gramajo	Agradezco tu apoyo, amor y cariño que me demostraste siempre y por tu ayuda con esta tesis y que te hiciste presente a mi lado cada día. Así como ayudarme a ganar mi privado, te quiero.
Luis Manuel Sandoval	Por cada día que me apoyo para la culminación de esta investigación y por sus lecciones académicas, y por ser una excelente persona

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. MEDICIÓN DE CAUDALES	1
1.1. Definición de hidrometría.....	1
1.2. Importancia de la medición de caudales	2
1.3. Método de medición de flujo en canales abiertos.....	2
1.3.1. Método volumétrico	3
1.4. Canal Parshall	4
1.4.1. Partes de medidor Parshall	5
1.4.2. Dimensiones del medidor Parshall	6
1.4.3. Punto de medición	7
1.4.4. Fórmula para el cálculo del caudal de un medidor Parshall	8
2. VERTEDEROS	11
2.1. Terminología relativa a los vertederos.....	12
2.2. Clasificación de los vertederos.....	13
2.2.1. Espesor de la pared.....	13
2.2.2. Vertederos de pared delgada	14
2.2.3. Vertederos de pared gruesa	15

2.2.4.	Altura de la lámina de agua, posterior a la cresta ...	16
2.2.5.	Longitud de la cresta	17
2.3.	Vertedero de cimacio o de Creager	18
2.3.1.	Vertedero de descarga libre	20
2.3.2.	Vertedero de descarga controlada	21
2.4.	Ecuación del caudal para perfiles tipo Creager.....	23
2.4.1.	Coeficiente de descarga.....	23
2.4.2.	Longitud efectiva de la cresta.....	24
2.5.	Método de diseño por el USBR para perfil del cimacio.....	27
2.6.	Método semigráfico.....	29
2.7.	Criterios de diseño del US Bureau of Reclamation, USBR	30
3.	ENSAYOS DE LABORATORIO CON VERTEDEROS DE PARED GRUESA TIPO CREAGER	33
3.1.	Diseño y construcción de cimacio tipo Creager como medidor de caudales.....	33
3.2.	Vertedero tipo Creager para un caudal de 20 L/s	34
3.2.1.	Diseño de curvatura de vertedero tipo Creager para 20L/s por el método de U.S. Bureau of reclamation	35
3.2.2.	Coeficiente de descarga (C).....	36
3.2.3.	Geometría del perfil de un cimacio de cresta libre ..	38
3.3.	Vertedero tipo Creager para un caudal de 15 L/s	46
3.3.1.	Coeficiente de descarga (C).....	46
3.3.2.	Geometría del perfil de un cimacio de cresta libre ..	47
3.4.	Vertedero tipo Creager para un caudal de 10 L/s	49
3.4.1.	Coeficiente de Descarga (C):	49
3.4.2.	Geometría del perfil de un cimacio de cresta libre ..	50

4.	CALIBRACIÓN DE CAUDALES SOBRE VERTEDEROS	
	TIPO CREAGER	53
4.1.	Calibración de vertedero tipo Creager de 20 L/s	53
4.1.1.	Procedimiento del ensayo	53
4.1.2.	Obtención de resultados	54
4.1.3.	Cálculo de resultados experimentales	55
4.1.4.	Cálculo del caudal teórico.....	57
4.1.5.	Cálculo de la ecuación del caudal real	58
4.2.	Calibración de vertedero tipo Creager de 15 L/s y ajuste en la ecuación empírica.....	63
4.2.1.	Procedimiento del ensayo	63
4.2.2.	Cálculo de resultados experimentales	65
4.2.3.	Cálculo del caudal teórico.....	67
4.2.4.	Cálculo del caudal real	68
4.3.	Calibración de vertedero tipo Creager de 10 L/s y ajuste en la ecuación empírica.....	73
4.3.1.	Procedimiento del ensayo	73
4.3.2.	Cálculo de Resultados experimentales.....	74
4.3.3.	Cálculo del caudal Teórico.....	76
4.3.4.	Cálculo del caudal real	76
5.	INSTRUCTIVO DE LABORATORIO PARA ENSAYO CON VERTEDEROS TIPO CREAGER	83
	CONCLUSIONES	91
	RECOMENDACIONES.....	93
	BIBLIOGRAFÍA.....	95

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Aforo volumétrico.....	3
2.	Canal tipo Parshall	4
3.	Secciones del medidor Parshall (perfil)	5
4.	Canal tipo Parshall con las partes que lo componen.....	6
5.	Dimensiones del medidor de Parshall	8
6.	Flujo a través de vertederos	11
7.	Terminología relativa al vertedero	12
8.	Figura 1 Tipo de Vertedero según espesor de pared	14
9.	Diferentes formas de vertederos	16
10.	Vertederos con lámina libre y lámina sumergida.....	17
11.	Vertedero sin contracción.....	18
12.	Vertederos con contracciones	18
13.	Perfil del cimacio	19
14.	Perfil de cimacio de cresta libre.....	21
15.	perfil de cimacio de cresta controlada	22
16.	Vertido libre sobre un cimacio	24
17.	coeficiente de contracción en estribos, según U.S. Bureau of reclamation.....	26
18.	Coeficiente de contracción por pilas de formas diferentes, con el tajamar coincidiendo con el plano vertical del paramento aguas arriba del cimacio y velocidad de llegada despreciable.....	27
19.	Método semigráfico	30
20.	Valor de k para el diseño del perfil.....	31

21.	Valor de n para el diseño del perfil	31
22.	Gráficos de relaciones $xcHo, ycHo, R1Ho, R2Ho$ en función de la relación de cargas de velocidad sobre carga total , de acuerdo con el criterio tipo USBR.....	32
23.	Canal hidrodinámico del laboratorio de hidráulica.....	33
24.	Sección del canal	34
25.	Dimensiones de vertedero tipo Creager de 20 L/s	35
26.	Determinación del coeficiente de gasto C en función de P y Ho.....	37
27.	Ejes coordenados	38
28.	Factores k y n para el diseño del perfil de un cimacio de cualquier inclinación, U.S. Bureau of Reclamation	40
29.	Valores $XcHd, YcHd$ y RHd para el diseño del perfil del cimacio aguas arriba de cualquier inclinación, U.S. Bureau of Reclamation.....	41
30.	Método Semigráfico, US Bureau of Reclamation.....	42
31.	Método semigráfico, US Bureau of Reclamation.....	44
32.	Formaleta perfil de vertedero tipo Creager	45
33.	Modelo de Cimacio de 20 L/s.....	45
34.	Perfil del vertedero tipo Creager terminado	46
35.	Perfil de vertedero de 15 L/s	49
36.	Perfil de vertedero de 10 L/s	51
37.	Vertedero tipo Creager diseñado para un caudal máximo de 20 L/s	54
38.	Gráfica potencial de caudal experimental 20 L/s.....	56
39.	Gráfica de caudal experimental vs caudal teórico 20 L/s	59
40.	Gráfica comparación de Q_{exp} , Q_{real} y Q_{pot} en función de la carga H_o del cimacio de 20 L/s	61
41.	Aforo de caudal	63
42.	Vertedero tipo Creager diseñado para un caudal máximo de 15 L/s	64
43.	Gráfica potencial de caudal experimental 15 L/s.....	66
44.	Gráfica de caudal experimental vs caudal teórico 15 L/s	68

45.	Gráfica comparación de Q_{exp} , Q_{real} y Q_{pot} en función de la carga H_o del cimacio de 15 L/s.....	70
46.	Calibración y lectura de Limnómetro	72
47.	Vertedero tipo Creager diseñado para un caudal máximo de 10 L/s.....	73
48.	Gráfica potencial de caudal experimental 10 L/s.....	75
49.	Gráfica de caudal experimental vs caudal teórico 10 L/s	77
50.	Gráfica comparación de Q_{exp} , Q_{real} y Q_{pot} en función de la carga H_o del cimacio de 10 L/s.....	79
51.	Vertedero tipo Creager al momento de circular un caudal de 18 L/s.....	81
52.	Lectura de altura en el tanque volumétrico.....	81
53.	Trayectoria de flujo de descarga	84
54.	Determinación del coeficiente de gasto según U.S.B.R.	86
55.	Curva de descarga	88

TABLAS

I.	Rango de caudales de operación en canal Parshall.....	7
II.	Valores de exponente “n” y coeficiente “k”	9
III.	Coordenadas de perfil de Cimacio de 20 L/s.....	43
IV.	Coordenadas de perfil de Cimacio de 15 L/s.....	48
V.	Coordenadas de perfil de Cimacio de 10 L/s.....	51
VI.	Datos obtenidos para Cimacio de 20 L/s.....	55
VII.	Caudales experimentales 20 L/s	55
VIII.	Caudales experimentales de ecuación de tendencia 20 L/s.....	57
IX.	Caudales teóricos 20 L/s	58
X.	Caudal experimental y teórico 20 L/s	59
XI.	Caudal real 20 L/s	60
XII.	Comparación de caudales 20 L/s	61
XIII.	% de error Q_{real} vs Q_{exp} 20 L/s	62

XIV.	% de error Qec. Potencial vs Qexp 20 L/s	62
XV.	Datos obtenidos para cimacio de 15 L/s	64
XVI.	Caudal experimental 15 L/s	65
XVII.	Caudales experimentales de ecuación de tendencia 15 L/s	67
XVIII.	Caudal teórico 15 L/s	67
XIX.	Caudal experimental y teórico 15 L/s	68
XX.	Caudal real 15 L/s	69
XXI.	Comparación de caudales 15 L/s	70
XXII.	% de error Qreal vs Qexp 15 L/s	71
XXIII.	% de error Qec. Potencial vs Qexp 15 L/s	71
XXIV.	Datos obtenidos para Cimacio de 10 L/s	74
XXV.	Caudales experimentales 10 L/s	74
XXVI.	Caudales experimentales de ecuación de tendencia 10 L/s	75
XXVII.	Caudal teórico 10 L/s	76
XXVIII.	Caudal experimental y teórico 10 L/s	77
XXIX.	Caudal real 10 L/s	78
XXX.	Comparación de caudales 10 L/s	79
XXXI.	% de error Qreal vs Qexp 10 L/s	80
XXXII.	% de error Qec,Potencial vs Qexp 10 L/s	80

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
P	Altura de parámetro o cresta
H	Altura total de la lámina de agua, desde el fondo
L	Ancho del canal de acceso al vertedero
Θ	Ángulo de tiro parabólico
h	Carga del vertedero, superficie libre y la cresta
Hd	Carga de diseño del vertedero
Ha	Carga debido a la velocidad de llegada
Ho	Carga total del vertedero
Q	Caudal en el sistema
Q_{exp}	Caudal experimental
$Q_{ec.potencial}$	Caudal experimental de ecuación de tendencia
Q_{real}	Caudal real
Q_{teo}	Caudal teórico
C	Coefficiente de descarga
Ka	Coefficiente de contracción por estribos
Kp	Coefficiente de contracción por pilas
k	Coefficientes experimentales dependen de talud
n	Coefficientes experimentales dependen de talud
C_d	Coefficiente de descarga
X	Coordenada en el eje horizontal del perfil
Y	Coordenada en el eje vertical del perfil
Xt	Coordenada tangencial a pendiente de diseño
Yt	Coordenada tangencial a pendiente de diseño

Xc	Distancia horizontal al punto C
d	Distancia mínima aguas arriba donde colocar limnómetro
Yc	Distancia vertical al punto C
e	Espesor de la pared del vertedero
a	Lámina de agua que pasa sobre la cresta
Le	Longitud efectiva de la cresta
b	Longitud efectiva de la cresta del vertedero
N	Número de pilas colocadas en el cimacio
α	Pendiente del canal de descarga
O	Punto cero del plano cartesiano
PT	Punto de tangencia
R2	Radio del punto C al punto B
R1	Radio del punto O al punto A
T	Tiempo cronometrado
Vo	Velocidad inicial
V	Volumen de agua

GLOSARIO

Aforo	Medir la cantidad de agua que lleva una corriente en una unidad de tiempo.
Aliviadero	Tipo de dique o presa, su función es controlar niveles de agua en una represa.
Canal	Construcción destinada al transporte de fluidos.
Caudal	Volumen de agua que circula por unidad de tiempo por un punto determinado de control.
Cavitación	Cavidades de vapor dentro del agua que actúan fuerzas que responden a diferencias de presión.
Cimacio	Consiste en una cresta de control de pared gruesa.
Concavidad	Es una curva que se asemeja a la parte inferior de una circunferencia.
Cresta	La zona más elevada del vertedero.
Cuencas	Territorio drenado por un único sistema de drenaje natural.

Estribos	Muros laterales verticales utilizados para confinar el flujo.
Limnómetro	Instrumento que mide los cambios en el nivel de la superficie del agua.
Napa	Lámina de líquido que pasa sobre la cresta.
Obra	Construcción en el campo de ingeniería civil.
Parámetro	Hace referencia a la superficie del muro aguas arriba de la cresta.
Pilas	Estructura de soporte para una compuerta.
Presión	La fuerza ejercida por el flujo de agua en movimiento.
Socavamiento	Desgaste sobre el vertedero causado por caudales de agua mayores al de diseño.
Tamiz	Instrumento formado por un aro y una red tensada muy tupida.
USBR	U.S. Bureau of Reclamation.
Vertedero	Obra hidráulica utilizada para medición de caudal de forma controlada.

Vertedero tipo Creager	Vertedero de pared gruesa con un perfil que obedece el tiro parabólico de un vertedero de pared delgada.
Vertientes	Se define como cantidad de agua que ingresa al canal.
WES	Waterways Experiment Station.

RESUMEN

El conocimiento de las obras hidráulica es importante para los estudiantes de la carrera de ingeniería civil, entre estas obras las estructuras de control de flujo como los vertederos de pared gruesa que son típicos en embalses. Este trabajo de graduación se enfoca en el diseño y estudio del funcionamiento de los vertederos tipo Creager llamados comúnmente cimacios que son utilizados para regular el flujo en las salidas de embalses y de esta manera controlar la descarga de flujo.

Se diseñaron tres vertederos tipo Creager para distintas velocidades de flujo los cuales se instalaron en el canal hidráulico del laboratorio de mecánica de fluidos e hidráulica y se simuló el paso de flujo en ellos para observar su comportamiento sobre cada cimacio.

Se determinaron ecuaciones propias para la descarga de flujo, coeficientes de descarga para corregir las ecuaciones teóricas y se compararon los resultados experimentales con los resultados de las ecuaciones teóricas propuestas por USBR y WEP. Se dedujo una ecuación experimental para cada modelo ensayado.

Al final, se propone una práctica de laboratorio con su instructivo respectivo donde se presentan los lineamientos fundamentales para desarrollar los aforos en vertederos tipo Creager.

OBJETIVOS

General

Evaluar las características, construir y diseñar perfil de vertederos tipo Creager (cimacio) y analizar el comportamiento del flujo de agua sobre los mismos mediante ensayos en el laboratorio de hidráulica.

Específicos

1. Construir y ajustar los perfiles de vertederos tipo Creager para distintas bases y para distintos caudales de diseño.
2. Calibrar la ecuación teórica para la descarga con los datos de los ensayos realizados en el laboratorio.
3. Deducir la ecuación experimental de descarga para el vertedero tipo Creager, encontrando la relación entre su carga, ancho y coeficiente de descarga, utilizando métodos numéricos y estadísticos.
4. Elaborar el material que tenga información básica sobre el comportamiento de flujo en cimacio y su correcto diseño hidráulico.
5. Analizar el comportamiento del coeficiente de descarga conforme se incrementa la altura de la carga de agua sobre el cimacio.
6. Fortalecer el área de investigación en el departamento de hidráulica de ingeniería civil.

INTRODUCCIÓN

La ingeniería hidráulica se ocupa de diseñar, construir y operar obras hidráulicas. Su punto de partida es la investigación, ya que esta área de la ingeniería se sustenta en gran parte en resultados experimentales. En las obras de excedencia, existen diferentes formas de medir caudales. Uno de los métodos más utilizados para medir caudales son los vertederos cuyo diseño obedece a diferentes métodos por lo que de esto dependerá su forma y su propósito.

Los vertederos tipo Creager de superficie libre pueden ser utilizados para disipar de manera óptima la energía específica del flujo, así como para la medición del caudal que pasa sobre la cresta. Consiste en una cresta de control de pared gruesa, cuyo perfil tiene aproximadamente la forma de la superficie inferior de una lámina ventilada que vierte libremente sobre la cresta, una de las características del perfil tipo Creager es que al conocer la altura del líquido se podrá obtener el caudal que pasa sobre la cresta.

Dada la importancia que desempeña la medición de flujo para diferentes propósitos, esta investigación se enfocará en los vertederos tipo Creager, se estudiarán las características de estos perfiles.

1. MEDICIÓN DE CAUDALES

1.1. Definición de hidrometría

La hidrometría es una actividad fundamental que conforma la operación de las distintas acciones que manejan la medición del agua en las etapas de operación. Inicia desde las fuentes de abastecimiento como presas de almacenamiento, derivadores, pozos profundos, etc. hasta que se entrega a los usuarios finales.

La hidrometría incluye, especialmente, mediciones de niveles de agua, densidad, acarreo de sedimentos y los levantamientos alimétricos longitudinales y transversales del cauce de corrientes naturales y de volúmenes de agua.

La hidrometría además de aforar el agua, comprende conjuntamente planear, ejecutar y procesar la información que se registra de los caudales medidos de agua, así como la red de una cuenca hidrográfica y una red urbana de distribución de agua. En el contexto del ingeniero civil, la hidrometría tiene un propósito general y es cuantificar el volumen en circulación.

Conocer la cantidad de agua extraída y entregada en diferentes puntos de control, permite conseguir valiosos beneficios técnicos, como calcular las eficiencias de uso del recurso, también económico, ambientales que se encarga del control de la calidad del agua. Por lo que, la medición del agua no debe simplificarse como la recopilación de datos, sino como un componente esencial para el análisis total sobre la ocupación y aprovechamiento del agua.

1.2. Importancia de la medición de caudales

El objetivo principal de la hidrometría es recopilar datos veraces para procesar y obtener resultados favorables que eleven la eficiencia en la medición de caudales de un sistema hidráulico.

La información de la medición de caudales se ajusta a la disponibilidad del agua. Mediante el análisis estadístico de caudales es posible conocer los volúmenes probables de agua que podemos disponer. Esta información resulta de suma importancia para la estimación de volumen de agua que circula.

La hidrometría brinda los resultados que permiten saber la cantidad y calidad del agua, estableciendo si los caudales previstos son correctos. Además de las aplicaciones anteriormente expuestas, la hidrometría sirve para concluir que tan eficiente es el sistema y, eventualmente, como información de apoyo para la solución de los problemas que pueden presentarse en la práctica de medición de caudales.

1.3. Método de medición de flujo en canales abiertos

Los métodos más utilizados para el aforo de canales abiertos son los siguientes:

- Método volumétrico
- Canal Parshall
- Vertederos

1.3.1. Método volumétrico

Este método se utiliza en el aforo de volúmenes relativamente pequeños donde es necesario un contenedor de volumen conocido para verter el agua. El caudal es resultado de dividir el volumen total de agua en el contenedor entre el tiempo que toma llenar el volumen conocido.

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

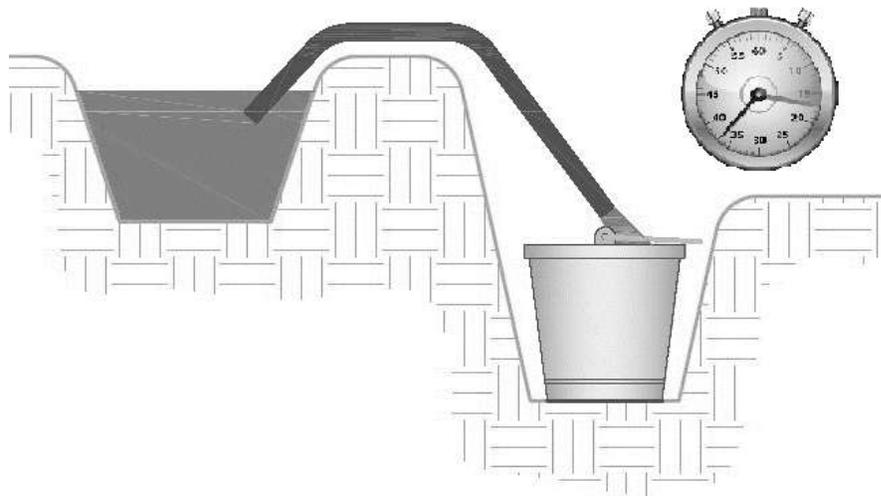
Donde:

Q = Caudal (l/s)

V = Volumen (l)

t = Tiempo (s)

Figura 1. Aforo volumétrico



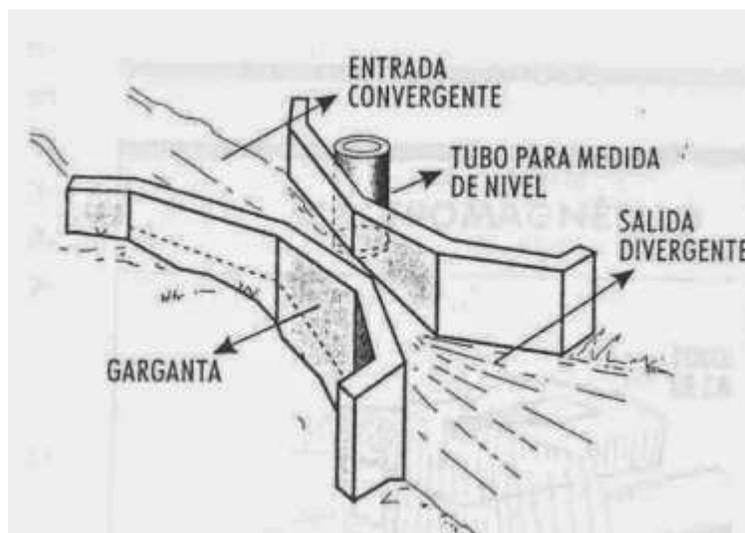
Fuente: Aforo de Canales y Tuberías. <http://galeon.com/elregante/aforo.html>. Consulta: 9 de noviembre 2017.

1.4. Canal Parshall

También llamado medidor de Parshall, es una obra hidráulica que mide la cantidad de agua que circula por una sección específica del canal. Es un medidor de régimen crítico, perfeccionado por Ralph L. Parshall, ingeniero del servicio de irrigación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

Para la construcción de este tipo de canales se utilizan diferentes materiales según sean las dimensiones del canal y la durabilidad que se requiera, se puede fabricar de fibra de vidrio o plexiglás, así como de láminas de madera o de metal. Para conseguir una mayor durabilidad se utilizan elementos de mampostería como ladrillos o bloques de concreto.

Figura 2. Canal tipo Parshall



Fuente: Eco-gestión: una visión para el futuro. <http://ecogestionvisionfutura.blogspot.com/2014/>.

Consulta: 3 de noviembre de 2017.

1.4.1. Partes de medidor Parshall

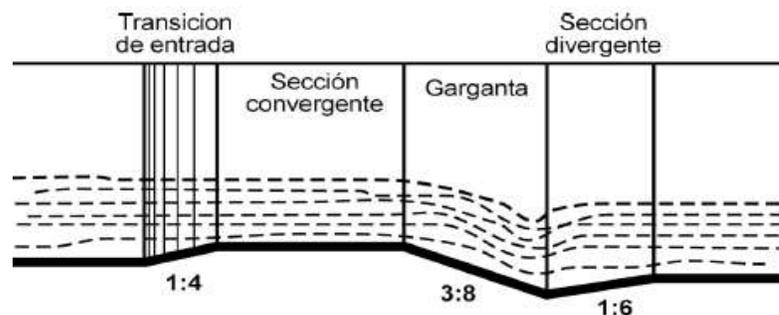
Lo componen cuatro secciones principales

- Transición de entrada
- Sección Convergente
- Garganta
- Sección Divergente

Cuando ingresa el agua al canal es preciso elevar el nivel del fondo en referencia del nivel original, con una pendiente con relación 1:4 (Horizontal: Vertical), hasta llegar a la sección de convergencia donde las paredes se van cerrando de modo que se estrecha el espacio de forma lineal o circular de radio (R). La reducción del canal obliga al agua a elevarse para descender nuevamente al nivel inicial, Ver Figura 3.

El canal tipo Parshall busca una aceleración del flujo para establecer una relación matemática entre la altura de carga alcanzada por el agua y el caudal que circula por el canal.

Figura 3. Secciones del medidor Parshall (perfil)



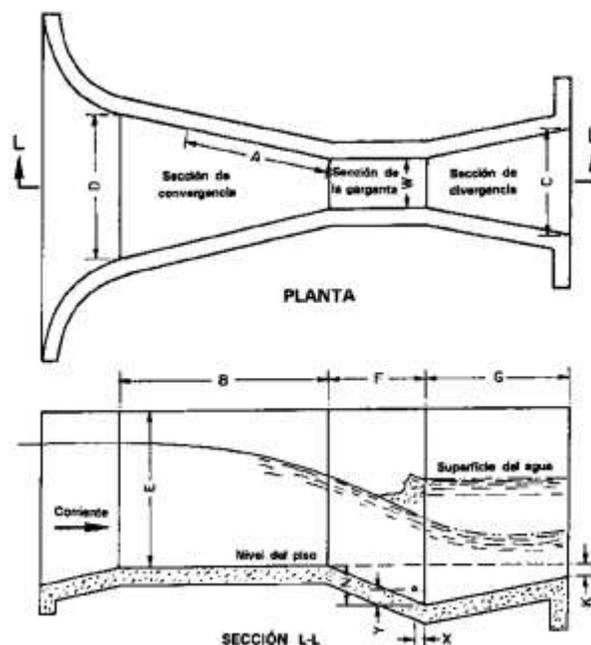
Fuente: DE AZEVEDO, J. M. y ACOSTA, Guillermo. *Manual de Hidráulica* p. 477.

La sección de convergencia mantiene un nivel horizontal, lo que varía es el ancho que se va cerrando conforme se acerca a la garganta.

En la garganta se maneja una pendiente negativa de 3:8 (Vertical: horizontal).

En la sección divergente es necesaria una pequeña pendiente positiva con relación 1:6 (Vertical: horizontal).

Figura 4. Canal tipo Parshall con las partes que lo componen



Fuente: Ing. SANDOVAL MENDOZA, Luis. *Manual de Hidráulica de canales* p.10.

1.4.2. Dimensiones del medidor Parshall

El medidor Parshall se creó con el objetivo principal de irrigar cultivos. Estos canales se utilizan en diferentes escalas, pero su objetivo es regular la descarga de agua que se distribuye.

También son utilizados para la mezcla de químicos en su caudal para lograr homogeneidad en sus componentes. Para ello se aprovecha el resalto hidráulico que en este canal ocurre. Las recomendaciones de uso para este tipo de canal son de estaciones de tratamiento, vertientes en depósitos, distribución de líneas de irrigación en el campo, etc.

Los rangos de caudales en los que el canal tipo Parshall opera de forma eficiente trabajando a descarga libre son:

Tabla I. **Rango de caudales de operación en canal Parshall**

Ancho de Garganta W		Caudal Q (l/s)	
pulg	cm	Mínimo	Máximo
3"	7,6	0,85	53,8
6"	15,2	1,52	110,4
9"	22,9	2,55	251,9
1'	30,5	3,11	455,6
1 ½'	45,7	4,25	696,2
2'	61,0	11,89	936,7
3'	91,5	17,26	1426,3
4'	122,0	36,79	1921,5
5'	152,5	62,8	2422,0
6'	183,0	74,4	2929,0
7'	213,5	115,4	3440,0
8'	244,0	130,7	3950,0
10'	305,0	200,0	5660,0

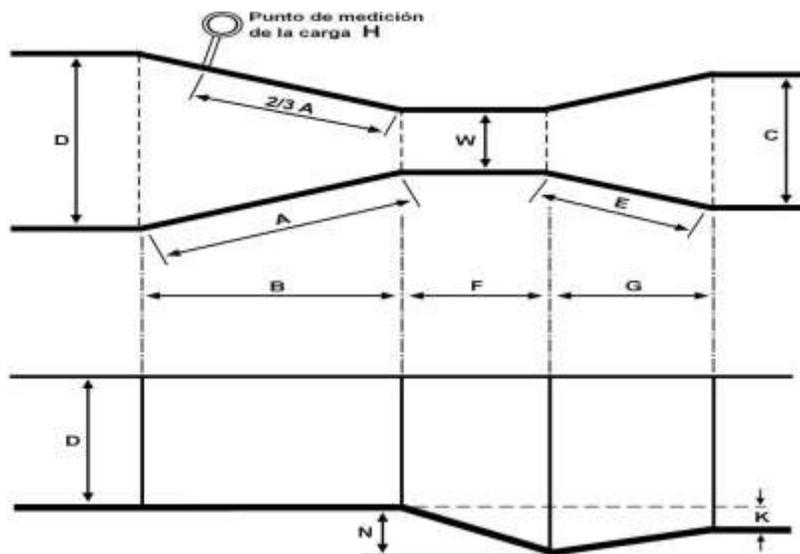
Fuente: DE AZEVEDO, J. M. y ACOSTA Guillermo. Manual de Hidráulica p. 474.

1.4.3. Punto de medición

La medida de carga **H** que se utiliza para conocer el caudal, se toma de la sección convergente.

En este punto se instala una regla medidora de altura para ver la escala, también es posible colocar una manguera que comuniqué a un nivel lateral de medición, donde se pueda observar de manera más precisa y sin movimientos turbulentos la escala de la altura.

Figura 5. Dimensiones del Medidor de Parshall



Fuente: DE AZEVEDO, J. M. y ACOSTA, Guillermo. *Manual de Hidráulica* p. 471.

1.4.4. Fórmula para el cálculo del caudal de un medidor Parshall

Según estudios experimentales y ensayos realizados en este tipo de canales se obtuvo la ecuación del caudal de tipo potencial:

$$Q = KH^N$$

Donde:

- Q = Caudal (m^3/s)
- H = Altura (m)
- N = siendo según ensayos, muy cercano $3/2$.

- K = coeficiente de descarga

Tabla II. **Valores de exponente “n” y coeficiente “k”**

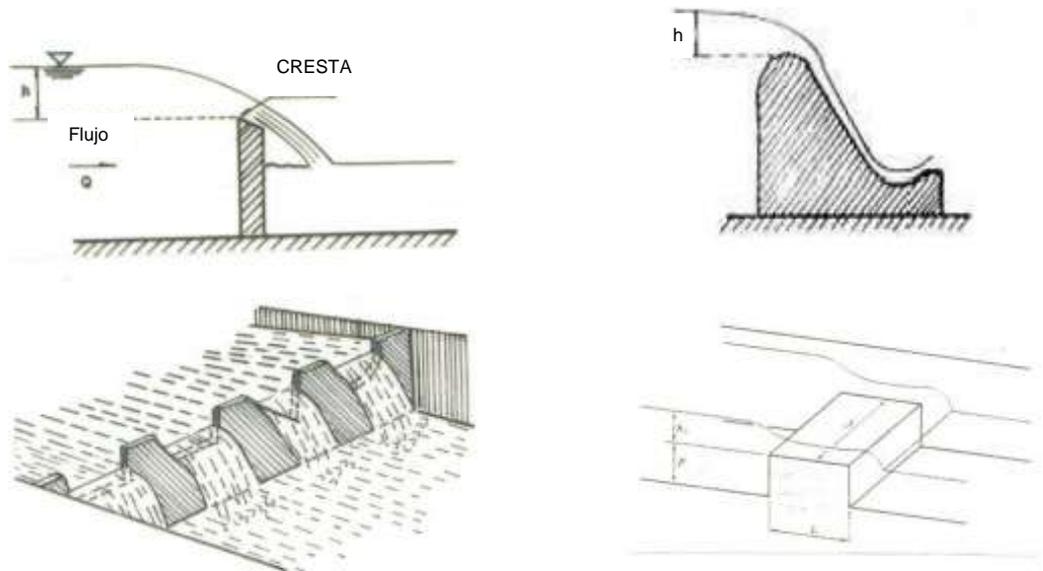
W		n	K	
S.I.	m.		unidades métricas	unidades inglesas
3"	0,076	1,547	0,176	0,992
6"	0,152	1,580	0,381	2,06
9"	0,229	1,530	0,535	3,07
1'	0,305	1,522	0,690	4,00
1 ½'	0,457	1,538	1,054	6,00
2'	0,610	1,550	1,426	8,00
3'	0,915	1,566	2,182	12,0
4'	1,220	1,578	2,935	16,00
5'	1,525	1,587	3,728	20,00
6'	1,830	1,595	4,515	24,00
7'	2,135	1,601	5,306	28,00
8'	2,440	1,606	6,101	32,00

Fuente: DE AZEVEDO, J. M. y ACOSTA, Guillermo. *Manual de Hidráulica* p. 476.

2. VERTEDEROS

Un vertedero es un dique o pared que presenta una abertura o corte de forma regular donde, a través de ella, fluye una corriente líquida. El vertedero interrumpe la corriente provocando un cambio de elevación del nivel aguas arriba, y es utilizado mayormente para control de niveles de embalses y para medir caudales. Véase figura 6.

Figura 6. **Flujo a través de vertederos**



Fuente: MARBELLO PÉREZ, Ramiro. *Manual de práctica de laboratorio de Hidráulica* p. 5.

La zona más elevada del vertedero, se denomina cresta. La altura h de la lámina de agua sobre la cresta, corresponde a la descarga, es llamada carga de vertedero.

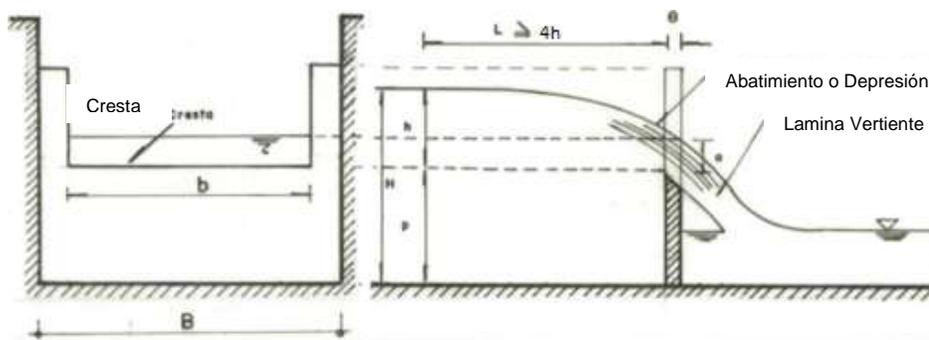
El flujo que circula por el vertedero está impulsado por la fuerza de la gravedad. Los vertederos de pared delgada con frecuencia son utilizados como aforadores porque son estructuras muy simples para su construcción. De esta manera se pueden hacer mediciones de caudal en el canal con bastante aproximación a partir de la carga del vertedor, h .

Los vertederos son muy eficientes en la medición de pequeños afluentes de agua, control del flujo en canales, no se ven afectados por materiales que floten y puedan obstruir, la duración de la estructura es relativamente larga, estas son algunas razones por la cual es de gran importancia su estudio.

2.1. Terminología relativa a los vertederos

Los términos utilizados en la descripción de los flujos a través de vertederos. Ver figura 7.

Figura 7. Terminología relativa al vertedero



Fuente: MARBELLO PÉREZ, Ramiro. *Manual de práctica de laboratorio de Hidráulica* p. 8.

Donde:

b: Longitud efectiva de la cresta del vertedero

B: Ancho del canal de acceso al vertedero

h: Carga del Vertedero. Superficie libre de agua y la cresta del vertedero

P: Altura de la cresta, tomada desde el fondo del canal

a: Lámina de agua que pasa sobre la cresta

L: Distancia mínima, aguas arriba del vertedero. En esta zona se coloca el medidor de niveles (limnómetro). $L \geq 4h$

e: espesor de la pared del vertedero.

H: Altura total de la lámina de agua, tomada desde el fondo del canal hasta la superficie libre de agua.

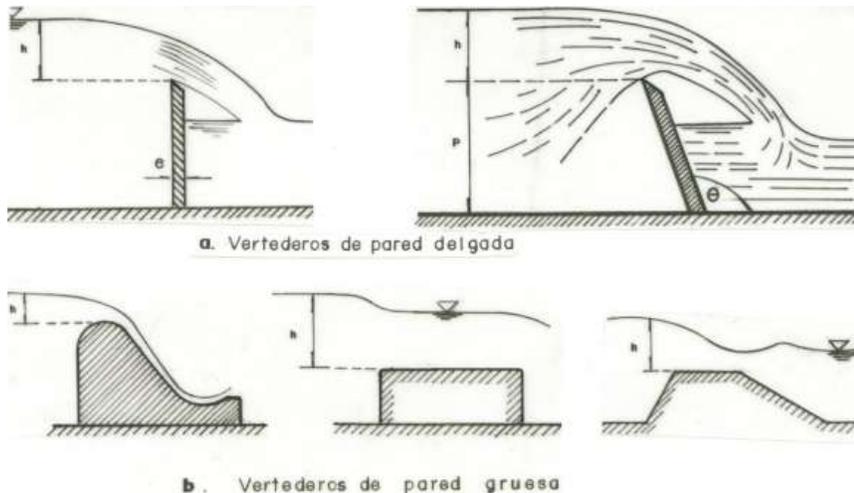
2.2. Clasificación de los vertederos

Los vertederos se clasifican según las condiciones dadas de cada uno de sus componentes.

2.2.1. Espesor de la pared

- Vertederos de pared delgada ($e/h < 0.67$)
- Vertederos de pared gruesa o de cresta ancha ($e/h \geq 0.67$)

Figura 8. **Figura 1 Tipo de Vertedero según espesor de pared**



Fuente: MARBELLO PÉREZ, Ramiro. *Manual de práctica de laboratorio de Hidráulica* p. 9.

Los vertederos de pared delgada se usan para medir caudal con gran precisión, mientras que el de pared gruesa, se utilizan en presas o estructuras hidráulicas, donde su uso principal es controlar el nivel del embalse, pero también son útiles como medidores de caudal.

2.2.2. Vertederos de pared delgada

Son vertederos de cresta delgada o aguda. Se construyen con materiales que permitan un pequeño espesor, como placas de metal o planchas de madera para que el flujo salte libre al dejar la pared delgada del vertedero.

Este tipo de vertederos debe tener un canal de amortiguación para evitar cualquier turbulencia del flujo y conseguir que el agua se estabilice de manera suave y lenta, ver Figura 8.

Las formas de vertedero de pared delgada más comunes son: Rectangulares

- Triangulares
- Circulares
- Semicirculares
- Trapezoidales

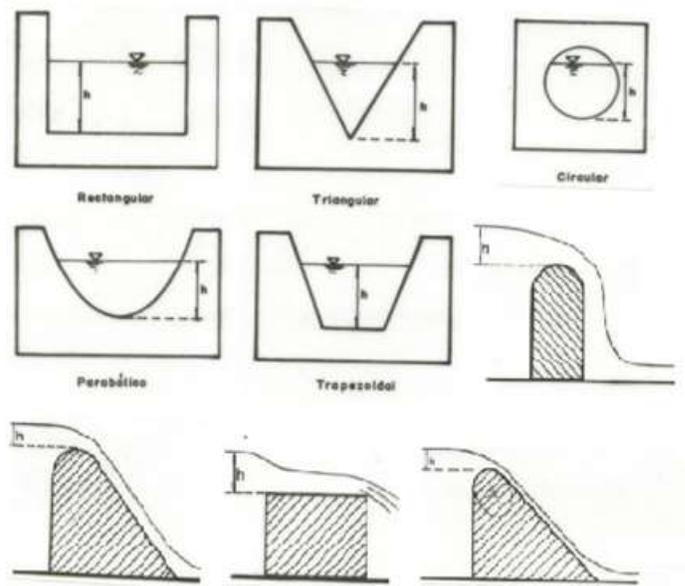
2.2.3. Vertederos de pared gruesa

El vertedero de cimacio o tipo Creager es el más importante de los vertederos de pared gruesa, ya que se ajusta al perfil de la lámina hipotética de un vertedero de pared delgada que se encuentra perfectamente ventilada, ver figura 9.

Los vertederos más conocidos de pared ancha son:

- De cresta redondeada y talud vertical
- De cresta redondeada y talud inclinado hacia aguas abajo
- De cresta elíptica y talud inclinado hacia aguas abajo
- Rectangulares de arista viva
- Vertedero de Cimacio o de Creager

Figura 9. **Diferentes formas de vertederos**



Fuente: MARBELLO PÉREZ, Ramiro. *Manual de práctica de laboratorio*

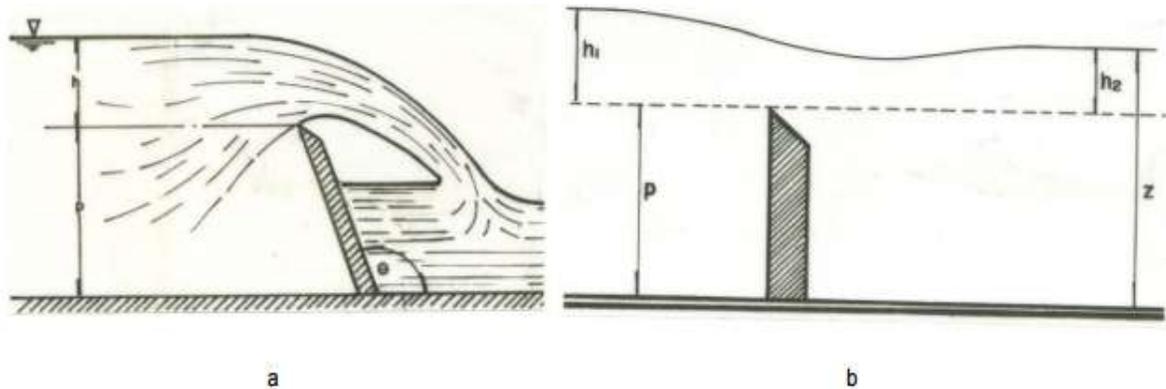
p. 11.

2.2.4. **Altura de la lámina de agua, posterior a la cresta**

Según sea el espesor de la lámina de agua abajo, véase figura 10, existen dos tipos de vertederos:

- Vertederos ahogados o sumergidos
- Vertederos de descarga libre

Figura 10. **Vertederos con lámina libre y lámina sumergida**



Fuente: MARBELLO PÉREZ, Ramiro. *Manual de práctica de laboratorio de Hidráulica* p. 12.

El vertedero se encuentra sumergido cuando el nivel de aguas abajo es superior que la cresta. Las condiciones de surgencia dependen de las condiciones del flujo. Un mismo vertedero puede ser sumergido o de descarga libre, según el caudal que fluya por él.

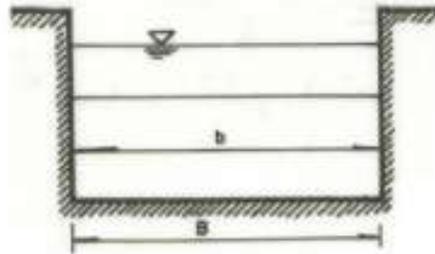
Los vertederos sumergidos se pueden observar en distintas estructuras hidráulicas igual que los de descarga libre, pero el sumergido actúa como un aliviadero, mientras que el de descarga libre es más efectivo como elemento de aforo, ver figura 10.

2.2.5. Longitud de la cresta

Según sea la longitud de la cresta del vertedero se puede clasificar de la siguiente manera:

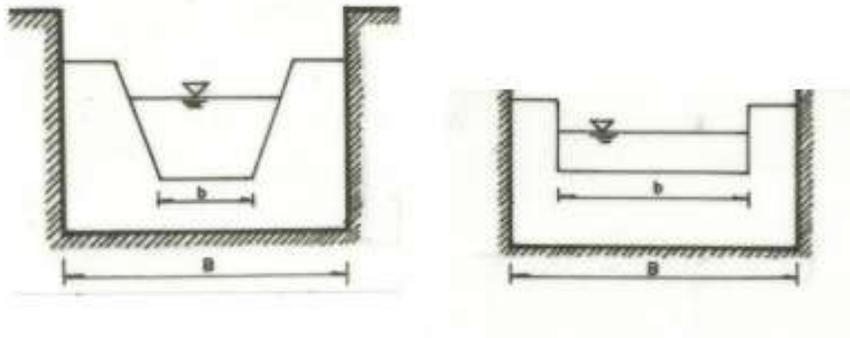
- Vertederos con contracciones laterales ($b < B$)
- Vertederos sin contracciones laterales ($b = B$)

Figura 11. **Vertedero sin contracción**



Fuente: MARBELLO PÉREZ, Ramiro. *Manual de práctica de laboratorio de Hidráulica* p. 12.

Figura 12. **Vertederos con contracciones**



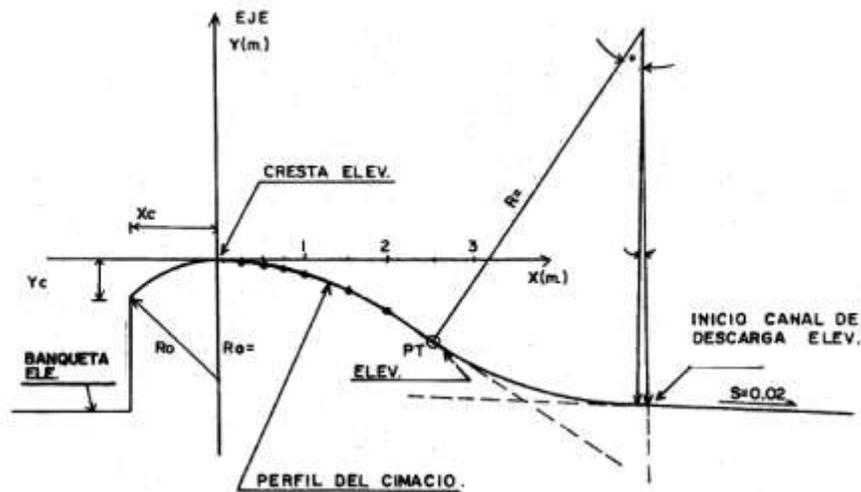
Fuente: MARBELLO PÉREZ, Ramiro. *Manual de práctica de laboratorio de Hidráulica* p. 12.

2.3. **Vertedero de cimacio o de Creager**

Creager está entre los primeros investigadores que estudiaron la forma del perfil del cimacio. El vertedero de cimacio conocido también como perfil tipo Creager se utiliza para aliviar caudales crecientes de una obra hidráulica. La forma de su cresta permite la máxima descarga comparado con otras formas de vertederos para una misma altura de carga de agua.

El vertedero de cimacio consiste en una cresta de control de pared gruesa, y el ancho de la cresta de este vertedero es igual al ancho del canal, su perfil de cresta es la forma de la lámina vertiente hipotética de un vertedero de pared delgada ventilado. De esta forma se alcanza un mejor coeficiente de descarga y mantiene la estabilidad estructural a través del peso del concreto o mampostería. Una vez que se garantiza poco cambio en el coeficiente de descarga el perfil puede variar dicha forma inicial. Habitualmente, continúa con una rápida tangente de pronunciada pendiente y relativamente reducido, que conduce a una superficie de curvatura contraria a la de la cresta del cimacio y finaliza en un canal de conducción.

Figura 13. **Perfil del cimacio**



Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Diseño Hidráulico de Estructuras* p. 100.

El cimacio constituye una “sección de control” cuya descarga puede ser libre o controlada. En el de descarga libre no se utilizan elementos adicionales para regularla, y la descarga se produce de manera libre sobre el cimacio. En los cimacios de descarga controlada pueden utilizarse diferentes tipos de

compuertas sobre la cresta, su forma en planta puede ser recta o poligonal con pilas intermedias para apoyo de las compuertas.

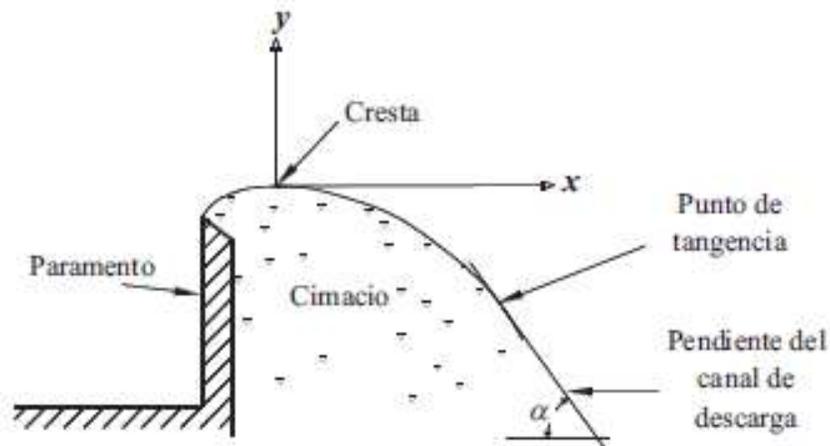
Es necesario utilizar un canal de acceso corto para dirigir el agua hasta el vertedor, generalmente horizontal, que capte el agua almacenada y la dirija hasta la cresta del cimacio con velocidad controlada, de modo que exista una distribución transversal uniforme para evitar zonas muertas y en dirección perpendicular a la cresta en cada punto.

2.3.1. Vertedero de descarga libre

Los aliviaderos no controlados o de descarga libre son los más seguros ya que es improbable que se obstruyan y como no dependen de ningún equipo, requieren menos mantenimiento y no están sometidos a eventuales errores humanos. Resultan más costoso que los aliviaderos controlados para un mismo rango de caudales porque necesitan mayores longitudes de vertido, así como obras hidráulicas más importantes.

No existen normas que establezcan criterios para seleccionar entre aliviaderos de descarga libre o aliviaderos con descarga controlada; sin embargo, los aliviaderos de descarga libre se suelen usar en cuencas vertientes reducidas, ver figura 14.

Figura 14. **Perfil de cimacio de cresta libre**



Fuente: RAYMOND, Anthony Victory. *USRB cimacio*. p. 11.

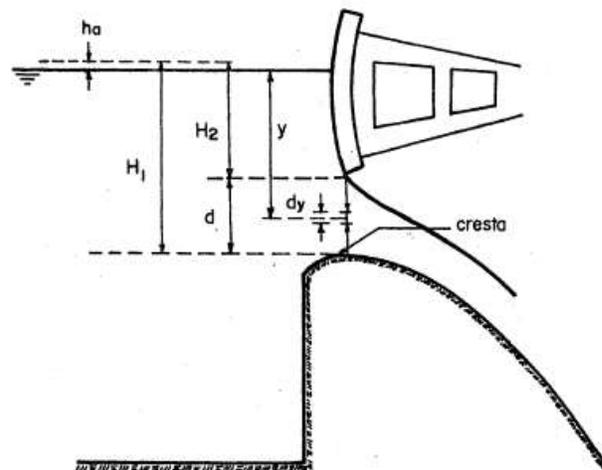
2.3.2. **Vertedero de descarga controlada**

Como lo indica su nombre la vertiente es regulada por compuertas. Una característica de este vertedor es que la cresta del cimacio no necesariamente debe coincidir con el nivel de aguas normales. Como consecuencia se originan dos tipos de vertimiento: el regulado la carga hasta el nivel de aguas normales y libre bajo la influencia de las pilas con carga hasta el nivel de aguas máximas, estas son alcanzadas una vez que todas las compuertas son izadas.

El uso de compuerta en los vertederos se justifica por la necesidad de un frente vertedor muy estrecho para evitar grandes extracciones de tierra en los hombros del aliviadero cuando están formados por grandes elevaciones, esto hace que se requieran cargas de gran tamaño sobre el vertedor para evacuar el caudal.

La selección de un aliviadero regulado por compuertas depende del análisis económico que se realiza entre los vertederos de descarga libre y los controlados por compuertas, las compuertas pueden ser radiales, cilíndricas o de tambor. Esto requiere la colocación de pilas intermedias para reducir las distancias por donde cruza el agua, ver figura 15.

Figura 15. **perfil de cimacio de cresta controlada**



Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Diseño hidráulico de estructuras* p. 545

Cuando las compuertas son radiales o cilíndricas, la descarga se realiza por debajo de ellas a través de la separación entre la parte más alta de la cresta y la parte baja de la compuerta, la abertura de la compuerta se puede graduar por lo que la altura de carga es variable. En las compuertas de tambor, las descargas se realizan por encima de ellas, realizando el control por la variación de la carga de vertido, esto es posible al graduar de arriba hacia abajo la compuerta hasta la posición requerida.

2.4. Ecuación del caudal para perfiles tipo Creager

La capacidad de descarga de un cimacio, para la condición de diseño o para cualquier otra condición de operación, está en función de la longitud efectiva de la cresta vertedora, de la carga real con la que opere, de la forma del perfil y de las dimensiones y profundidad del canal de acceso.

En el vertedero de cresta libre, la ecuación para el cálculo de la capacidad de descarga es general para los vertederos, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Q = C L_e H^{3/2} \quad (\text{ec.1})$$

Donde:

- C: Coeficiente de Descarga ($m^{1/2}/s$)
- H: Carga total de operación, tomando en cuenta carga de velocidad de llegada (m)
- Le: Longitud efectiva de cresta (m)
- Q: descarga (m^3/s)

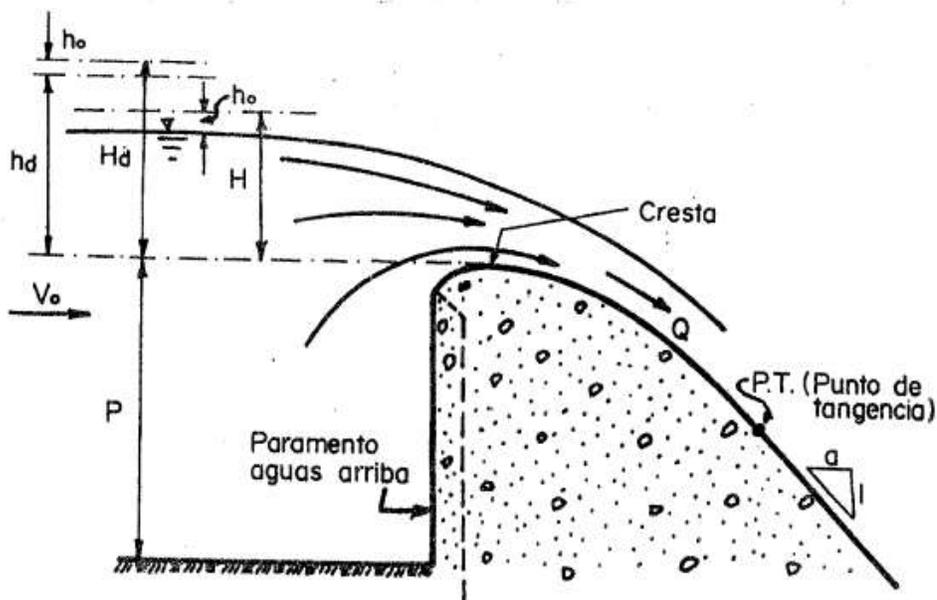
El cálculo de H se considera que: $H = h + V_o^2/2g$, donde $V_o = q/(p+h)$ es la velocidad de llegada y q gasto unitario en el canal de llegada.

2.4.1. Coeficiente de descarga

El coeficiente C de la ecuación 1 está en función de la carga H con que opera el vertedor en un momento dado, de la carga Hd elegida para diseñar el perfil del cimacio, de la altura del canal de acceso, del talud de la cara aguas arriba. La interacción de C con todos estos elementos ha sido recolectada únicamente de manera experimental.

Es adecuado elegir una carga de diseño que sea menor que la máxima capacidad de operación del cimacio, para así obtener condiciones de operación más favorables cuando la carga máxima se presente, existe una limitación de presión negativa máxima que puede llegar a tolerar la espalda del cimacio. El coeficiente de descarga varia con la relación P/Hd y con la inclinación del talud del paramento.

Figura 16. **Vertido libre sobre un cimacio**



Fuente: Sotelo Ávila, Gilberto. *Diseño hidráulico de estructuras* p. 515.

2.4.2. Longitud efectiva de la cresta

La longitud neta de la cresta vertedora es reducida por las contracciones que experimenta el flujo, esto se debe a la presencia de estribos y pilas sobre el cimacio. Los estribos son muros laterales verticales utilizados para confinar el flujo; las pilas intermedias se utilizan con la necesidad de construir un puente

sobre el vertedero y con frecuencia se instalan compuertas para controlar la descarga.

La longitud resultante tomando en cuenta dichos efectos es llamada longitud efectiva, la cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$Le = L - 2 (Ka + N Kp)H \quad (\text{ec.2})$$

Donde:

H: Carga total de operación (m)

Ka: Coeficiente de contracción por efectos de estribos

Kp: Coeficiente de contracción por efectos de pilas

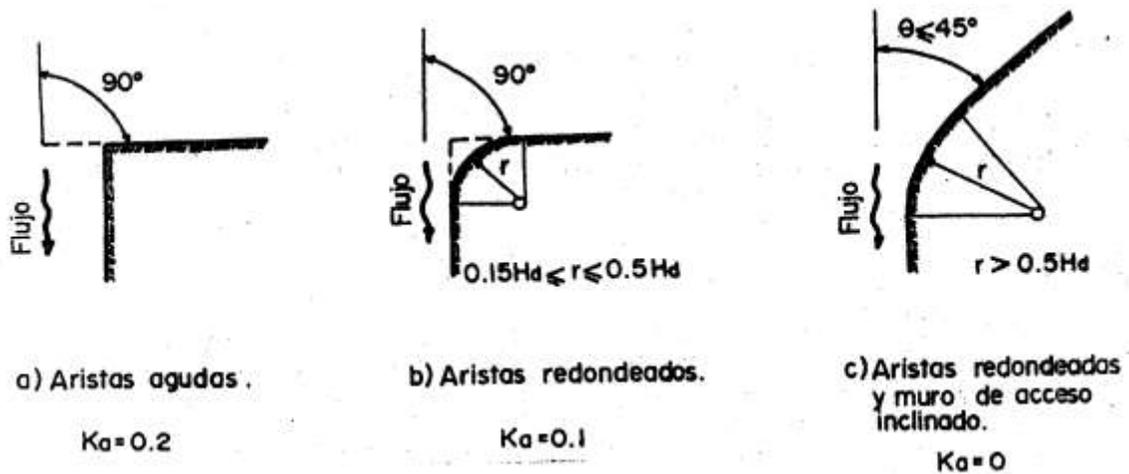
L: Longitud total neta de cresta (m)

Le: Longitud efectiva de cresta (m)

N: Numero de pilas Colocadas sobre el Cimacio

El coeficiente de contracción por estribos se ve afectado por la forma del estribo, dependiendo del ángulo que forma el muro de acceso aguas arriba con la dirección del flujo, por la relación entre carga de operación, carga de diseño y por la magnitud de la velocidad de llegada, ver figura 17.

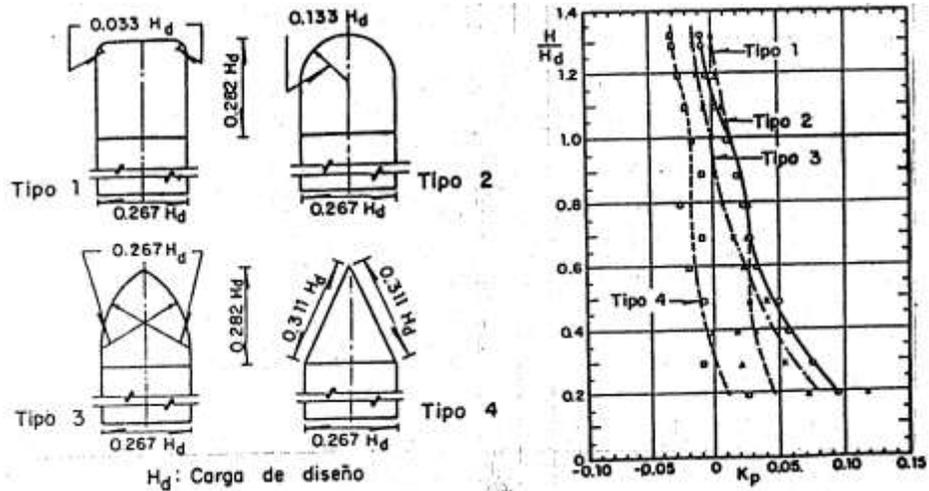
Figura 17. **Coeficiente de contracción en estribos, según U.S. Bureau of Reclamation.**



Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Diseño hidráulico de estructuras* p. 522.

Los valores de K_p se obtienen de la relación H/H_d . Cuando disminuye la profundidad del canal de acceso, la velocidad de llegada puede provocar socavamiento. En ausencia de datos, para la velocidad de llegada en las pilas, pueden usarse:

Figura 18. **Coeficiente de contracción por pilas de formas diferentes, con el tajamar coincidiendo con el plano vertical del paramento aguas arriba del cimacio y velocidad de llegada despreciable.**



Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Diseño Hidráulico de Estructuras* p. 524

2.5. Método de diseño por el USBR para perfil del cimacio

La forma del cimacio depende directamente de la carga y la inclinación del paramento. Los criterios más usados para el diseño de este tipo de cimacios son: El *US Bureau of Reclamation (USBR)* y el de *Waterways Experiment Station (WES)*.

Para cualquiera de los dos métodos el cimacio se diseña en dos secciones delimitadas por la cresta vertedora; aguas abajo y aguas arriba de la cresta. En el diseño del perfil del cimacio se utilizan el plano de coordenadas x y y sobre la cresta, como en la figura 13.

El perfil del vertedero aguas debajo de la cresta se define de acuerdo a la ecuación

$$y = -kHo \left(\frac{x}{Ho}\right)^n \quad \text{(ec.3)}$$

Donde:

- (k) y (n) son constantes cuyos valores varían dependiendo el criterio, y son adimensionales.
- (x) y (y) coordenadas del perfil con respecto al sistema de ejes mencionado en (m).

El origen del perfil del cimacio inicia en la parte más alta de la cresta hasta un punto donde se une con el canal de descarga, en la coordenada donde el perfil abandona la curvatura del cimacio y adopta una pendiente constante es el punto de tangencia. El único punto donde la pendiente es tangente a la curvatura del perfil del cimacio se le llama punto de tangencia, su ubicación depende de las condiciones aguas abajo de la cresta. Este punto es producto de la necesidad de terminar la parte curva aguas abajo para unirla con la pendiente que requiera el diseño. El ángulo de inclinación α respecto a un plano horizontal afecta la ubicación del punto de tangencia.

El rango de x para la ecuación aguas abajo es:

$$0 \leq x \leq x_t$$

Donde x_t es la coordenada horizontal del punto de tangencia y la cual se encuentra derivando e igualando la pendiente de la ecuación 3:

$$x_t = \frac{Ho}{\left[k\left(\frac{1}{\tan\alpha}\right)n\right]^{\frac{1}{n-1}}} \quad \text{(ec.4)}$$

yt se obtiene al sustituir los valores de x_t en la ec.3 que define el perfil del cimacio.

2.6. Método semigráfico

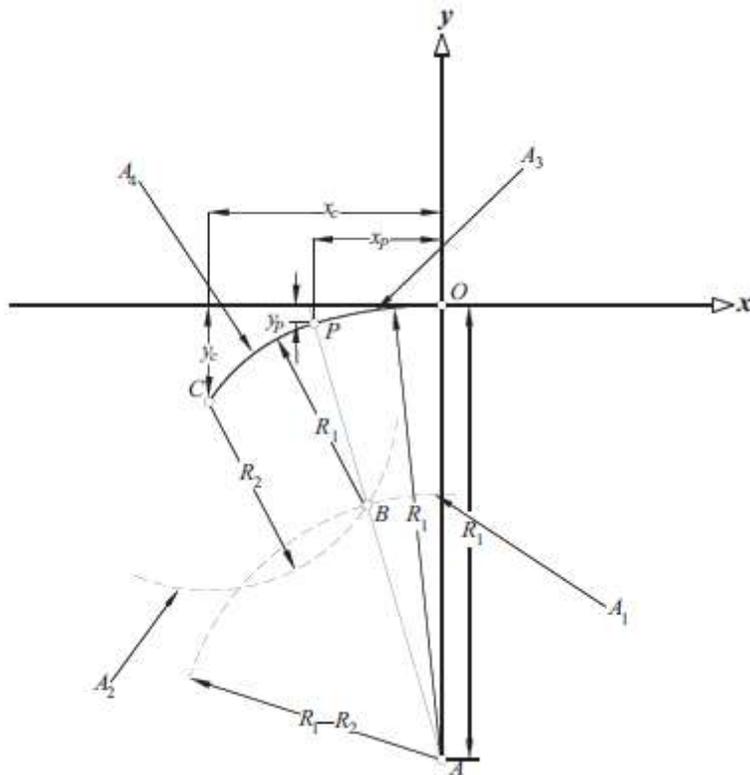
El perfil del cimacio aguas arriba de la cresta se puede obtener mediante el método semigráfico que consiste en dos curvas tangentes entre sí, así como tangentes a la cresta del perfil del cimacio. Para la aplicación de este método se siguen estos pasos:

- Trazos previos
 - Localizar el centro A de la curvatura del primer círculo $A(0, -R_1)$
 - Trazar un arco A_1 de radio $R = R_1 - R_2$ con el centro en A
 - Calcular el punto C de las coordenadas $C(x_c, y_c)$
 - Trazar un arco A_2 de radio R_2 con el centro ubicado en C
 - Ubicar el punto B que se encuentra en la intersección de los arcos A_1 y A_2 , estos arcos están dentro de los puntos $OCAr$
 - Se traza una línea del punto A al punto B extendiéndola hasta el eje x (línea AB), ver Figura 19.

- Trazos finales
 - Se traza una sección de círculo A_3 de Radio R_1 ubicando su centro en A , iniciando a trazar desde el origen O hasta el trazo de la línea AB .
 - Se traza una sección circular A_4 con un radio R_2 localizando el centro en B , se traza desde la línea AB hasta el punto C .

El punto de tangencia de las dos curvas A_3 y A_4 se denomina P y es por donde pasa la línea trazada AB .

Figura 19. **Método semigráfico**



Fuente: RAYMOND, Anthony Victory. *Perfil de un cimacio de cresta libre*. p. 13

Las variables R_1, R_2, x_c y y_c del método semigráfico son dependientes de la relación carga de velocidad sobre carga total $\left(\frac{h_a}{H_o}\right)$, ver figura 22.

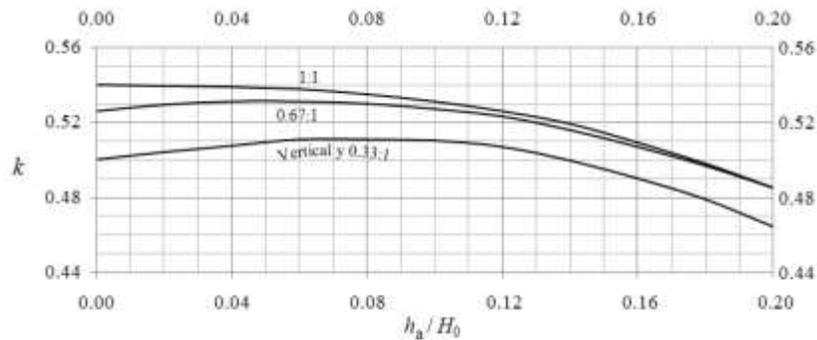
2.7. Criterios de diseño del US Bureau of Reclamation, USBR

Los ingenieros del USBR evaluaron los cimacios en varias investigaciones y después de analizar los datos recopilados y resultados experimentales, mostraron los resultados para obtener las variables necesarias para diseñar el cimacio con gráficas adimensionales. Estas gráficas dependen directamente de

la carga de velocidad h_a , de la carga de diseño H_o y del ángulo de inclinación α del paramento.

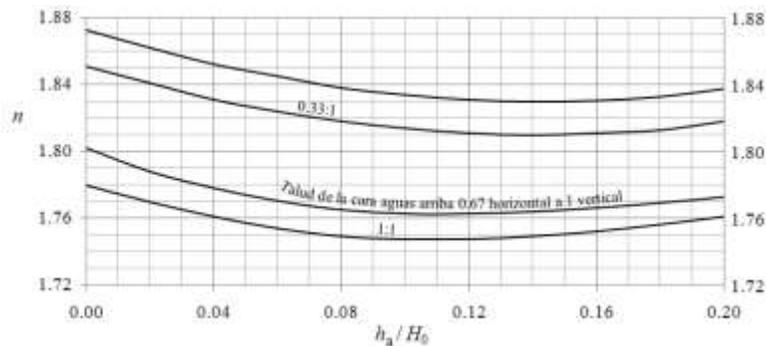
Es posible interpolar los valores adimensionales k y n necesarios para el diseño del perfil del cimacio aguas abajo de la cresta con los gráficos de las figuras 20 y 21, mientras que las variables utilizadas en el trazo aguas arriba de la cresta con el método semigráfico se obtienen de la figura 23.

Figura 20. **Valor de k para el diseño del perfil**



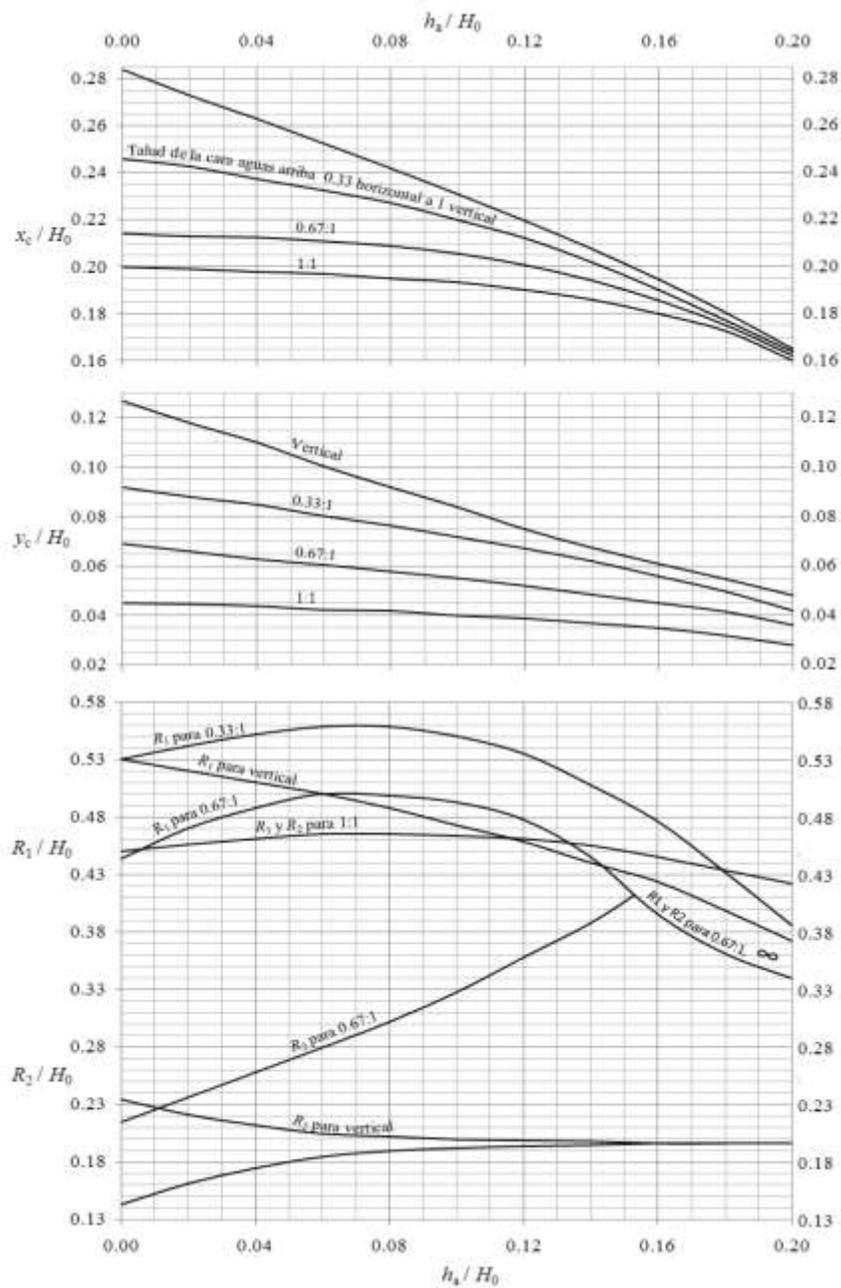
Fuente: RAYMOND, Anthony Victory. *Perfil de un cimacio de cresta libre*. p. 17

Figura 21. **Valor de n para el diseño del perfil**



Fuente: RAYMOND, Anthony Victory. *Perfil de un cimacio de cresta libre*. p. 17

Figura 22. Gráficos de relaciones $\frac{x_c}{H_0}$, $\frac{y_c}{H_0}$, $\frac{R_1}{H_0}$, $\frac{R_2}{H_0}$ en función de la relación de cargas de velocidad sobre carga total, de acuerdo con el criterio tipo USBR.



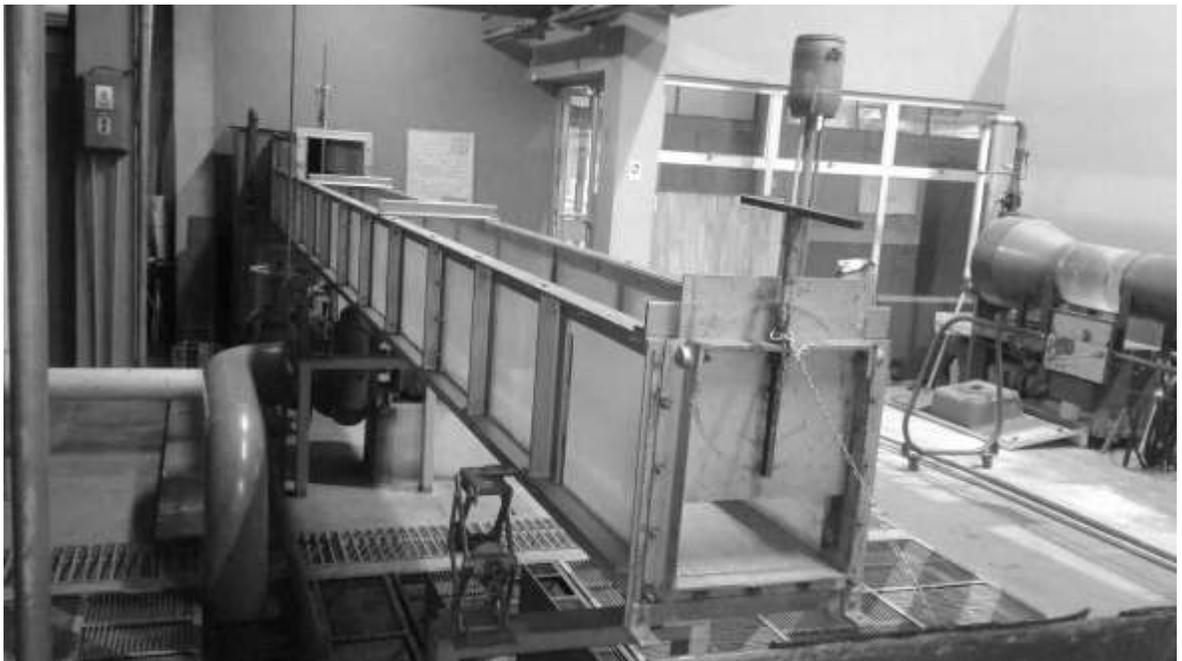
Fuente: RAYMOND, Anthony Victory. *Perfil de un cimacio de cresta libre*. p. 18.

3. ENSAYOS DE LABORATORIO CON VERTEDEROS DE PARED GRUESA TIPO CREAGER

3.1. Diseño y construcción de cimacio tipo Creager como medidor de caudales

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de hidráulica de la Facultad de Ingeniería. Este laboratorio cuenta con un canal hidrodinámico en el cual el caudal es suministrado por un sistema de bombeo que permite distintos valores de flujo.

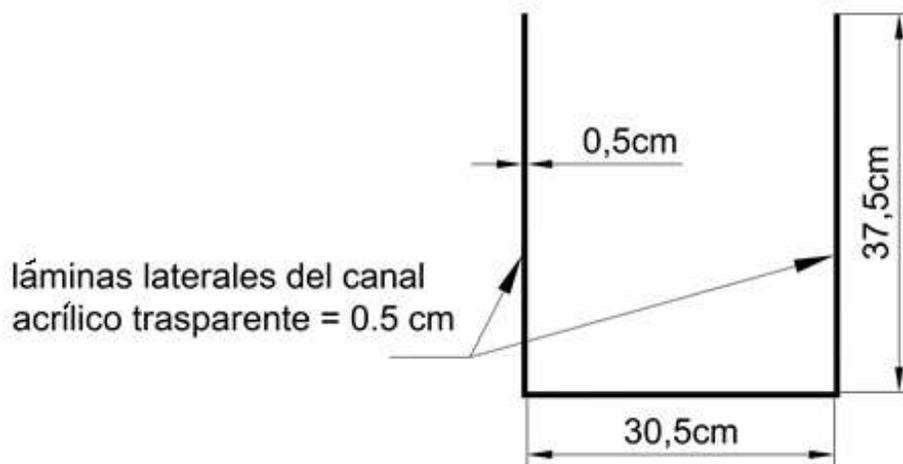
Figura 23. **Canal hidrodinámico del laboratorio de hidráulica**



Fuente: elaboración propia.

El canal Hidrodinámico está fabricado de láminas de acrílico transparente, cada lamina de acrílico tiene un espesor de 10 mm, reforzado en las uniones de cada lamina con una estructura de acero. Las dimensiones del canal se presentan en la figura 23.

Figura 24. **Sección del canal**

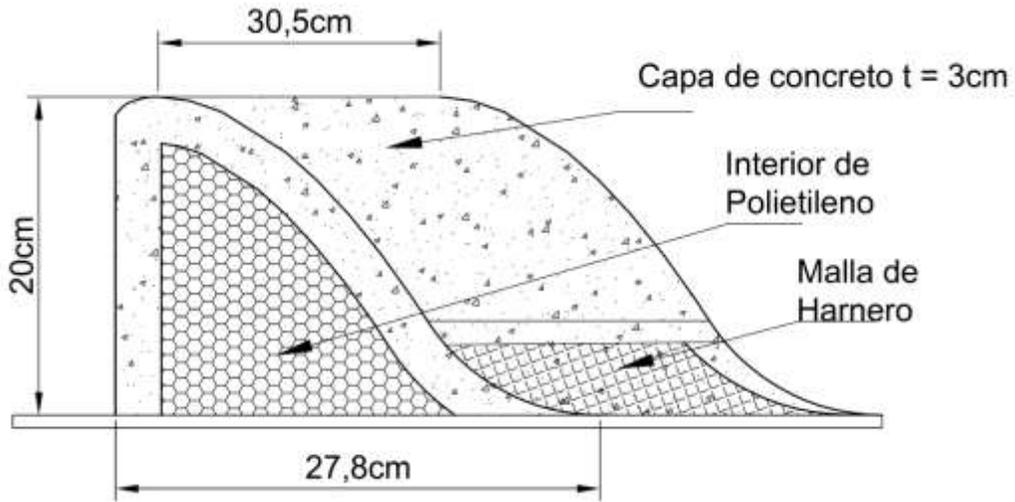


Fuente: elaboración propia.

3.2. **Vertedero tipo Creager para un caudal de 20 L/s**

La curvatura del cimacio fue diseñada con el Método del U.S. BUREAU OF RECLAMATION para un caudal promedio de 20 L/s. El modelo fue fabricado con planchas de polietileno en su centro para disminuir el peso de la pieza terminada, ya que fue fundida en concreto. Posteriormente, se le fundió una mezcla de cemento y arena, a una proporción 1:1 y arena fina pasada por el tamiz 60. Esta mezcla fue asegurada con una malla de harnero. Como se muestra en la Figura 25.

Figura 25. **Dimensiones de vertedero tipo Creager de 20 L/s**



Fuente: elaboración propia.

Seguido de la fundición del elemento y el tiempo de espera adecuado para el secado y curado del concreto, se aplicaron varias capas de impermeabilizante color rojo para evitar la erosión del concreto. De esta forma se protege y mantiene la curvatura del cimacio. En las caras laterales del cimacio, así como en el la base se colocó una capa de fomi (etilvinilacetato) para evitar rallar o dañar el canal con el cimacio.

3.2.1. Diseño de curvatura de vertedero tipo Creager para 20L/s por el método de U.S. Bureau of reclamation

El perfil de estas estructuras corresponde a la forma de la vena líquida inferior de la descarga de un vertedor de pared delgada ventilado. Este análisis se diseñó para un caudal máximo de 20 L/s. Para el diseño del vertedero tipo Creager se necesitaron parámetros constantes:

- Q = Caudal (m³/s)
- L = ancho de canal (m)
- P = Altura de paramento o cresta (m)

Por ello, se analizó únicamente la formula general de vertedores, con estas características constantes:

$$Q = CLH^{3/2} \quad \text{(ec.1)}$$

En donde:

- Q = Caudal del vertedor en m³/s
- C = Coeficiente de descarga
- L = Longitud efectiva de la cresta en metros
- H = Carga sobre el Vertedor en metros

3.2.2. Coeficiente de descarga (C)

Según el Bureau of reclamation de E.U.A. observando los vertederos de pared delgada, se ha trazado la gráfica que muestra la figura 26, la cual es necesaria para determinar el coeficiente de descarga "C", según la relación P/Ho, donde:

- P = Profundidad de llegada
- Ho = Carga total del vertedero

Y,

$$Ho = hd + ha \quad \text{(ec.5)}$$

Donde:

- hd = Carga de diseño del vertedor
- ha = carga debida a la velocidad de llegada ($Va^2/2g$)

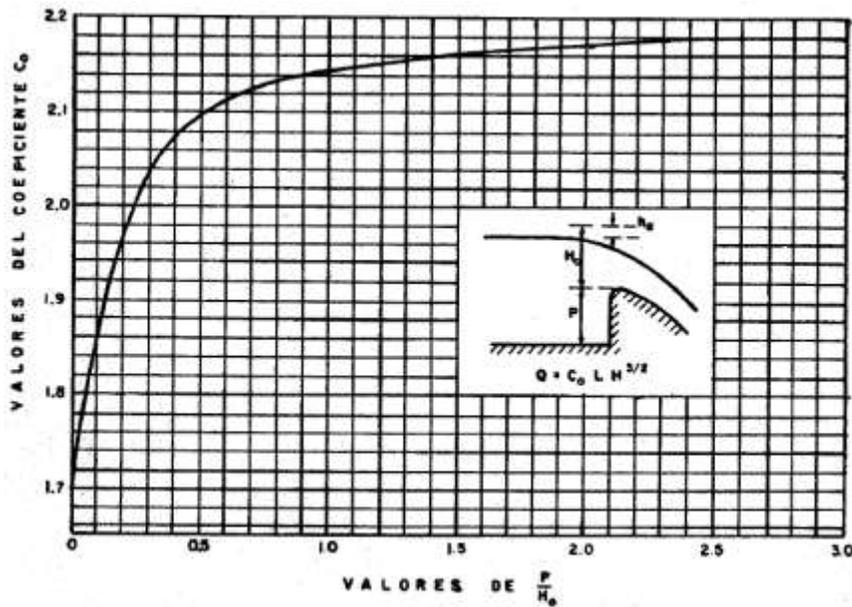
Para esta investigación se seleccionó una altura de llegada “P” de 0,20 metros y se consideró despreciable la velocidad de llegada, por lo que $H_o = 0,095$ metros (según venida máxima regularizada), de donde:

$$\frac{P}{H_o} = \frac{0.2m}{0.095m} = 2.10$$

Con el valor anterior, se busca en el gráfico de la figura 26.

$$C = 2.16$$

Figura 26. **Determinación del coeficiente de gasto C en función de P y H_o .**



Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Diseño hidráulico de estructuras* p. 516.

Tomando el valor de $P/H_o = 2,10$ a la gráfica se obtiene un $C = 2,16$, el cual es un valor muy próximo a $C = 2,0$ valor comúnmente adoptado para cimacios con perfil tipo Creager.

3.2.3. Geometría del perfil de un cimacio de cresta libre

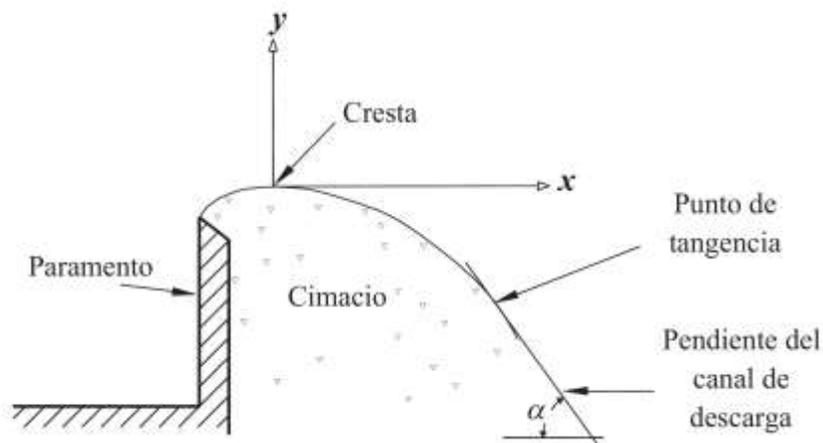
La geometría aguas abajo de la cresta del cimacio se obtiene a través de la siguiente ecuación que describe la curvatura del agua de acuerdo con ensayos experimentales.

$$y = -kH_o \left(\frac{x}{H_o} \right)^n \quad (\text{ec.3})$$

Donde:

- k y n = coeficientes experimentales que dependen del talud del paramento aguas arriba y de la profundidad del canal.
- x y y = Coordenadas del perfil de acuerdo con el sistema cartesiano mostrado en la figura 27.

Figura 27. Ejes coordenados



Fuente: RAYMOND, Anthony Victory. *Perfil de un cimacio de cresta libre*. p. 11.

El U.S.B.R. recomienda los valores de n y k , en función de la relación carga de velocidad de llegada y carga de diseño (h_a/h_d) y del talud del paramento aguas arriba del cimacio.

El U.S.B.R. considera que el perfil en la zona aguas arriba de la cresta se forma con dos arcos de círculos tangentes, cuyos radios y restantes geométricos se pueden obtener de la figura 29.

Para poder obtener los valores de k y n se utiliza la figura 28. Para interpolar los datos de k y n primero es necesario calcular la carga de velocidad de llegada, con las ecuaciones siguientes:

$$h_a = \frac{Q^2}{2g((P+H_o)*b)^2} \quad \text{(ec.6)}$$

$$H_o = h_e + h_a \quad \text{(ec.7)}$$

Sabiendo que $P = 0,2$ metros, $Q = 0,02$ metros cúbicos por segundo, $b = 0,305$ metros y un $H_o = 0,09738$ metros, resolviendo el sistema de ecuaciones:

$$h_a = 0,002478m = 0,25cm$$

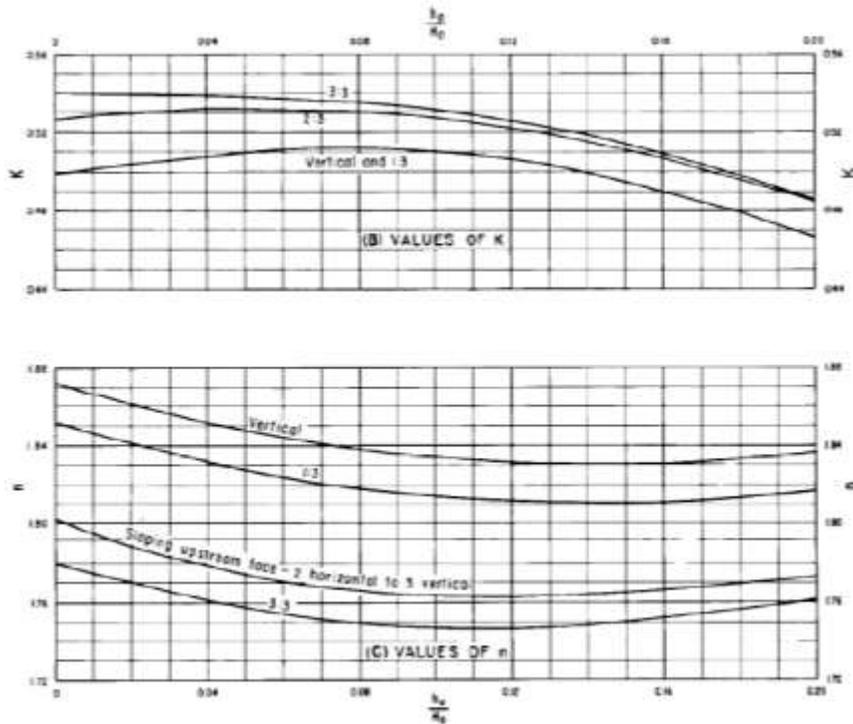
$$h_e = 0,09490m = 9,49cm$$

con los resultados anteriores se calcula la relación h_a/h_e

$$\frac{h_a}{h_e} = \frac{0,002478m}{0,0949m} = 0,026$$

Con el valor de la relación h_a/h_e y teniendo en cuenta que el talud del vertedero es vertical se utiliza la figura 28. Para obtener los valores de k y n .

Figura 28. Factores k y n para el diseño del perfil de un cimacio de cualquier inclinación, U.S. Bureau of Reclamation



Fuente: RAYMOND Anthony Victory. *Perfil de un cimacio de cresta libre*. p. 17.

Interpolando en las gráficas anteriores se obtuvieron los valores siguientes:

$$k = 0,506$$

$$n = 1,859$$

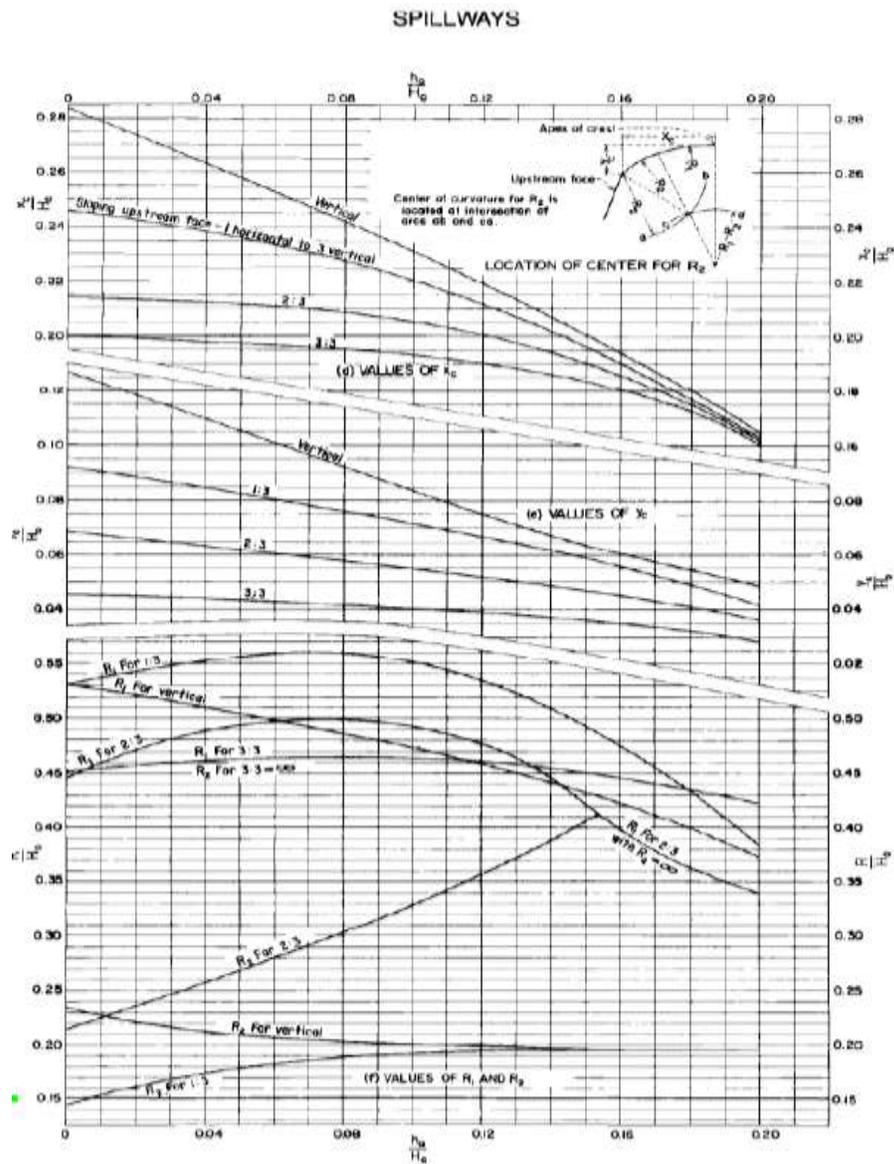
Sustituyendo los valores de n y k en la ecuación (ec.3) se puede conocer la fórmula que describe la forma del vertedero tipo Creager en el cuadrante aguas abajo:

$$\frac{Y}{0,0949} = -0,506 \left(\frac{X}{0,0949} \right)^{1,859}$$

$$Y = -3,82552X^{1,859}$$

Los valores que modelan la curvatura del cuadrante aguas arriba de la cresta, se obtienen con la relación h_a/h_e y de la Figura 29.

Figura 29. Valores X_c/H_d , Y_c/H_d y R/H_d para el diseño del perfil del cimacio aguas arriba de cualquier inclinación, U.S. Bureau of Reclamation



Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Diseño Hidráulico de Estructuras* pág. 528.

De la anterior figura se obtienen los valores siguientes:

$$X_c = -0,027m$$

$$Y_c = -0,012m$$

$$R_1 = 0,047m$$

$$R_2 = 0,019m$$

Con los datos obtenidos de X_c , Y_c , R_1 y R_2 es posible aplicar el método semigráfico del capítulo 2. Perfil de un cimacio de cresta libre del U.S.R.B. como muestra la Figura 30.

Figura 30. **Método Semigráfico, US Bureau of Reclamation**

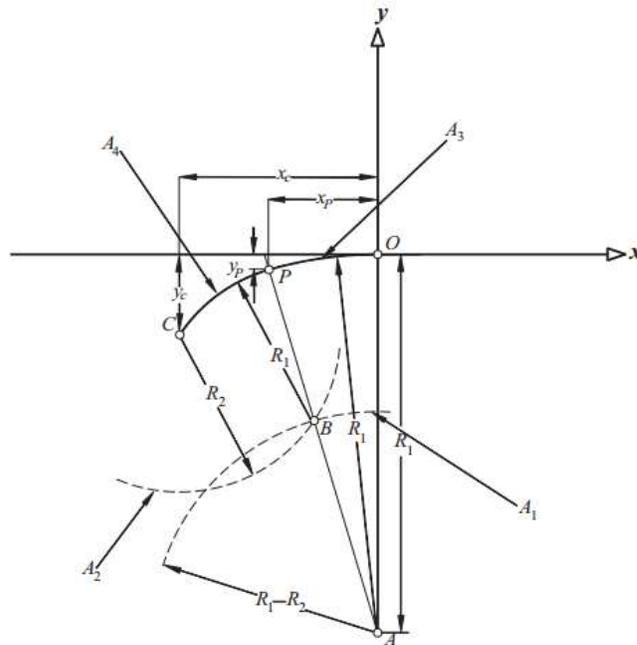


Figura 2.3: Método semigráfico

Fuente: RAYMOND, Anthony Victory. *Perfil de un cimacio de cresta libre*. pág. 13.

Se define el punto de tangencia (PT), que es el punto donde cambia la concavidad de la curvatura, y la pendiente que define al cimacio paralela a este punto. Para encontrar las coordenadas del punto de tangencia (PT), se propuso un $X_t = 0.169m$, sustituyendo en la ecuación de curvatura del cimacio aguas abajo:

$$Y = -3,82552(0,169)^{1,859}$$

$$Y = -0,14m$$

$$PT = (0,169, -0,14)$$

Conociendo el punto de inicio y el punto final de curvatura es posible obtener el perfil del cimacio. En la tabla III se presentan los valores entre estos dos puntos, definidos por la ecuación.

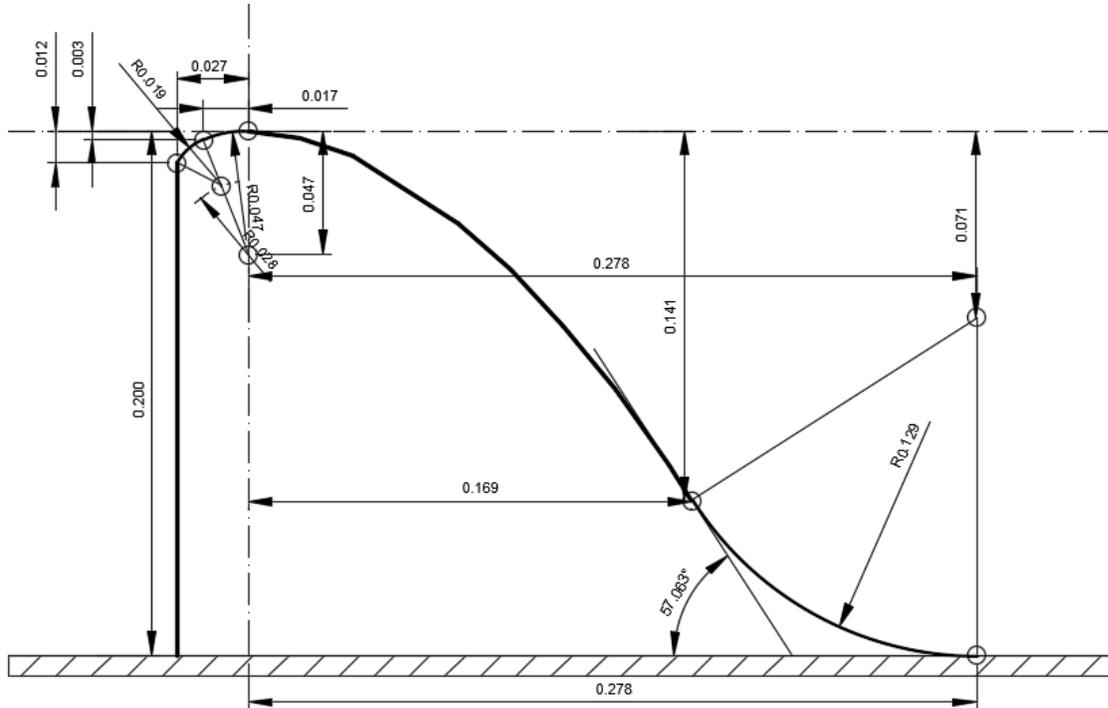
Tabla III. **Coordenadas de perfil de Cimacio de 20 L/s**

PUNTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X(m)	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2
Y(m)	0	-0,003	-0,01	-0,02	-0,035	-0,053	-0,074	-0,099	-0,127	-0,159	-0,192

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar que la distancia en el eje horizontal necesaria para cubrir los 0,2 metros la altura del cimacio es aproximadamente 0,21 metros. Integrando todos los resultados calculados se pudo definir la curvatura del cimacio que se muestra en la figura 30.

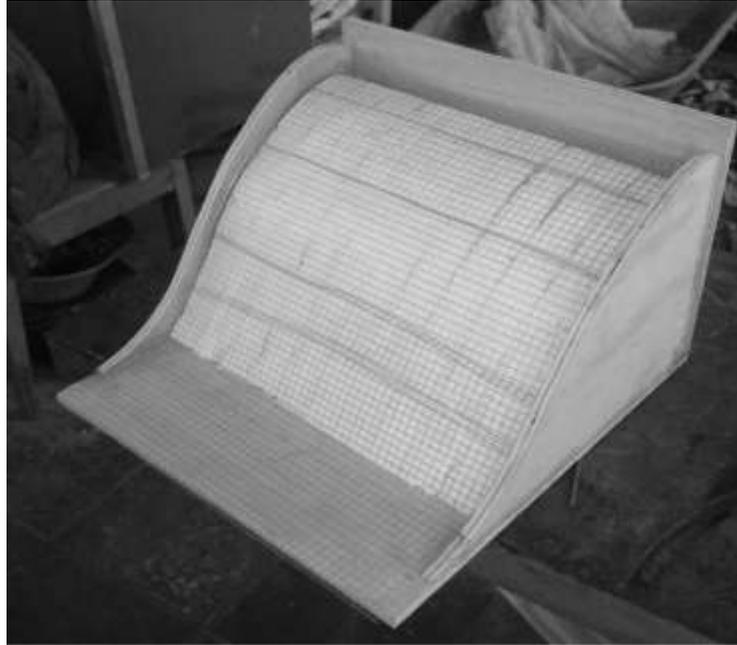
Figura 31. Método semigráfico, US Bureau of Reclamation



Fuente: elaboración propia.

Al construir el cimacio con las dimensiones anteriormente calculadas y siguiendo la curvatura de la figura 31 se utilizó polietileno en la parte interior del modelo y la parte externa se utilizó concreto reforzado con malla de harnero, el espesor del concreto es aproximadamente de 3 cm. El molde o formaleta donde fue fundido el elemento está compuesto de planchas de madera contrachapado como se puede observar en la Figura 32 y 33.

Figura 32. **Formaleta perfil de vertedero tipo Creager**



Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Modelo de Cimacio de 20 L/s**



Fuente: elaboración propia.

Para proteger la superficie del cimacio y para evitar la erosión del concreto por el flujo que pasa sobre el mismo, se aplicó una capa de impermeabilizante resistente al agua, también se colocó una capa de espuma de hule en las caras que están en contacto con las paredes del canal.

Figura 34. **Perfil del vertedero tipo Creager terminado**



Fuente: elaboración propia.

3.3. Vertedero tipo Creager para un caudal de 15 L/s

Se siguió el mismo procedimiento que el cimacio anterior (inciso 3.2)

3.3.1. Coeficiente de descarga (C)

$$\frac{P}{H_o} = \frac{0,2m}{0,0787m} = 2,54$$

$$C = 2,16$$

3.3.2. Geometría del perfil de un cimacio de cresta libre

$$ha = 0,0015697m = 0,16cm$$

$$he = 0,07868m = 7,87cm$$

con estos valores es posible hacer la relación ha/he

$$\frac{ha}{he} = \frac{0,0015697m}{0,07868m} = 0,02$$

Los valores obtenidos de la figura 28, fueron los siguientes:

$$k = 0,505$$

$$n = 1,861$$

sustituyendo los valores en la ecuación **(ec.3)**, aguas abajo de la cresta tenemos que:

$$\frac{Y}{0,0787} = -0.505 \left(\frac{X}{0,0787} \right)^{1,861}$$

Despejando:

$$Y = -4,50668X^{1,861}$$

Los datos para la geometría aguas arriba de la cresta son los siguientes y corresponden al valor de la relación $ha/he = 0,02$ y se encontraron en el gráfico de la figura 29.

$$X_c = -0,022m$$

$$Y_c = -0,009m$$

$$R_1 = 0,039m$$

$$R_2 = 0,016m$$

Con los datos encontrados de X_c , Y_c , R_1 y R_2 se aplicó el método semigráfico del U.S.R.B., como se ilustra en la Figura 30.

El punto de tangencia (PT), se define con las coordenadas propuestas de $X_t = 0,16 \text{ m}$, y con la ecuación tenemos:

$$Y = -4,50668(0,16)^{1,861}$$

$$Y = -0,148 \text{ m}$$

$$PT = (0,16, -0,148)$$

Con la ecuación de la curva del vertedero $y = -kHo \left(\frac{x}{Ho}\right)^n$ se define el perfil del cimacio. En la siguiente tabla se observa el comportamiento de la ecuación.

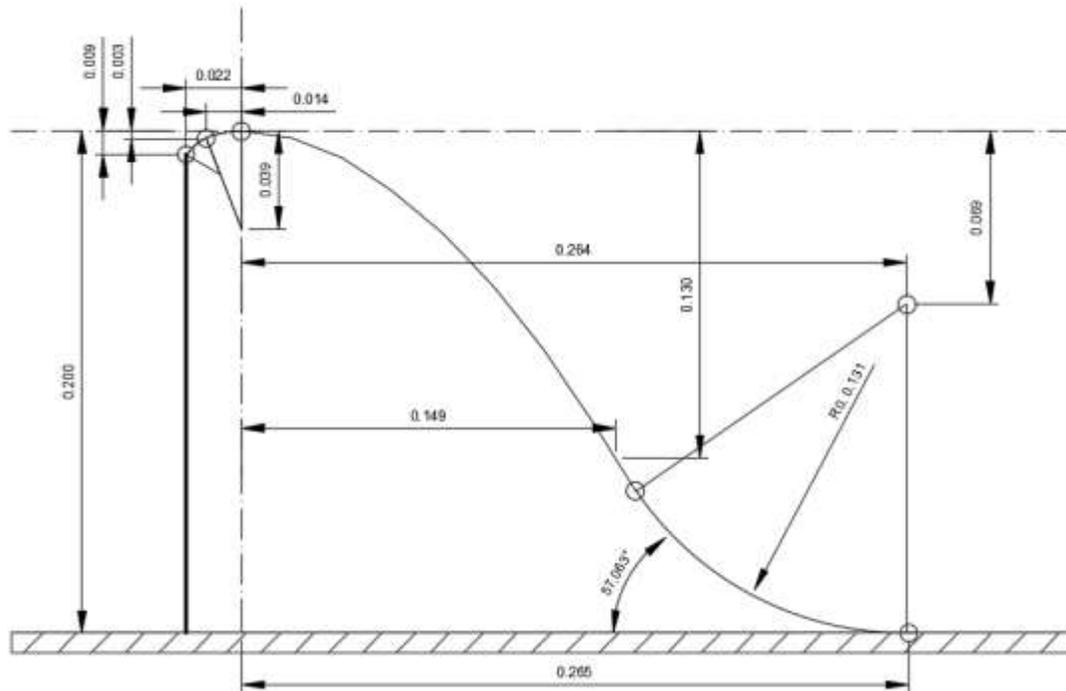
Tabla IV. **Coordenadas de perfil de Cimacio de 15 L/s**

PUNTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X(m)	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,19
Y(m)	0	-0,003	-0,011	-0,024	-0,041	-0,062	-0,087	-0,116	-0,149	-0,185	-0,201

Fuente: elaboración propia.

Es necesario recorrer 0,19 metros para cubrir la altura igual a 0,2 metros. Esta es la altura de diseño del paramento. Al graficar la ecuación aguas arriba y abajo de la cresta se obtiene la figura 34.

Figura 35. Perfil de vertedero de 15 L/s



Fuente: elaboración propia.

3.4. Vertedero tipo Creager para un caudal de 10 L/s

Se siguió el mismo procedimiento que el cimacio anterior (inciso 3.2)

3.4.1. Coeficiente de Descarga (C):

$$\frac{P}{H_o} = \frac{0,2m}{0,06044m} = 3,309 m$$

$$C = 2,16$$

3.4.2. Geometría del perfil de un cimacio de cresta libre

$$ha = 0,0008 \text{ m} = 0,08 \text{ cm}$$

$$he = 0,06044 \text{ m} = 6,04 \text{ cm}$$

con estos valores es posible hacer la relación ha/he

$$\frac{ha}{he} = \frac{0,0008 \text{ m}}{0,06044 \text{ m}} = 0,013$$

Los valores obtenidos de la figura 28 fueron los siguientes:

$$k = 0,501$$

$$n = 1,867$$

sustituyendo los datos encontrados con anterioridad en la ecuación 3, la curva aguas debajo de la cresta se define como:

$$\frac{Y}{0,06044} = -0,501 \left(\frac{X}{0,06044} \right)^{1,867}$$

Despejando:

$$Y = -5,70728X^{1,867}$$

utilizando la relación $ha/he = 0,013$ en la figura 29, se tiene que:

$$X_c = -0,017m$$

$$Y_c = -0,007m$$

$$R_1 = 0,030m$$

$$R_2 = 0,012m$$

El punto de tangencia (PT) se tiene $X_t = 0,15 \text{ m}$, despejando de la ecuación el valor de Y, se obtuvo:

$$Y = -5,70728(0,15)^{1,867}$$

$$Y = -0,165 \text{ m}$$

$$PT = (0,15, -0,165)$$

la geometría de la cresta aguas debajo de su punto más alto se muestra en la siguiente tabla.

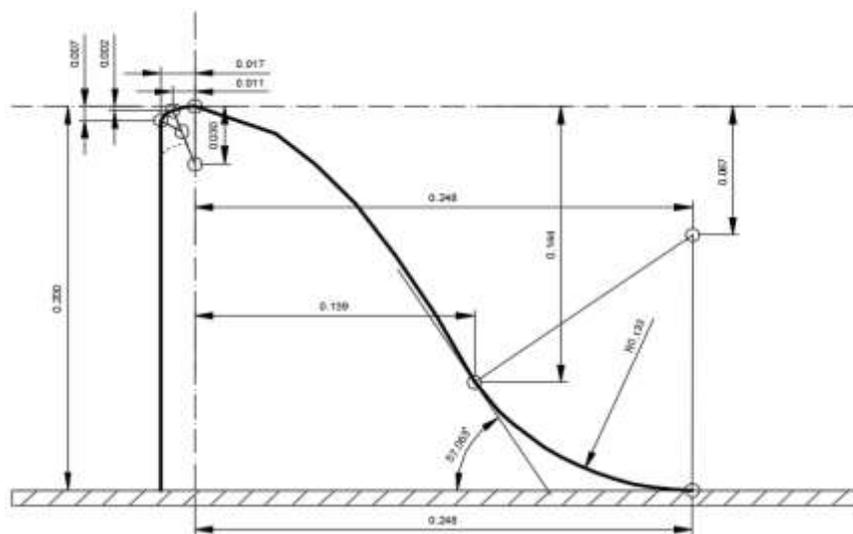
Tabla V. **Coordenadas de perfil de Cimacio de 10 L/s**

PUNTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X(m)	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,17
Y(m)	0	-0,004	-0,014	-0,03	-0,051	-0,078	-0,109	-0,145	-0,19	-0,202

Fuente: elaboración propia.

Para conseguir la altura que requiere el paramento de 0,2 metros, fue necesario recorrer una distancia de 0,17 metros en el eje horizontal. Al trazar de manera adecuada la geometría del vertedero aguas arriba y abajo se obtuvo el detalle que muestra la figura 36.

Figura 36. **Perfil de vertedero de 10 L/s**



Fuente: elaboración propia.

4. CALIBRACIÓN DE CAUDALES SOBRE VERTEDEROS TIPO CREAGER

4.1. Calibración de vertedero tipo Creager de 20 L/s

El ensayo se realizó en el laboratorio de mecánica de fluidos e hidráulica utilizando el canal hidrodinámico el cual tiene un sistema de recirculación compuesto por una bomba centrífuga que permite suministrar distintos valores de caudales. Se utilizó un tanque para el aforo volumétrico calibrado en litros.

4.1.1. Procedimiento del ensayo

- Instalar el perfil de cimacio para 20 L/s dentro del canal.
- Fijarlo con cinta de tela para evitar cualquier filtración en las caras en contacto con el canal.
- Encender La bomba para suministrar flujo en el canal, regulando con la válvula la altura de agua sobre el cimacio y esperar que se estabilice la carga sobre el mismo. este procedimiento puede tomar varios minutos.
- Tomar la lectura de altura de carga en el limnimetro, cuya escala está en centímetros.
- Para cada lectura de carga realizar 3 aforos volumétricos en el tanque calibrado.
- Estrangular la válvula para generar otro caudal y repetir el procedimiento anterior hasta obtener una serie de 7 tomas.

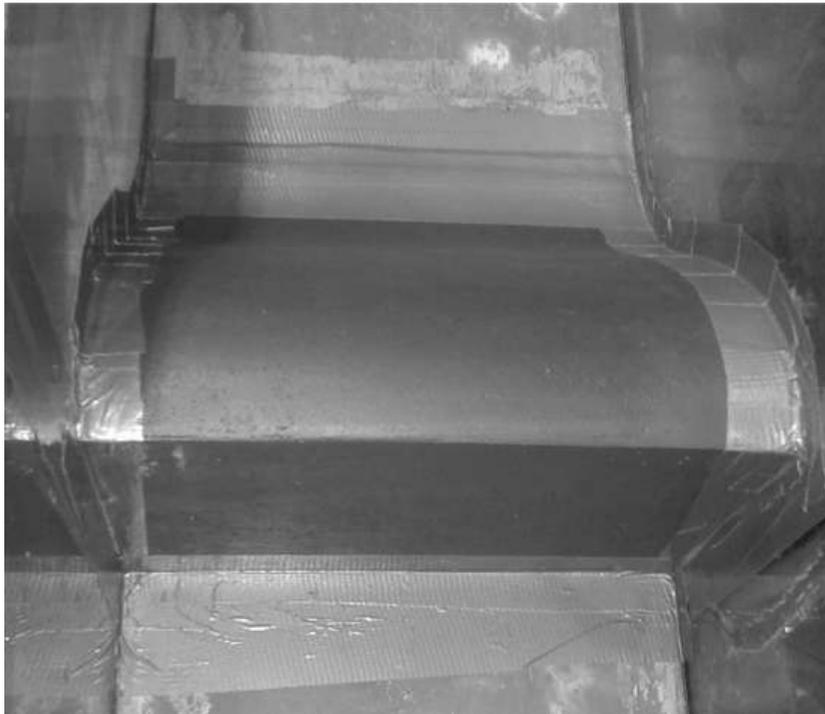
4.1.2. Obtención de resultados

Se obtiene caudal teórico evaluando las cargas H obtenidas en el ensayo en la ecuación $Q = C * b * Ho^{1.5}$, donde C varia para cada uno de los cimacios en el caso del cimacio de 20 L/s, C es igual a 2.16 según el grafico de la figura 26.

Para cada caudal teórico se determina el caudal real con la formula $Q_{real} = V/t$, y se determina el promedio de los 3 aforos para cada lectura de carga.

En la tabla VI Se muestran los datos tomados en el ensayo y en la tabla VII los resultados.

Figura 37. **Vertedero tipo Creager diseñado para un caudal máximo de 20 L/s**



Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Datos obtenidos para cimacio de 20 L/s**

H (cm)	T1 (s)	Vol 1 (Lt)	T2 (s)	Vol 2 (Lt)	T3 (s)	Vol 3 (Lt)
10,3	19,94	407,99	19	388,86	20,37	411,68
9,4	23,13	407,99	23,62	409,46	24,72	427,2
9	23,97	361,77	24,85	393,26	18,28	290,83
8,65	26,22	377,86	25,54	378,59	27,06	394,73
7,6	29,72	359,58	34,19	402,09	26,48	296,58
7,2	38,34	395,47	35,5	367,61	35,53	367,61
6,5	43,13	374,93	42,54	358,12	45,28	380,05

Fuente: elaboración propia.

4.1.3. **Cálculo de resultados experimentales**

Calculo de caudal promedio de las alturas aforadas.

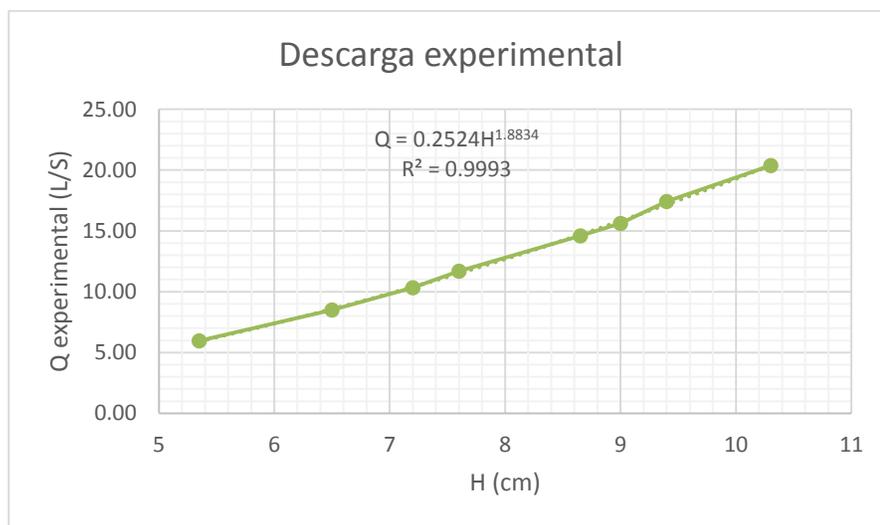
Tabla VII. **Caudales experimentales 20 L/s**

H (cm)	Qexp1 (L/s)	Qexp2 (L/s)	Qexp3 (L/s)	<Qexp> (L/s)
10,3	20,46	20,47	20,21	20,38
9,4	17,64	17,34	17,28	17,42
9	15,09	15,83	15,91	17,42
8,65	14,41	14,82	14,59	14,61
7,6	12,10	11,76	11,20	11,69
7,2	10,31	10,36	10,35	10,34
6,5	8,69	8,42	8,39	8,50

Fuente: elaboración propia.

De la gráfica se obtiene la ecuación potencial de $Q = 0,2524H^{1,8834}$ que relaciona el caudal real observado con la altura sobre el mismo. El valor de Q es el caudal real observado en L/s y H la altura de carga sobre el cimacio en centímetros.

Figura 38. **Gráfica potencial de caudal experimental 20 L/s**



Fuente: elaboración propia.

Con la ecuación anterior se generan los caudales para cada una de las alturas H ensayadas.

Tabla VIII. **Caudales experimentales de ecuación de tendencia 20 L/s**

Ho(cm)	Q ec. exp (L/s)
10,3	20,5581
9,4	18,3527
9	17,3885
8,65	16,5532
7,6	14,0971
7,2	13,1822
6,5	11,6107

Fuente: elaboración propia.

4.1.4. Cálculo del caudal teórico

La ecuación teórica que define la descarga para los vertederos tipo Creager en ensayos experimentales es:

$$Q = CLH^{1.5} \quad (\text{ec.1})$$

donde se conoce el valor de C , la cual fue calculada en el capítulo anterior, L es el ancho del canal en centímetros y H es el tirante de agua sobre el vertedero en centímetros.

Con la ecuación anterior se calculan los caudales teóricos evaluando las alturas obtenidas en el ensayo.

Se muestra el ejemplo para H igual a 10,3 centímetros.

$$Q = (2,16)(0,305 \text{ m})(0,103 \text{ m})^{1,5} * \frac{1 \text{ 000 } L}{1 \text{ m}^3}$$

$$Q = 21,76 \text{ L/s}$$

Tabla IX. Caudales teóricos 20 L/s

H (cm)	Qteo (L/s)
10,3	21,76
9,4	18,97
9	17,77
8,65	16,74
7,6	13,79
7,2	12,72
6,5	10,91

Fuente: elaboración propia.

4.1.5. Cálculo de la ecuación del caudal real

Para encontrar el caudal real en vertederos tipo Creager se define mediante la ecuación:

$$Q_{real} = C_d Q_{teorico} \quad (\text{ec.9})$$

Donde:

Q_{real} = Caudal real (L/s)

C_d = Coeficiente de descarga

Q_{teo} = Caudal teórico (L/s)

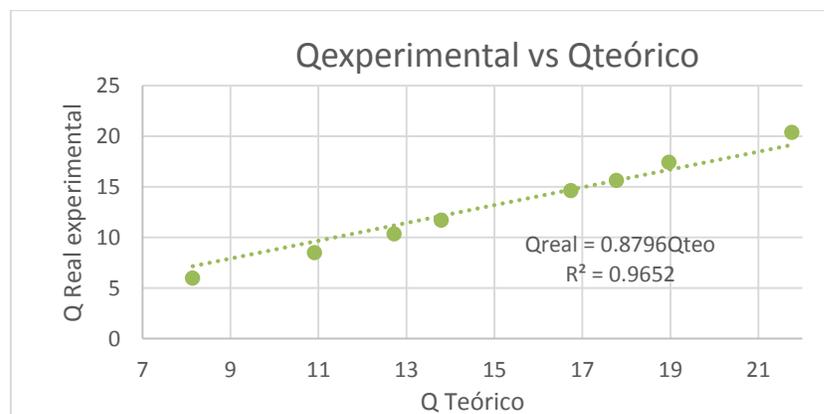
Para encontrar el coeficiente de descarga se grafica el caudal teórico en el eje x y el caudal experimental en el eje y, se observa que su comportamiento es lineal por lo que el coeficiente de descarga es igual a la pendiente de dicha recta $C_d = m$, ver Figura 39.

Tabla X. **Caudal experimental y teórico 20 L/s**

H (cm)	Qteo (L/s)	Qexp (L/s)
10,3	21,76	20,38
9,4	18,97	17,42
9	17,77	15,61
8,65	16,74	14,61
7,6	13,79	11,69
7,2	12,72	10,34
6,5	10,91	8,50

Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Gráfica de caudal experimental vs caudal teórico 20 L/s**



Fuente: elaboración propia.

El coeficiente de descarga es:

$$C_d = 0,8796$$

La ecuación calibrada queda de la siguiente forma:

$$Q_{real} = 1000 * (0,8796)CLH^{1,5} \quad \text{(ec.10)}$$

Donde:

Q_{real} = Caudal real (L/s)

C = coeficiente de descarga = 2,16

L = ancho del canal (m) = 0,305 m

H = altura de carga sobre el cimacio (m)

Evaluando las alturas H del ensayo en la ecuación 10 se genera los caudales reales cuyos resultados se muestran en la tabla XI.

Tabla XI. **Caudal real 20 L/s**

Ho(cm)	Qreal (L/s)
10,3	19,156
9,4	16,701
9	15,646
8,65	14,742
7,6	12,141
7,2	11,195
6,5	9,603

Fuente: elaboración propia.

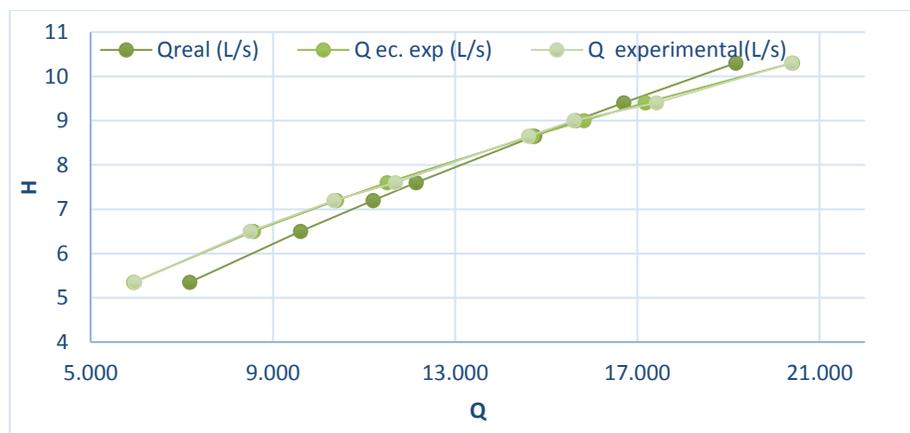
Estos caudales reales generados con la ecuación anterior se comparan con los caudales reales observados en el ensayo de forma gráfica y se determina el porcentaje de error en la medición.

Tabla XII. **Comparación de caudales 20 L/s**

Ho(cm)	Q real (L/s)	Qec. exp (L/s)	Q exp (L/s)
10,3	19,156	20,402	20,38
9,4	16,701	17,174	17,42
9	15,646	15,824	15,61
8,65	14,742	14,685	14,61
7,6	12,141	11,508	11,69
7,2	11,195	10,394	10,34
6,5	9,603	8,573	8,50

Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Gráfica comparación de Qexp, Qreal y Qpot en función de la carga Ho del cimacio de 20 L/s**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. % de error Q_{real} vs Q_{exp} 20 L/s

H_o (cm)	Q_{real} (L/s)	Q_{exp} (L/s)	Error Q_{real} (%)
10,3	19,156	20,38	6,00%
9,4	16,701	17,42	4,12%
9	15,646	15,61	0,24%
8,65	14,742	14,61	0,92%
7,6	12,141	11,69	3,89%
7,2	11,195	10,34	8,28%
6,5	9,603	8,50	12,96%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. % de error Q_{ec} . Potencial vs Q_{exp} 20 L/s

H_o (cm)	Q_{ec} . potencial (L/s)	Q_{exp} (L/s)	Error Q_{pot} (%)
10,3	20,402	20,38	0,11%
9,4	17,174	17,42	1,40%
9	15,824	15,61	1,37%
8,65	14,685	14,61	0,53%
7,6	11,508	11,69	1,52%
7,2	10,394	10,34	0,54%
6,5	8,573	8,50	0,84%

Fuente: elaboración propia.

Figura 41. **Aforo de caudal**



Fuente: elaboración propia.

4.2. Calibración de vertedero tipo Creager de 15 L/s y ajuste en la ecuación empírica

El ensayo fue realizado de la forma mostrada en la sección 4.1. variando la curvatura del vertedero donde se descarga el caudal de entrada, diseñado para un máximo promedio de 15 L/s. Se evaluará el comportamiento de este perfil para caudales mayores al del diseño y menores a este.

4.2.1. Procedimiento del ensayo

El procedimiento para ensayar el vertedero Creager de 15 L/s es el mismo procedimiento realizado en el vertedero Creager de 20 L/s, especificado en la sección 4.1.1.

Figura 42. **Vertedero tipo Creager diseñado para un caudal máximo de 15 L/s**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Datos obtenidos para cimacio de 15 L/s**

H (cm)	T1 (s)	Vol 1 (Lt)	T2 (s)	Vol 2 (Lt)	T3 (s)	Vol 3 (Lt)
9,8	20,38	474,84	19,19	442,78	23,06	426,46
8,4	27,17	471,1	24,55	426,46	24,19	416,84
7,8	29,19	447,98	27,42	420,54	27,63	424,24
7,3	34,41	456,17	31,14	422,76	31,74	430,9
6,7	35,52	424,24	31,4	380,05	36,56	445,01
5,3	43	345,75	40,61	326,88	44,77	354,48
3,1	95,82	306,65	106,22	334,85	106,02	324,71

Fuente: elaboración propia.

4.2.2. Cálculo de resultados experimentales

Para calcular los caudales del vertedero Creager de 15 L/s se siguen los mismos procedimientos de la sección 4.1.2. la cual detalla cada uno de los pasos efectuados para encontrar los caudales experimentales.

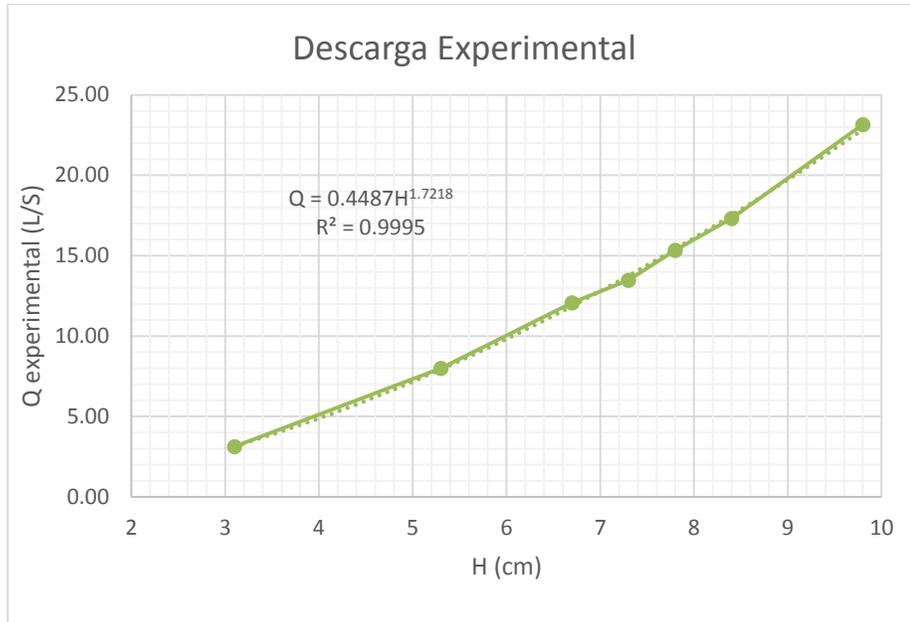
Tabla XVI. Caudal experimental 15 L/s

H (cm)	Qexp1 (L/s)	Qexp2 (L/s)	Qexp3 (L/s)	<Qexp> (L/s)
9,8	23,30	23,07	23,06	23,15
8,4	17,34	17,37	17,23	17,31
7,8	15,35	15,34	15,35	15,35
7,3	13,26	13,58	13,58	13,47
6,7	11,94	12,10	12,17	12,07
5,3	8,04	8,05	7,92	8,00
3,1	3,20	3,15	3,06	3,14

Fuente: elaboración propia.

De la Figura 42, se obtiene la ecuación $Q = 0,4487H^{1,7218}$ que relaciona el caudal real observado con la altura sobre el mismo para un vertedero diseñado para 15 L/s. esta ecuación de tendencia exponencial es equivalente al caudal de descarga experimental, teniendo un $R^2 = 0,999$.

Figura 43. **Gráfica potencial de caudal experimental 15 L/s**



Fuente: elaboración propia.

Con la ecuación anterior se generan los caudales para cada una de las alturas H ensayadas en el canal hidráulico.

Tabla XVII. **Caudales experimentales de ecuación de tendencia 15 L/s**

Ho(cm)	Q ec. potencial (L/s)
9,8	22,8375
8,4	17,5138
7,8	15,4157
7,3	13,7539
6,7	11,8657
5,3	7,9253
3,1	3,1476

Fuente: elaboración propia.

4.2.3. **Cálculo del caudal teórico**

El procedimiento para determinar el caudal teórico es el mismo que en la sección 4.1.3. donde es detallada la ecuación a utilizar.

Tabla XVIII. **Caudal teórico 15 L/s**

Ho(m)	Qteo (L/s)
9,8	20,2112
8,4	16,0388
7,8	14,3514
7,3	12,9939
6,7	11,4253
5,3	8,0384
3,1	3,5958

Fuente: elaboración propia.

4.2.4. Cálculo del caudal real

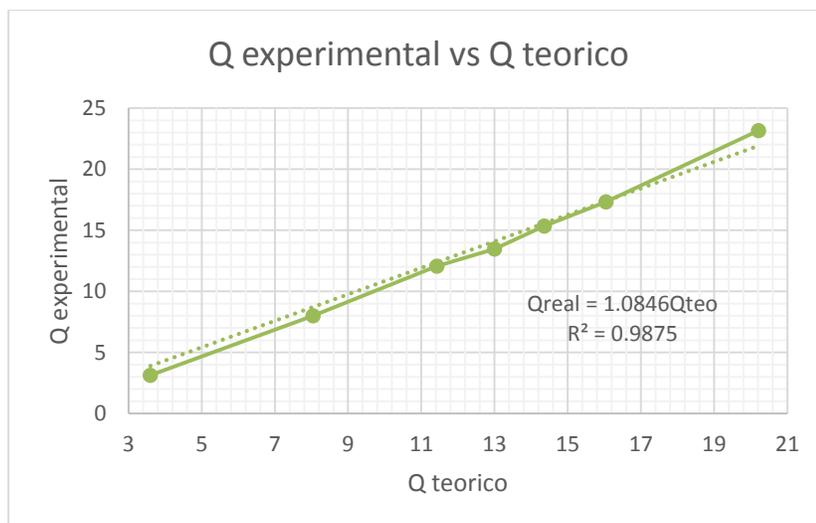
La ecuación por utilizar esta dada en la sección 4.1.4. donde se define el procedimiento detallado para despejar el caudal teórico de descarga.

Tabla XIX. Caudal experimental y teórico 15 L/s

H (cm)	Q Teo (L/s)	Q exp (L/s)
9,8	20,2112	23,15
8,4	16,0388	17,31
7,8	14,3514	15,35
7,3	12,9939	13,47
6,7	11,4253	12,07
5,3	8,0384	8,00
3,1	3,5958	3,14

Fuente: elaboración propia.

Figura 44. Gráfica de caudal experimental vs caudal teórico 15 L/s



Fuente: elaboración propia.

El coeficiente de descarga es:

$$C_d = 1,0846$$

multiplicando el valor de C_d con el caudal teórico, se genera la siguiente ecuación:

$$Q_{real} = 1000 * (1,0846)CLH^{1,5} \quad (\text{ec.11})$$

Evaluando las alturas H del ensayo en la ecuación 11 se genera los siguientes caudales, mostrados en la tabla XX.

Tabla XX. **Caudal real 15 L/s**

Ho(cm)	Qreal (L/s)
9,8	21,9211
8,4	17,3957
7,8	15,5656
7,3	14,0931
6,7	12,3918
5,3	8,7184
3,1	3,9000

Fuente: elaboración propia.

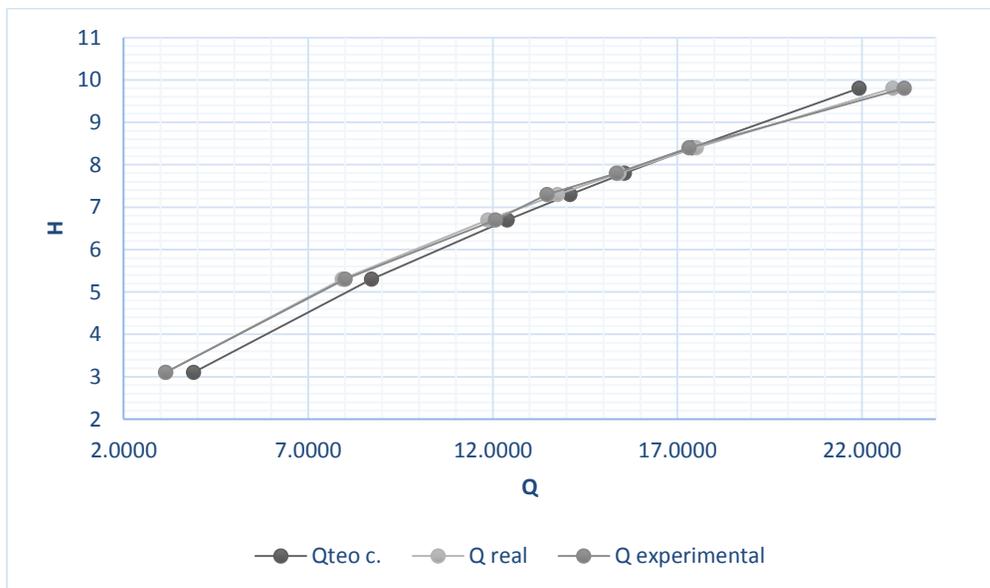
Los caudales reales generados con la ecuación anterior se comparan con los caudales reales observados en el ensayo de forma gráfica y se determina el porcentaje de error en las mediciones.

Tabla XXI. **Comparación de caudales 15 L/s**

Ho(cm)	Qreal (L/s)	Q ec. Potencial (L/s)	Q exp (L/s)
9,8	21,9211	22,8375	23,15
8,4	17,3957	17,5138	17,31
7,8	15,5656	15,4157	15,35
7,3	14,0931	13,7539	13,47
6,7	12,3918	11,8657	12,07
5,3	8,7184	7,9253	8,00
3,1	3,9000	3,1476	3,14

Fuente: elaboración propia.

Figura 45. **Gráfica comparación de Qexp, Qreal y Qpot en función de la carga Ho del cimacio de 15 L/s**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. % de error Q_{real} vs Q_{exp} 15 L/s

H_o (cm)	Q_{real} (L/s)	Q_{exp} (L/s)	Error Q_{real} (%)
9,8	21,9211	23,15	1,33%
8,4	17,3957	17,31	1,15%
7,8	15,5656	15,35	0,45%
7,3	14,0931	13,47	2,11%
6,7	12,3918	12,07	1,72%
5,3	8,7184	8,00	0,97%
3,1	3,9000	3,14	0,29%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. % de error Q_{ec} . Potencial vs Q_{exp} 15 L/s

H_o (cm)	Q_{ec} . Potencial (L/s)	Q_{exp} (L/s)	Error Q_{exp} (%)
9,8	22,8375	23,15	5,29%
8,4	17,5138	17,31	0,47%
7,8	15,4157	15,35	1,43%
7,3	13,7539	13,47	4,63%
6,7	11,8657	12,07	2,64%
5,3	7,9253	8,00	8,94%
3,1	3,1476	3,14	24,26%

Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **Calibración y lectura de Limnómetro**



Fuente: elaboración propia.

4.3. Calibración de vertedero tipo Creager de 10 L/s y ajuste en la ecuación empírica

El ensayo fue realizado de manera similar a la sección 4.1. variando la curvatura del vertedero donde es descargado el caudal de entrada, que fue diseñado para un máximo promedio de 10 L/s, con la diferencia de que no se utilizó cinta de tela para sellar filtraciones ya que este último modelo fue realizado con las medidas adecuadas para que este trabajara a presión.

4.3.1. Procedimiento del ensayo

El procedimiento para ensayar el vertedero Creager de 10 L/s es el mismo procedimiento especificado en la sección 4.1.1.

Figura 47. **Vertedero tipo Creager diseñado para un caudal máximo de 10 L/s**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Datos obtenidos para cimacio de 10 L/s**

H (cm)	T1 (s)	Vol 1 (Lt)	T2 (s)	Vol 2 (Lt)	T3 (s)	Vol 3 (Lt)
10	18,34	420,54	17,34	398,41	19,13	437,58
9,4	20,97	444,26	18,34	388,86	20,31	430,9
8,5	25,91	460,64	24,37	430,9	25,25	448,72
7,9	23,56	377,12	29,12	465,12	26,15	418,32
7,4	27,94	394,73	29,5	420,54	28,94	410,94
6,6	34,1	399,15	36,91	432,39	39,06	456,91
5,7	44,28	409,46	47,25	433,87	51,38	475,58

Fuente: elaboración propia.

4.3.2. Cálculo de Resultados experimentales

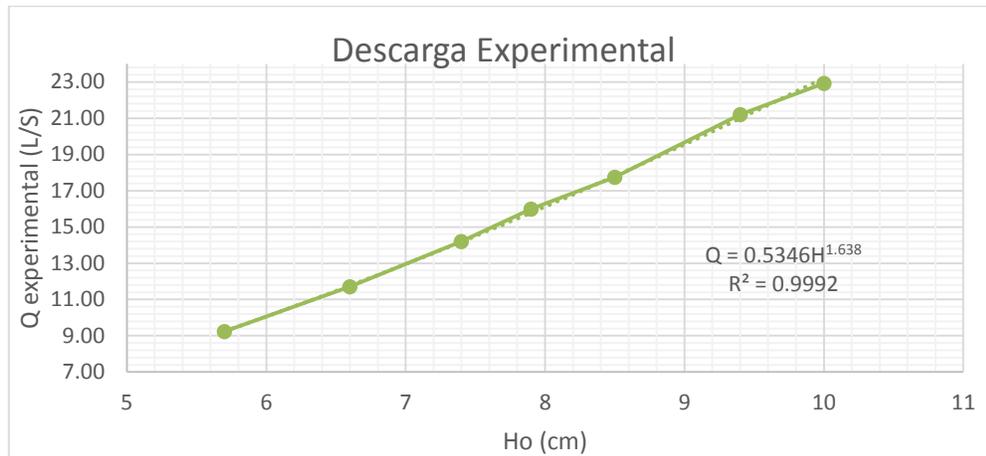
Se siguen los mismos procedimientos de la sección 4,1,2, la cual detalla cada uno de los pasos efectuados para encontrar los caudales experimentales,

Tabla XXV. **Caudales experimentales 10 L/s**

H (cm)	Qexp1 (L/s)	Qexp2 (L/s)	Qexp3 (L/s)	<Qexp> (L/s)
10	22,93	22,98	22,87	22,93
9,4	21,19	21,20	21,22	21,20
8,5	17,78	17,68	17,77	17,74
7,9	16,01	15,97	16,00	15,99
7,4	14,13	14,26	14,20	14,19
6,6	11,71	11,71	11,70	11,71
5,7	9,25	9,18	9,26	9,23

Fuente: elaboración propia.

Figura 48. **Gráfica potencial de caudal experimental 10 L/s**



Fuente: elaboración propia.

De la gráfica se obtiene la ecuación $Q = 0,5346H^{1,638}$ nos define la curva potencial de descarga experimental para el vertedero Creager de 10 L/s, la ecuación de tendencia exponencial es equivalente al caudal de descarga experimental, se ajusta a un $R^2 = 0.9992$.

Tabla XXVI. **Caudales experimentales de ecuación de tendencia 10 L/s**

H (cm)	Qec. Potencial (L/s)
10	23,2289
9,4	20,9900
8,5	17,7999
7,9	15,7885
7,4	14,1850
6,6	11,7609
5,7	9,2502

Fuente: elaboración propia.

4.3.3. Cálculo del caudal Teórico

El procedimiento para determinar el caudal teórico se define en la sección 4.1.3. donde es detallada la ecuación a utilizar.

Tabla XXVII. Caudal teórico 10 L/s

Ho(m)	Qteo (L/s)
10	20,8331
9,4	18,9865
8,5	16,3261
7,9	14,6283
7,4	13,2618
6,6	11,1704
5,7	8,9653

Fuente: elaboración propia.

4.3.4. Cálculo del caudal real

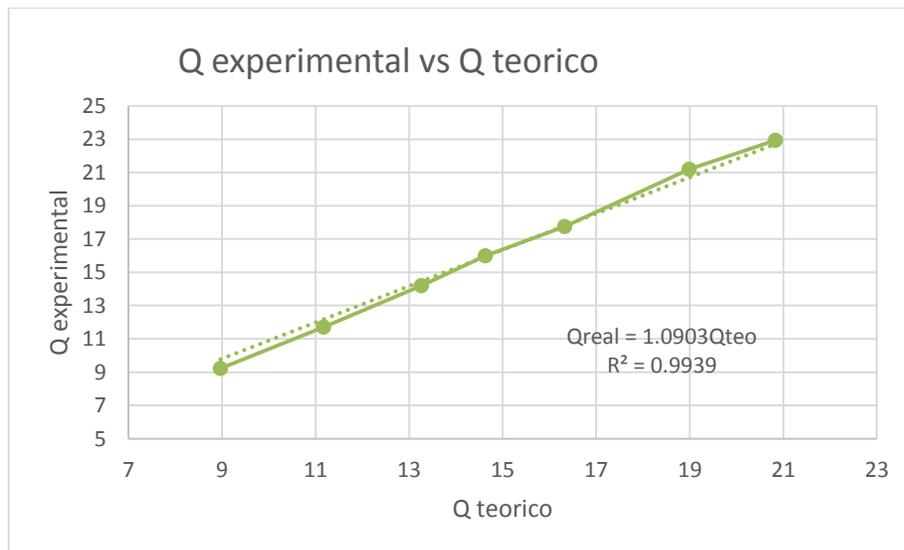
La ecuación por utilizar esta en la sección 4.1.4. donde se define el procedimiento detallado para despejar el caudal teórico de descarga.

Tabla XXVIII. Caudal experimental y teórico 10 L/s

Ho(m)	Q teo (L/s)	Q exp (L/s)
10	20,8331	22,93
9,4	18,9865	21,20
8,5	16,3261	17,74
7,9	14,6283	15,99
7,4	13,2618	14,19
6,6	11,1704	11,71
5,7	8,9653	9,23

Fuente: elaboración propia.

Figura 49. Gráfica de caudal experimental vs caudal teórico 10 L/s



Fuente: elaboración propia.

Se define que el coeficiente de descarga es:

$$C_d = 1,0903$$

Multiplicando el valor de C_d con el caudal teórico, se genera la siguiente ecuación:

$$Q_{real} = 1000 * (1,0903)CLH^{1,5} \quad (\text{ec.12})$$

Evaluando las alturas H del ensayo en la ecuación 12 se genera los siguientes caudales, mostrados en la tabla XXI.

Tabla XXIX. **Caudal real 10 L/s**

Ho(m)	Qreal (L/s)
10	22,7143
9,4	20,7010
8,5	17,8003
7,9	15,9492
7,4	14,4593
6,6	12,1791
5,7	9,7749

Fuente: elaboración propia.

Estos caudales reales generados con la ecuación anterior se comparan con los caudales reales observados en el ensayo de forma gráfica y se determina el porcentaje de error en la medición.

Tabla XXX. Comparación de caudales 10 L/s

Ho(m)	Qreal (L/s)	Qec. Potencial (L/S)	Q exp (L/s)
10	22,7143	23,2289	22,93
9,4	20,7010	20,9900	21,20
8,5	17,8003	17,7999	17,74
7,9	15,9492	15,7885	15,99
7,4	14,4593	14,1850	14,19
6,6	12,1791	11,7609	11,71
5,7	9,7749	9,2502	9,23

Fuente: elaboración propia.

Figura 50. Gráfica comparación de Qexp, Qreal y Qpot en función de la carga Ho del cimacio de 10 L/s



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. % de error Q_{real} vs Q_{exp} 10 L/s

Ho(m)	Q_{real} (L/s)	Q_{exp} (L/s)	Error Q_{real} (%)
10	22,7143	22,93	0,93%
9,4	20,7010	21,20	2,36%
8,5	17,8003	17,74	0,32%
7,9	15,9492	15,99	0,27%
7,4	14,4593	14,19	1,87%
6,6	12,1791	11,71	4,04%
5,7	9,7749	9,23	5,92%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. % de error $Q_{ec,Potencial}$ vs Q_{exp} 10 L/s

Ho(m)	Q_{ec} . Potencial (L/s)	Q_{exp} (L/s)	Error Q_{ec} . Potencial (%)
10	23,2289	22,93	1,32%
9,4	20,9900	21,20	1,00%
8,5	17,7999	17,74	0,32%
7,9	15,7885	15,99	1,27%
7,4	14,1850	14,19	0,07%
6,6	11,7609	11,71	0,47%
5,7	9,2502	9,23	0,23%

Fuente: elaboración propia.

El desprendimiento de la lámina de flujo de agua solo se observó en este cimacio, el desprendimiento ocurrió para un Caudal de 22.93 L/s, que es un poco mayor al doble al caudal de diseño que es 10 L/s. En los cimacios para un caudal máximo de 20 y 15 L/s no se observó desprendimiento de la lámina por que se necesitarían caudales mayores a 30 L/s los cuales no los puede

suministrar el sistema de bombeo del canal hidrodinámico. En la Figura 49 se muestra la zona de desprendimiento en el cimacio al momento de circular un Q de 22.93 L/s.

Figura 51. **Vertedero tipo Creager al momento de circular un caudal de 18 L/s**



Fuente: elaboración propia.

Figura 52. **Lectura de altura en el tanque volumétrico**



Fuente: elaboración propia.

5. INSTRUCTIVO DE LABORATORIO PARA ENSAYO CON VERTEDEROS TIPO CREAGER

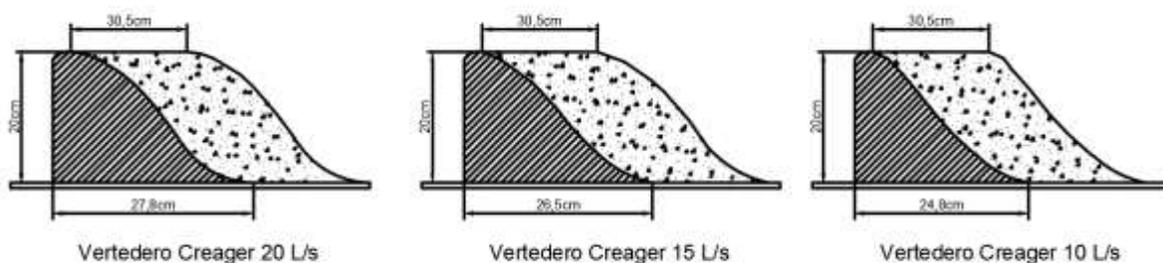
Introducción:

Los vertederos de pared delgada son ideales para medir caudales de manera precisa, mientras los vertederos de pared gruesa son diseñados como parte de una presa o estructura hidráulica, donde su objetivo es controlar los niveles del embalse, este tipo de vertederos como el de cimacio también puede utilizarse como medidor de caudal.

La superficie donde rebosa la lámina líquida vertiente en un vertedero tipo Creager es relativamente grande, esta estructura hidráulica permite el pase libre o controlado de agua, por lo que su principal función es el desagüe de volúmenes de agua excedentes.

Equipo

- Se utilizarán tres vertederos de pared gruesa, de diferente curvatura según sea el caudal para el cual fue diseñado. Los caudales de diseño fueron: 20 L/s, 15 L/s, 10 L/s.



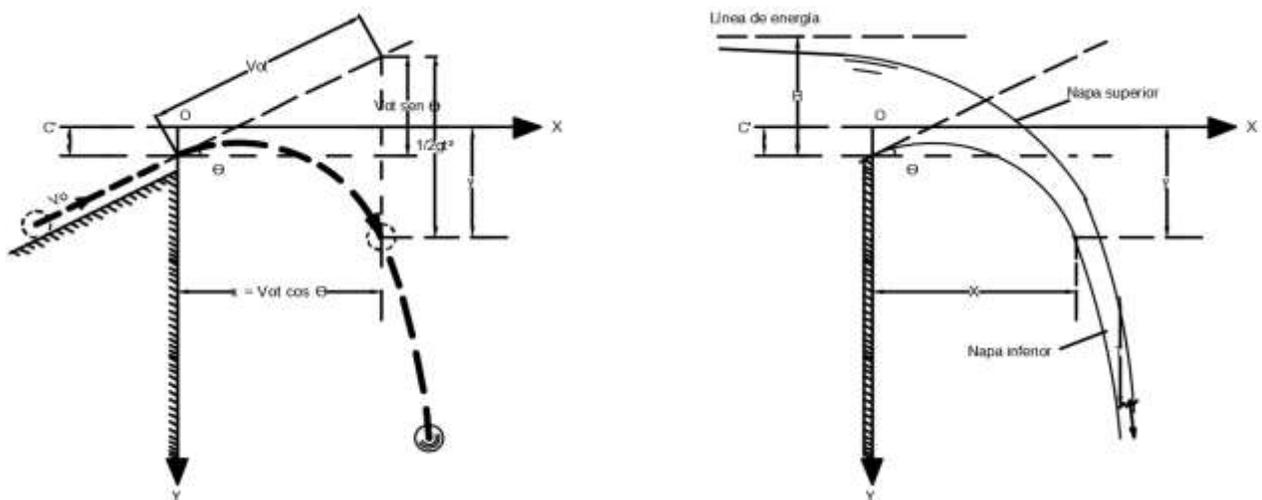
- Canal hidrodinámico donde se colocarán los modelos a escala de cimacio, se ubicarán al inicio del canal.

- Bomba centrífuga que suministra el flujo al canal.
- Limnómetro graduado en centímetros para medir los diferentes tirantes o cargas de agua sobre la cresta.
- Tanque volumétrico calibrado en litros que está ubicado al final del canal hidráulico.
- Cronómetro.

Marco teórico

Las formas de cresta se basaron en un diseño de parábola simple para ajustar la trayectoria de la napa de caída, como se muestra en la figura 50. El flujo no debe generar presiones negativas sobre la cresta. Las presiones negativas en condiciones de campo siempre existen y no pueden eliminarse, ya que siempre existen fricciones debido a la rugosidad en la superficie del vertedero. La presencia de presiones negativas significa que habrá daño por cavitación.

Figura 53. Trayectoria de flujo de descarga



Fuente: elaboración propia.

Con referencia a los datos del Bureau of Reclamation, el U.S. Army Corps of Engineers definió algunas formas estándar en su Waterways Experiment Station. Llamadas formas de vertederos estándar WES pueden definirse por la siguiente ecuación:

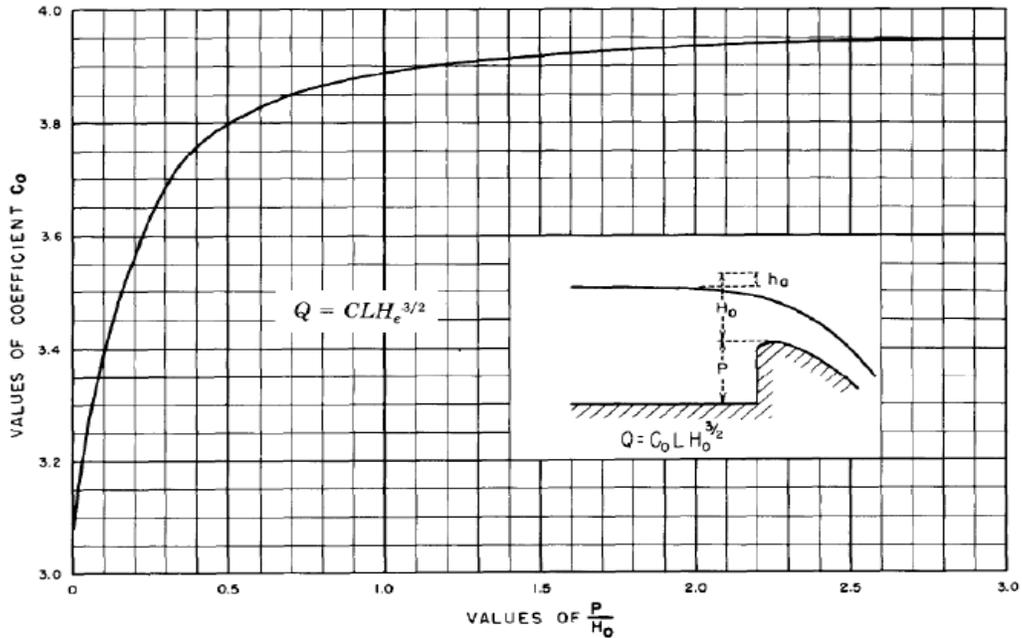
$$X^n = KH_d^{n-1}Y$$

Donde X y Y son las coordenadas del perfil de la vertiente aguas abajo de la cresta, H_d es la altura de diseño sobre la cresta, sin tomar en cuenta la altura de velocidad del flujo de aproximación, K y n son valores definidos por la inclinación de la cara del vertedero aguas arriba de la cresta. El caudal que pasa sobre la cresta del cimacio puede medirse mediante una ecuación diseñada para los vertederos de las formas WES, la ecuación se define:

$$Q = CLH_e^{1,5}$$

Donde H_e es la altura de energía total sobre la cresta, incluida la altura de velocidad en el canal de aproximación. L es el ancho del canal de aproximación, C es el coeficiente de descarga que varía en función de la relación $\frac{P}{H_o}$ como se muestra en la figura 51.

Figura 54. **Determinación del coeficiente de gasto según U.S.B.R.**



Fuente: Bureau of Reclamation, determinación del coeficiente de gasto C pág. 99.

Desarrollo del ensayo

1. Objetivos

- Conocer los conceptos y principios hidráulicos de comportamiento del flujo sobre un vertedor tipo Creager así como el método para dimensionarlos.
- Analizar mediante la experimentación el comportamiento del flujo de los tres perfiles de Creager haciendo variar las alturas de carga.
- Graficar las curvas de descarga de cada uno de los vertederos tipo Creager en sus diferentes variaciones de ecuación que definen a esta curva.
- Obtener ecuaciones que generen el caudal en función de la altura.

2. Procedimiento

- Instalar el cimacio dentro del canal hidrodinámico y asegurarse que no tenga fugas.
- Encender la bomba para suministrar el flujo al canal e ir graduando el paso del flujo de agua por medio de la válvula de descarga.
- Definir la coordenada cero en la escala, la cual corresponderá a la superficie libre de agua que retiene el paramento aguas arriba de la cresta, bajo estas condiciones no debe circular flujo de agua por la cresta.
- Tomar el valor de H en el limnómetro y determinar el caudal que circula utilizando el método de aforo, realizando tres veces la medición.
- Abrir la válvula para obtener otro valor de H y caudal hasta obtener 7 tomas de aforo, dejando pasar unos minutos para que el flujo de agua se pueda estabilizar, una vez estabilizado el flujo se procede a medir las alturas de carga H en cm.

Cálculo de los caudales del vertedero Creager

- Con las alturas de carga tomadas en el ensayo se procede a determinar el caudal teórico en L/s.

$$Q_{teo} = CLH^{1,5}$$

De esta ecuación se obtiene la variable de la altura H por medio del ensayo, mientras que las literales L y C son constantes definidas con anterioridad.

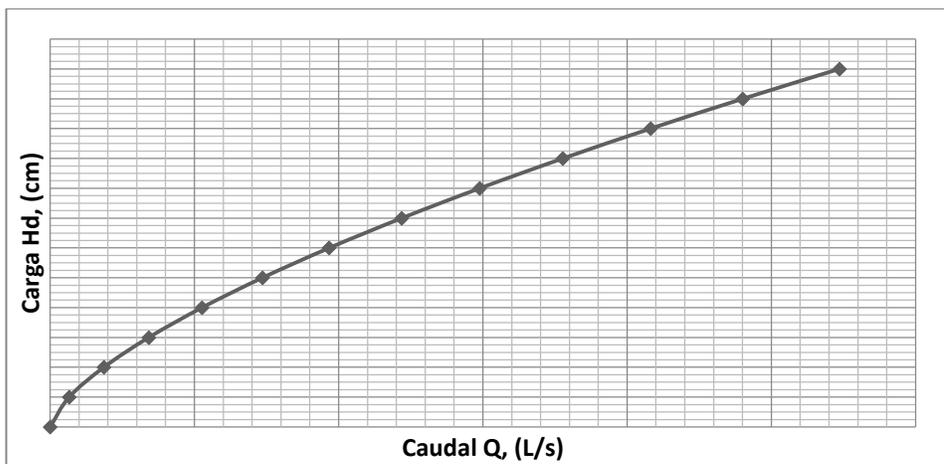
Donde:

Q = caudal de descarga (L/s)

H = altura de carga sobre la cresta (m)

- Determine el valor del caudal real observado con la formula $\frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}}$ para cada una de las 3 mediciones y sacar el caudal promedio $\langle Q \rangle = \frac{Q_1+Q_2+Q_3}{3}$.
- Con los valores obtenidos del caudal teórico Q_{teo} y las alturas de carga H , se grafica la curva de descarga para cada vertedero, colocando en el eje X los valores del caudal en (L/s) y en el eje Y los valores de altura de carga en (cm), como se muestra en la Figura 52.

Figura 55. **Curva de descarga**



Fuente: elaboración propia.

- Para determinar el coeficiente de descarga que relaciona el caudal teórico con el caudal experimental se construye un gráfico donde los valores de Q experimental van en el eje Y y el Q teórico en el eje X, se

observa que la dispersión tiene un comportamiento lineal y se determina la pendiente de la recta ($Y = mx + b$) la cual represente el coeficiente de descarga, el cual al multiplicar el caudal teórico genera un valor parecido al del caudal real observado.

$$Q_{real} = C_d Q_{teorico}$$

- Se determina la ecuación para cada vertedero que tiene la forma de $Q = kH^n$ donde Q es el caudal real observado en L/s, H la carga observada en el ensayo en cm, k y n son valores constantes obtenidos por métodos de regresión.
- Comparar los caudales generados en las ecuaciones deducidas con los valores experimentales (teórico, experimental y real).

CONCLUSIONES

1. Los vertederos Creager también llamados aliviaderos son componentes de obras hidráulicas como embalses de hidroeléctricas y en ellos se pueden desfogar caudales de distintas magnitudes.
2. Los aliviaderos se diseñan para un caudal específico medio, para el cual se garantiza que el recorrido del flujo es sobre la cresta y no va a ocasionar erosión al pie de estos.
3. En el ensayo de los tres vertederos Creager se observó que para caudales pequeños tuvo mejor comportamiento el diseñado para un caudal de 10 L/s. también se obtuvo menor porcentaje de error en la ecuación calibrada.
4. En el aliviadero diseñado para un caudal de 20 L/s se observó que hay una mejor correlación de los caudales reales observados con los caudales generados con la ecuación calibrada.
5. Se obtuvieron coeficientes de descarga para cada uno de los vertederos de Creager ensayados los cuales al multiplicar la ecuación teórica generan caudales muy aproximados a los observados en el ensayo, como se observa en las tablas XIII, XXII, XXXI y los porcentajes de error son pequeños en el cimacio de 10 L/s y mayores en el de 20 L/s.
6. Al observar el comportamiento entre el caudal experimental y carga sobre el cimacio en los gráficos 38, 43 y 48 Se obtuvo mediante método

de regresión un modelo del tipo exponencial $Q = KH^n$ para cada uno de los aliviaderos ensayados y se comparó el caudal generado en estos modelos con el caudal experimental como se muestra en las tablas XII, XXI y XXX donde los porcentajes de error son menores.

7. De los tres aliviaderos ensayados se observó desprendimiento de la lámina en aliviadero de 10 L/s esto ocurrió con un caudal de 18 L/s en adelante, el cual es un caudal mucho mayor que el caudal de diseño lo que demuestra que la curvatura de un aliviadero debe de diseñarse de acuerdo con el caudal medio. Dado que este caudal se desplaza sobre la cresta sin desprenderse de la misma en los otros dos cimacios diseñados para caudales de 15 y 20 L/s.

RECOMENDACIONES

1. Para la colocación de cada uno de los cimacios dentro del canal Hidrodinámico es necesario remover los residuos sólidos de arena u otras partículas. También debe estar libre de humedad para que la cinta selladora pueda adherirse correctamente.
2. Para tomar las lecturas de carga H el flujo del canal se debe estabilizar. En caso de que el flujo del canal este inestable se recomienda subir más el nivel de agua de la cisterna que abastece la bomba para que no se presente cavitación y así estabilizar pronto el flujo.
3. Para cada toma se debe esperar el tiempo necesario para que el nivel de flujo se estabilice y no cambie durante el proceso de aforo.
4. Las lecturas para los tirantes se deben realizar a una distancia de cuatro veces el tirante mayor, distancia medida a partir del vertedero.
5. En los tres vertederos tipo Creager su curvatura fue diseñada respecto al caudal promedio que fluiría por su cresta, es importante manejar caudales cercanos al caudal de diseño sobre todo si este aumenta demasiado se generaran presiones negativas sobre la cresta y fuerzas de cavitación que pueden dañar la integridad del vertedero.
6. Se recomienda continuar con esta investigación con vertederos cuyo perfil corresponda a caudales medios menores a 10 L/s para observar de mejor forma el desprendimiento de la lámina de flujo de la cresta,

dado que el sistema de bombeo y las dimensiones del canal no permiten la generación, ni el aforo de caudales superiores 22 L/s.

BIBLIOGRAFÍA

1. GILES, Ronald V. *Mecánica de los fluidos e Hidráulica*. (Schaum). México: McGraw Hill, s.a. 273 p.
2. MERRIT, FREDERICK S. *Manual del ingeniero civil*. 2ª ed. (vol. IV). Mexico: McGraw Hill, 1996. 170 p.
3. STREETER, Victor L. y E. Benjamin Wylie. *Mecánica de los Fluidos*. 3ª ed. México: McGraw Hill, 1993. 595 p.
4. VEN TE CHOW. *Hidráulica de canales abiertos*. Colombia: McGraw Hill, 1994. 667p.
5. VILLÓN, Máximo. *Hidráulica de canales*. Costa Rica: Tecnológica de Costa Rica, 1995. 487 p.

