



**UNIVERSIDAD JOSÉ CARLOS MARIÁTEGUI**

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y  
ARQUITECTURA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

## **TESIS**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA DESCARGA, COEFICIENTE  
DE DESCARGA Y LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE  
UN ALIVIADERO EN FORMA DE ENGRANAJE  
DE UNA REPRESA**

**PRESENTADO POR**

**BACHILLER JOSE ELIAS MARCA QUISPE**

**ASESOR**

**MGR. ROBERTO ALFARO ALEJO**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE**

**INGENIERO CIVIL**

**MOQUEGUA – PERÚ**

**2019**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
Página de jurado.....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos.....	iii
Contenido.....	iv
CONTENIDO DE TABLAS.....	ix
CONTENIDO DE FIGURAS.....	xi
CONTENIDO DE ECUACIONES.....	xiii
CONTENIDO DE APÉNDICES.....	xv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	xviii

### CAPÍTULO I

#### PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción de la realidad del problema.....	1
1.2. Definición del problema.....	3
1.2.1. Problema general.....	3
1.2.2. Problemas específicos.....	3
1.3. Objetivos de la investigación.....	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. Justificación.....	4
1.5. Alcances y limitaciones.....	4

1.5.1. Alcance.....	4
1.5.2. Limitaciones.....	5
1.6. Variables.....	5
1.6.1. Operacionalización de variables.....	5
1.7. Hipótesis de la investigación.....	6
1.7.1. Hipótesis general.....	6
1.7.2. Hipótesis específicas.....	6

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

2.1. Antecedentes de la investigación .....	7
2.2. Bases teóricas .....	12
2.2.1. Coeficiente de descarga.....	12
2.2.2. Parámetros geométricos del aliviadero. ....	15
2.2.3. Represa.....	15
2.2.4. Aliviadero.....	16
2.2.5. Necesidad de un aliviadero. ....	17
2.2.6. Importancia de un aliviadero.....	17
2.2.7. Funciones de un aliviadero.....	18
2.2.8. Clasificación de aliviaderos. ....	18
2.2.9. Clasificación de aliviadero según su función.....	38
2.2.10. Partes del aliviadero. ....	39
2.2.11. Desarrollo de la fórmula teórica.....	40
2.3. Definición de términos .....	46

## **CAPÍTULO III**

### **MÉTODO**

3.1.	Tipo de la investigación .....	47
3.1.1.	Nivel de la investigación.....	47
3.1.2.	Método de investigación.....	48
3.2.	Diseño de la investigación.....	48
3.2.1.	Modelo experimental.....	48
3.2.2.	Configuración experimental.....	49
3.2.3.	Medida experimental.....	51
3.3.	Población y muestra .....	52
3.3.1.	Población.....	52
3.3.2.	Muestra.....	52
3.4.	Descripción de instrumentos para recolección de datos.....	52

## **CAPÍTULO IV**

### **DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

4.1.	Metodología .....	54
4.1.1.	Para la determinación de la relación entre el coeficiente de descarga, la descarga, $H1/P$ y los parámetros $b$ y $c$ . .....	54
4.1.2.	Para la comparación de la capacidad de descarga entre aliviadero en forma de engranaje y aliviadero lineal. ....	55
4.1.3.	Para la determinación de la ecuación de coeficiente de descarga para un aliviadero en forma de engranaje. ....	56
4.2.	Procedimiento experimental.....	56
4.2.1.	Métodos estadísticos. ....	57

## **CAPÍTULO V**

### **ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

5.1.	Presentación de resultados .....	59
5.1.1.	Relación entre el coeficiente de descarga, la descarga, $H1/P$ y los parámetros $b$ y $c$ . .....	70
5.1.2.	Comparación de la capacidad de descarga entre aliviadero en forma de engranaje y aliviadero lineal. ....	74
5.1.3.	Determinación de la ecuación de coeficiente de descarga para un aliviadero en forma de engranaje. ....	75
5.2.	Contrastación de hipótesis.....	80
5.2.1.	Paso N° 01: Hipótesis nula e hipótesis alternativa.....	80
5.2.2.	Paso N° 02: Nivel de significancia.....	81
5.2.3.	Paso N° 03: Cálculo del estadístico de prueba.....	81
5.2.4.	Paso N° 04: Formular la regla de decisión .....	85
5.2.5.	Paso N° 05: Toma de una decisión.....	88
5.3.	Discusión de resultados.....	92
5.3.1.	Relación entre el coeficiente de descarga, la descarga, $H1/P$ y los parámetros $b$ y $c$ . ....	92
5.3.2.	Comparación de la capacidad de descarga entre aliviadero en forma de engranaje y aliviadero lineal. ....	94
5.3.3.	Determinación de la ecuación de coeficiente de descarga para un aliviadero en forma de engranaje. ....	95

## **CAPÍTULO VI**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

6.1. Conclusiones .....	97
6.2. Recomendaciones.....	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
APÉNDICES.....	105
MATRIZ DE CONSISTENCIA .....	109
INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	110

## CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables .....	5
Tabla 2. Comparación de aliviadero y perfiles de cresta .....	27
Tabla 3. Esquema experimental para tipos de alta y baja velocidad.....	49
Tabla 4. Parámetros de una relación lineal .....	57
Tabla 5. Resultados obtenidos en laboratorio y calculados en gabinete para tipo de configuración C1a1 .....	61
Tabla 6. Resultados obtenidos en laboratorio y calculados en gabinete para tipo de configuración C1a2 .....	62
Tabla 7. Resultados obtenidos en laboratorio y calculados en gabinete para tipo de configuración C1a3 .....	63
Tabla 8. Resultados obtenidos en laboratorio y calculados en gabinete para tipo de configuración C1a4 .....	64
Tabla 9. Resultados obtenidos en laboratorio y calculados en gabinete para tipo de configuración C2a1 .....	65
Tabla 10. Resultados obtenidos en laboratorio y calculados en gabinete para tipo de configuración C2a2 .....	66
Tabla 11. Resultados obtenidos en laboratorio y calculados en gabinete para tipo de configuración C2a3 .....	67
Tabla 12. Resultados obtenidos en laboratorio y calculados en gabinete para tipo de configuración C2a4 .....	68
Tabla 13. Resultados obtenidos en laboratorio y calculados en gabinete para tipo de configuración CL .....	69

Tabla 14. Resultados obtenidos de coeficiente de descarga para dos tipos de engranajes C1 y C2 .....	71
Tabla 15. Resultados obtenidos de relación de tirante H1 y altura de Aliviadero P.....	73
Tabla 16. Resultados de las relaciones de la capacidad de la descarga de aliviadero en forma de engranaje y aliviadero lineal .....	75
Tabla 17. Resultados obtenidos a partir de la fórmula planteada de coeficiente de descarga para aliviadero tipo engranaje .....	76
Tabla 18. Análisis estadístico la relación coeficiente de descarga y la descarga..	82
Tabla 19. Análisis estadístico la relación carga relativa en el aliviadero y la descarga.....	83
Tabla 20. La relación de la descarga de aliviadero en forma de engranaje y aliviadero lineal (s).....	84
Tabla 21. Error relativo que se obtiene al calcular con la ecuación obtenida y ecuación general.....	85
Tabla 22. Resultado de error relativo en porcentaje entre coeficiente de descarga obtenida de laboratorio y coeficiente de descarga calculada fórmula determinada .....	91



## CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1. Principio de derivación del perfil de cresta delgada.....	21
Figura 2. Se muestran el perfil típico de la cresta .....	22
Figura 3. Faces de agua.....	23
Figura 4. Curvas de diseño sugeridas por Murphy .....	26
Figura 5. Coeficiente de descarga para la cabeza de diseño para la cara vertical ascendente.....	31
Figura 6. Efecto de la profundidad de aproximación sobre el coeficiente de descarga .....	32
Figura 7. Efecto de la inclinación de la cara aguas arriba sobre el coeficiente de descarga .....	32
Figura 8. Aliviadero tipo orificio de la represa Dique San Roque, en Córdoba, Argentina .....	35
Figura 9. Aliviadero tipo laberinto de Presa Sayano-Shusenskaya.....	37
Figura 10. Partes de principales de un vertedero .....	39
Figura 11. Aliviadero en forma de engranaje que se pretende diseñar con parámetros geométricos del aliviadero.....	48
Figura 12. Canal de prueba hidráulica de laboratorio .....	49
Figura 13. Bosquejo del esquema de equipos del laboratorio Canal de prueba hidráulica.....	50
Figura 14. Medidor de caudales Streamflow 430, marca Nixon.....	51
Figura 15. Medidor regla graduada de tirante en canal de prueba .....	52
Figura 16. Gráfico de Distribución de t - Student.....	58

Figura 17. Relación entre el coeficiente de descarga ( $C_d$ ) y la descarga ( $Q$ ) de las configuraciones C1a1, C1a2, C1a3 y C1a4. ....	72
Figura 18. Relación entre el coeficiente de descarga ( $C_d$ ) y la descarga ( $Q$ ) de las configuraciones C2a1, C2a2, C2a3 y C2a4. ....	72
Figura 19. Relación entre el coeficiente de descarga ( $C_d$ ) y altura relativa del aliviadero ( $H1/P$ ) de las configuraciones C2a1, C2a2, C2a3 y C2a4. ....	73
Figura 20. Relación entre el coeficiente de descarga ( $C_d$ ) y altura relativa del aliviadero ( $H1/P$ ) de las configuraciones C2a1, C2a2, C2a3 y C2a4. ....	74
Figura 21. Descarga fluyendo a través de brechas. ....	77
Figura 22. Descarga fluyendo por encima de los engranajes. ....	78
Figura 23. los pasos para seguir la validación de la hipótesis. ....	80
Figura 24. Estadístico de prueba en t - Student , Si existe la relación entre coeficiente de descarga y la descarga. ....	86
Figura 25. Estadístico de prueba en t - Student , Si existe la relación entre la descarga y $H1/P$ . ....	87
Figura 26. Estadístico de prueba en t-Student , Si Existe diferencia entre el coeficiente de descarga de aliviadero en forma de engranaje y aliviadero lineal. ....	87
Figura 27. Estadístico de prueba en t - Student la ecuación de coeficiente de descarga para un aliviadero en forma de engranaje permite calcular $C_d$ . ....	88
Figura 28. Histograma de error de $C_d$ de vertedero en forma de engranaje. ....	92

## CONTENIDO DE ECUACIONES

Ecuación 1. Coeficiente de descarga según teorema de Torrecelli .....	12
Ecuación 2. Términos de gasto de la descarga.....	13
Ecuación 3. Coeficiente de descarga con términos de gasto.....	14
Ecuación 4. Principio de derivación del perfil de cresta delgada .....	20
Ecuación 5. Principio de derivación del perfil de cresta delgada .....	21
Ecuación 6. La trayectoria de según WES .....	22
Ecuación 7. Elaboración de la elipse según Murphy .....	23
Ecuación 8. El perfil aguas abajo se ajustaba a la ecuación.....	24
Ecuación 9. Flujo desendiente Hages .....	26
Ecuación 10. General de un aliviadero .....	28
Ecuación 11. La velocidad de contracción.....	28
Ecuación 12. La velocidad de aproximación .....	29
Ecuación 13. Para caudal de vertederos muy altos .....	29
Ecuación 14. Coeficiente de descarga adimensional .....	29
Ecuación 15. Inclinación de la cara corriente arriba .....	32
Ecuación 16. Comparación con la de una cresta que de otro.....	33
Ecuación 17. La fórmula clásica básica de orificios .....	40
Ecuación 18. Considerando la velocidad de llegada despreciable.....	40
Ecuación 19. Considerando la velocidad de llegada.....	42
Ecuación 20. Fórmula de Kindsvater y Carter .....	43
Ecuación 21. Fórmula de Rehbock .....	43
Ecuación 22. Considerando velocidad de llegada Rehbock.....	43
Ecuación 23. Fórmula de Bazin corregida por Hegly .....	44

Ecuación 24. Considerando la velocidad de llegada Bazin.....	44
Ecuación 25. Fórmula de Francis.....	44
Ecuación 26. Considerando la velocidad de llegada de Francis .....	44
Ecuación 27. Fórmula de King.....	45
Ecuación 28. Considerando la velocidad de llegada de King .....	45
Ecuación 29. Fórmula de la Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos.....	45
Ecuación 30. Fórmula de Harris.....	45
Ecuación 31. Considerando la velocidad de llegada Harris.....	55
Ecuación 32. Estadístico de prueba t-Student .....	57
Ecuación 33. Fórmula pa ra determinar el valor crítico.....	58
Ecuación 34. Fórmula general para determinar la descarga .....	59
Ecuación 35. Fórmula para determinar carga estatica .....	59
Ecuación 36. La relación de aliviadero lineal y tipo engranaje .....	60
Ecuación 37. Fórmula para Cd para aliviadero tipo engranaje .....	75
Ecuación 38. Ecuación de continuidad .....	78
Ecuación 39. Para que fluye dentro de las brechas .....	78
Ecuación 40. Para que fluye encima de engranajes .....	78
Ecuación 41. Altura estática cuando fluye entre las brechas. ....	79
Ecuación 42. Altura estática cuando fluye encima de engranajes .....	79
Ecuación 43. Fórmula conbinada en el aliviadero .....	79
Ecuación 44. Fórmula simplicada de la descarga .....	79
Ecuación 45. Estadístico de prueba t-Student .....	81
Ecuación 46. Ecuación de continuidad .....	95

## CONTENIDO DE APÉNDICES

Apéndice A. Panel fotográfico .....	105
Apéndice B. Tabla de t-Student .....	107

## RESUMEN

Se ha realizado un estudio de características hidráulicas de un aliviadero en forma de engranaje de una represa, a si mismo se realizó experimentos metódicos de engranajes con diferentes alturas de baja velocidad (C1) y alta velocidad (C2), ocho configuraciones se fueron variando los parámetros de engranajes: ancho (a), distancia (b) y altura (c) y un aliviadero en forma lineal que se utilizó como patrón, en lo cual se estudió el efecto de diversos parámetros en la capacidad de la descarga (Q). También se pudo observar que el tamaño de engranajes influye en la variación de coeficiente de descarga (Cd), cuando la descarga es constante con valores mayores a/b y a/c tenía un valor menor de coeficiente de descarga, También la capacidad de descarga es influenciada por la profundidad de agua ( $H_1$ ). Para el engranaje C1 y C2, cuando la descarga es inferior a  $60 \text{ m}^3/\text{h}$  entonces  $H_1 < 1$ , Cd aumenta significativamente con la descarga  $H_1/P$ , cuando descarga fue superior  $60 \text{ m}^3/\text{h}$  se mostró disminuciones lentas aumentando la descarga y  $H_1/P \leq 1$  y  $a/c \leq 1$  y aumentan lentamente con la descarga y  $H_1/P$  para  $a/b > 1$   $a/c > 1$ . Se determinó una fórmula de coeficiente de descarga (Cd) con datos estadístico regresión lineal múltiple para aliviaderos con forma de engranajes se estableció en base al principio de flujo de aliviadero, teniendo en cuenta la profundidad del agua en el aliviadero, la altura y el ancho del aliviadero y la altura del engranaje.

*Palabras clave:* Estudio experimental; capacidad de descarga; parámetro geométrico, aliviadero en forma de engranaje; parámetro geométrico, coeficiente de descarga.

## ABSTRACT

A study of hydraulic characteristics of a spillway in the form of a dam gear has been carried out, methodological experiments of gears with different heights of low speed (C1) and high speed (C2) were carried out, eight configurations were varied Gear parameters: width (a), distance (b) and height (c) and a spillway in a linear way that was used as a pattern, in which the effect of various parameters on the discharge capacity (Q) was studied. It was also observed that the size of gears influences the variation of the discharge coefficient (Cd), when the discharge is constant with values greater than  $\frac{1}{b} \frac{a}{c}$  had a lower value of the discharge coefficient, also the discharge capacity is influenced by the depth of water (H1). For gear C1 and C2, when the discharge is less than  $60 \text{ m}^3 / \text{h}$  then  $H1 < 1$ , Cd increases significantly with the discharge  $H1 / P$ , when discharge was higher  $60 \text{ m}^3 / \text{h}$  slow decreases were shown increasing the discharge and  $H1 / P \leq 1$   $a / c \leq 1$  and increase slowly with the discharge and  $H1 / P$  for  $a / b > 1$   $a / c > 1$ . A formula of discharge coefficient (Cd) was determined with statistical data multiple linear regression for spillways with Gear shape was established based on the spillway flow principle, taking into account the depth of the water in the spillway, the height and width of the spillway and the height of the gear.

*Keywords:* Experimental study; discharge capacity; geometric parameter, spillway in the form of gear; geometric parameter, coefficient.

## INTRODUCCIÓN

El experimento de la descarga de flujo con diferentes caudales se efectuó la investigación experimental del aliviadero en forma de engranaje en un laboratorio de hidráulica, obteniendo los resultados de diferentes ensayos experimentales la cuales se varió los parámetros geométricos de aliviadero en forma de engranaje y también las descargas, además la importancia de estudiar estos tipos de aliviaderos de flujo compuesta los que fluyen dentro de las separaciones de engranajes y los que fluyen encima de los engranaje donde presenta dos tipos de trayectoria se requiere uso de canal hidráulico de prueba para ver los comportamientos de los flujos.

Un aliviadero es una de las estructuras hidráulicas más utilizadas en canales, bocatomas y represas, con diferentes tipos de vertedero: delgada, ancha y corta. Diferentes tipos de aliviaderos son ampliamente utilizados en todo el mundo. Por ello se realizaron varios estudios en los cuales se han centrado en el coeficiente de descarga ( $C_d$ ), para lo cual han desarrollado varias fórmulas experimentales para evaluar el coeficiente de descarga.

El aliviadero en forma de engranaje es artístico por su forma de engranajes y también es útil para caudales de descarga pequeñas. Este tipo de aliviadero tiene dos características principales: el aliviadero en forma de engranaje consiste en engranajes en una estructura; a baja descarga, el agua fluye a través del aliviadero entre engranajes mientras que no fluye agua sobre la cresta de los engranajes y, por lo tanto, el engranaje se puede utilizar como puente. Sin embargo, las características



hidráulicas de los aliviaderos en forma de engranaje aún no se han estudiado no se encuentra bibliografía propicia.

La importancia de estudiar estos aliviaderos de flujo compuesto; los que fluyen por separaciones de engranajes y los que fluyen encima de engranajes radica en diseñar una alternativa de aliviadero que solucione problemas más comunes en la estructura de los aliviaderos (colapso de aliviaderos en las represas) ya existentes en nuestro país mediante fórmulas, conceptos teóricos, experimentos de laboratorio que puedan dar como resultado de una solución al problema principal que se plantea en esta investigación.

Con el propósito de determinar la relación entre el coeficiente de descarga y los parámetros geométricos de los aliviaderos en forma de engranaje, una serie de experimentos se llevaron a cabo en este estudio de descarga en el aliviadero planteada. Sobre la base de la mecánica de fluidos e hidráulica del flujo del aliviadero se desarrolló una fórmula semi-experimental del coeficiente de descarga para sección planteada en esta investigación.

También podemos resaltar los aliviaderos de teclas de piano, en donde los diferentes parámetros geométricos han recibido mucha atención (Lempérière y Ouamane, 2003). En la presa Goulours, se estableció por primera vez un aliviadero Teclas de Piano con un coeficiente de descarga cuatro veces más grande que el de un aliviadero lineal clásico (Laugier, 2007). La Universidad de Lieja (Epicum, Laugier, Pfister, Piroton, Cicero y Schleiss, 2013) llevaron a cabo estudios sobre presas con aliviadero teclas de piano en sucesión, que se centraron en las curvas de flujo de salida y los impactos de los parámetros geométricos del aliviadero en la

capacidad de descarga. Estos estudios mostraron que la relación entre la longitud de la cresta y el ancho del canal, la altura relativa del agua y la relación de ancho de canal de la entrada a la salida son los factores principales en el desbordamiento. De acuerdo con estos estudios, los investigadores he intentado establecer una fórmula adecuada del coeficiente de descarga.

Existen muchos trabajos sobre la determinación del coeficiente de descarga para flujos a superficie proponen ecuaciones para flujo libre y ahogado. Existe además la deducción clásica de ecuaciones de descarga para vertedores de cresta ancha en canal rectangular (Henderson, 1966).

Libre y en diferentes documentos se pro Se pretende plantear una alternativa de aliviadero que solucione problemas más comunes en la estructura de los aliviaderos (colapso de aliviaderos en las represas) ya existentes en nuestro país mediante fórmulas, conceptos teóricos, experimentos de laboratorio que puedan dar como resultado una solución al problema principal que se plantea en esta investigación.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. Descripción de la realidad del problema**

En la cuenca Chili el 60 % de las represas ubicadas en la región Arequipa del río Colca Caylloma los embalses de Pañe Sumbay, embalse Dique los Españoles, embalse de Aguada blanca, embalse de El Frayle han sufrido un colapso en estructura de descarga (los aliviaderos). Mayoría de los casos por producto cavitación en la máxima avenida ocasionando contaminación en los ríos y provocando inundaciones considerables (Técnico de Consenso de Recursos Hídricos de Cuenca [CNHC], 2018).

Durante los últimos años, los intereses por conocer el comportamiento hidráulico de aliviaderos de diferentes tipos han aumentado, debido al desarrollo de nuevas técnicas constructivas, aplicación de nuevo materiales y a los bajos costos con relación a la alta eficiencia en la disipación de energía hidráulica obtenida (Chow, 1959).

Muchos métodos han sido propuestos para representar el comportamiento hidráulico de los regímenes de flujo saltante y flujo rasante; sin embargo,

dependiendo de los enfoques y metodologías empleadas, varían los resultados alcanzados (Chanson, 2000).

Se citan diferentes ecuaciones de descarga para vertedores por métodos empíricos. En dichas ecuaciones se observa la dificultad al pasar de un régimen a otro, con coeficientes empíricos que conserven su validez cuando ocurre dicho cambio de régimen. En general, para las estructuras de control y extracción no existe una ecuación de descarga que trabaje de forma adecuada en todos los regímenes de funcionamiento impuestos por la dinámica del flujo en los canales de riego. Una ecuación de descarga con varianza para los diferentes regímenes es útil para su acoplamiento con la dinámica del flujo en el canal (Sotelo, 1999).

El propósito de este experimento fue estudiar el coeficiente de descarga, desde un punto de vista experimental y teórico, y abordar su varianza para diferentes aliviaderos y en diferentes regímenes de funcionamiento, posibilidad que se abre a través del enfoque estadístico en función de correlación a partir de la ecuación de Navier - Stokes; aproximando hasta la doble correlación y suprimiendo desde la triple correlación (correlación entre tres componentes) en adelante y bajo la hipótesis. En consideración de que este tipo de aliviaderos tipo engranaje pueden ser utilizados como estructuras de control y tomando en cuenta que este tipo de estructura en el país no han sido desarrollado, se hace necesario contar con un conocimiento básico de las condiciones de flujo; los cuales al contrastarlos con la literatura e investigaciones realizadas se pueda obtener parámetros para el dimensionamiento de estas estructuras hidráulicas.

## **1.2. Definición del problema**

### **1.2.1. Problema general.**

¿Cuál es la relación de la descarga, coeficiente de descarga y los parámetros geométricos de un aliviadero en forma de engranaje?

### **1.2.2. Problemas específicos.**

¿Qué relación tiene el coeficiente de descarga ( $C_d$ ), con la descarga ( $Q$ ), carga relativa en el aliviadero ( $H_1/P$ ) y los parámetros geométricos del aliviadero  $b$  y  $c$ ?

¿Cuál es la diferencia entre la capacidad de descarga de un aliviadero en forma de engranaje ( $Q$ ) y aliviadero lineal ( $Q_L$ )?

¿Cuál es la ecuación que se obtiene para determinar el coeficiente de descarga ( $C_d$ ) de un aliviadero en forma de engranaje?

## **1.3. Objetivos de la investigación**

### **1.3.1. Objetivo general.**

Determinar la relación entre la descarga, coeficiente de descarga y los parámetros geométricos de un aliviadero en forma de engranaje.

### **1.3.2. Objetivos específicos.**

Determinar la relación entre el coeficiente de descarga ( $C_d$ ), la descarga ( $Q$ ), carga relativa en el aliviadero ( $H_1/P$ ) y los parámetros geométricos del aliviadero  $b$  y  $c$ .

Comparar la capacidad de descarga entre aliviadero en forma de engranaje ( $Q$ ) y aliviadero lineal ( $Q_L$ )

Determinar la ecuación de coeficiente de descarga ( $C_d$ ) para un aliviadero en forma de engranaje.

#### **1.4. Justificación**

El caudal de descarga en una represa es muy importante para la regulación de flujo en las máximas avenidas, lo que altera los volúmenes de amortiguamiento y caudal de descarga. En nuestro país existe diversidad de obras como las represas las cuales previa su construcción requirieron de un diseño.

Al no haberse encontrado estudios específicos sobre las características del flujo a través de aliviaderos se sección variable (tipo engranaje) para cargas pequeñas ( $H_1/P < 1$ ) en la bibliografía disponible, es indispensable realizar ésta investigación, presentando una nueva alternativa para el diseño de la estructura vertiente, donde su perfil forma de engranajes sobresale permitiendo que el flujo siga su contorno, direccionando la lámina que pasa por el aliviadero, siendo ( $H_1$ ) la carga sobre la cresta del aliviadero, ( $P$ ) el altura del aliviadero de perfil delgada, a el ancho de engranaje, ( $b$ ) distancia entre engranajes y ( $c$ ) altura de engranajes.

En la presente contribución muestra una alternativa de utilizar aliviadero forma de engranaje mejoraría las disipaciones de energía como se han presentado en la ecuación definitiva del coeficiente de descarga ( $C_d$ ). Dichas ecuaciones son válidas dentro del rango en que fueron realizadas los ensayos de laboratorio.

#### **1.5. Alcances y limitaciones**

##### **1.5.1. Alcance.**

El alcance principal es diseñar una alternativa de aliviadero que solucione problemas más comunes en la estructura de los aliviaderos ya existentes en nuestro país mediante fórmulas, conceptos teóricos, experimentos de laboratorio que

puedan dar como resultado una solución al problema principal que se plantea en esta investigación.

### 1.5.2. Limitaciones.

La limitación que se tiene es que, en la práctica de ingeniería, un aliviadero en forma de engranaje tiene muchos otros parámetros geométricos complicados por presentar sesiones compuestas que a la vez forma dos trayectorias de flujo (curvas de cimacio) que no se harán y discutirán en este estudio, además solo se considerara la salida libre. Otra limitación es que estudios con este tipo de aliviadero no se realizaron hasta el momento, por lo cual no se cuenta con referencias bibliográficas específicas, ni datos para poder discutir los posibles resultados obtenidos.

### 1.6. Variables

#### 1.6.1. Operacionalización de variables.

La operacionalización de variables independientes, dependientes e intervinientes se muestra en siguiente tabla:

**Tabla 1**

*Operacionalizacion de variables*

<b>Variables</b>	<b>Definición operacional</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>
Variable independiente Aliviadero en Forma de engranaje y lineal. Parámetros geométricos	Permite la evacuación de aguas sobrantes cuando la represa está colmado	C1(engranaje de baja velocidad). C2(engranaje de alta velocidad).	Ocho esquemas experimentales en forma de engranaje y una esquema de aliviadero lineal
Variable dependiente Coeficiente de descarga y descarga	Es un factor adimensional que permite calcular la descarga	Caudal aguas arriba y aguas abajo	$0 > Cd < 1$
Variable interviniente Temperatura y Tensión Superficial	Es una magnitud que refleja la cantidad de calor. Las moléculas de un líquido se atraen entre sí. Por la variación de la altura	Alta y baja	Variación de la altura con respecto a nivel del mar

## **1.7. Hipótesis de la investigación**

### **1.7.1. Hipótesis general.**

Existe relación entre el coeficiente de descarga, la descarga y los parámetros geométricos de un aliviadero en forma de engranaje.

### **1.7.2. Hipótesis específicas.**

Existe relación entre el coeficiente de descarga ( $C_d$ ), la descarga ( $Q$ ), carga relativa en el aliviadero ( $H_1/P$ ) y los parámetros geométricos del aliviadero ( $b$ ) y ( $c$ ).

Existe diferencia significativa entre la capacidad de descarga entre aliviadero en forma de engranaje ( $Q$ ) y un aliviadero lineal ( $Q_L$ ).

La ecuación del coeficiente de descarga para un aliviadero en forma de engranaje se obtiene utilizando los parámetros geométricos estudiados que permite calcular coeficiente de descarga ( $C_d$ ).



## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de la investigación

En el caso de aliviaderos de cresta lineal, muchos estudios se han centrado en la evaluación del coeficiente de descarga en los primeros tiempos con el desarrollo de métodos experimentales, los impactos de la tensión superficial en la capacidad de descarga y la influencia (Wang, 2002).

Investigó el área en un aliviadero de placas delgadas basado en la observación y análisis de datos experimentales, se han propuesto técnicas útiles para evitar que el agua desgaste el aliviadero, lo que ha mejorado la precisión de medición de las características hidráulicas alrededor del aliviadero (Peng, Li, Wang y Wu, 2002).

Una técnica fotográfica de baja velocidad tiene se ha utilizado para registrar las características de flujo aguas arriba y aguas abajo de un aliviadero de cresta cimacio triangular y algunos las fórmulas anteriores de coeficientes de descarga se han mejorado de manera efectiva y conveniente (Bautista, Robles, Júnez y Playun, 2014).

En cuanto a la presa de cresta delgada, la velocidad promedio en la cresta, en lugar de la descarga, se ha utilizado como clave parámetro para establecer una relación entre la borde de agua en la cresta y los parámetros geométricos del aliviadero de la presa (Gharahjeh, Aydin y Altan, 2015).

Muchos investigadores han llevado a cabo estudios sobre aliviaderos de cresta ancha en China. Un método de inmersión crítico ha sido utilizado para calcular la descarga sobre aliviaderos de cresta ancha (Yu, 1998).

Algunas fórmulas experimentales se han desarrollado para calcular la capacidad de descarga con flujo sumergido sobre aliviaderos de cresta ancha, en términos de los experimentos de Berezinskii, el método de la capa límite se ha utilizado para analizar el coeficiente de descarga para simplificado de presas de cresta ancha (Wang y Zhang, 2012).

Fórmulas de cálculo de descarga para aliviaderos libres de cresta también han sido desarrollados, el salto hidráulico crítico con orificio fluye sobre un aliviadero de cresta amplia también se ha estudiado (Yang, Liang, Fan y Wu, 2010).

Las presas de cresta delgada y las presas de cresta gruesa se utilizan comúnmente en la ingeniería práctica. Una comparación de diferentes presas coloniales fue llevada a cabo por la Oficina de Recuperación de los EE. UU. United States Bureau of Reclamation (USBR) y fórmulas para el coeficiente de descarga de algunos aliviaderos existentes con puntos de venta gratuitos establecidos (Qi, Meng y Shan, 2002).

Estación Experimental de Vías Navegables del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. (WES) presentó un nuevo tipo de aliviadero llamado aliviadero

WES en la década de 1940, que pronto entró en uso común. Aliviaderos WES se aplicaron por primera vez en estructuras hidráulicas como presas, aliviaderos e ingeniería de esclusas en China en la década de 1970. Otro tipo de aliviadero práctico, es ampliamente utilizado en la ingeniería hidráulica de pequeño y mediano tamaño. El rango de la aplicación de aliviaderos basados en experimentos y logros de otras investigaciones ha sido analizado (Tong, Ai y Ding, 2002).

El coeficiente de descarga de este tipo de aliviadero se ve afectado por el espesor relativo y la altura de los aliviaderos, así como la pendiente aguas abajo, y una serie de fórmulas experimentales para calcular el coeficiente de descarga de diferentes aliviaderos se deduce en base a estudios previos (Zhang, Zhai, Miao y Hou, 2010).

La relación entre la descarga coeficiente de flujo sumergido y parámetros geométricos de las presas fueron presentados por Tullis los aliviaderos de laberintos, que se usan ampliamente en estructuras hidráulicas de poca altura, aparecieron por primera vez en el siglo XX. Sin embargo, el estudio sistemático de las presas del laberinto comenzó en la década de 1970. Un método de diseño factible basado en experimentos fue propuesto por (Hay y Taylor 1970).

Debido a la importancia práctica de los aliviaderos laberínticos, el United States Bureau of Reclamation (USBR) llevó a cabo una serie de pruebas hidráulicas antes de construir la presa de Utah y el aliviadero de laberinto adjunto, y por lo tanto un método de diseño más eficaz fue desarrollado (Wang y Shu, 1989).

Las presas con presas laberínticas pronto se hicieron populares en los EE. UU. y Australia. En China, el aliviadero del laberinto se ha estudiado y utilizado

desde la década de 1980 y se utiliza comúnmente en la actualidad. Experimentos se han llevado a cabo aliviaderos rectangulares de laberintos, y se han resumido las ventajas económicas, mientras que él también se ha presentado el coeficiente de descarga de un aliviadero de laberinto rectangular con flujo libre (Kabiri, Javaheri y Borghei, 2013).

La función radial base de la red neuronal y las ecuaciones basadas en la optimización de enjambre de partículas se han aplicado a cálculo de la capacidad de descarga de un aliviadero de laberinto triangular con pocos errores (Zaji, Bonakdari y Karimi, 2015).

Con respecto a las presas de teclas de piano, diferentes parámetros geométricos han recibido mucha atención (Lempérière y Ouamane, 2003). En la presa Goulours, se estableció por primera vez un aliviadero con un aliviadero de teclas de piano con un coeficiente de descarga cuatro veces más grande que el de un aliviadero lineal clásico (Laugier, 2007).

Universidad Estatal de Utah (Anderson, 2011), Lausana La Universidad Politécnica Federal (Ribeiro, Pfister, Schleiss y Boillat, 2012) y la Universidad de Lieja (Epicum, Laugier, Pfister, Pirotton, Cicero y Schleiss, 2013) llevaron a cabo estudios sobre presas teclas de piano en sucesión, que se centraron en las curvas de flujo de salida y los impactos de los parámetros geométricos del aliviadero en la capacidad de descarga. Estos estudios mostraron que la relación entre la longitud de la cresta y el ancho del canal, la altura relativa del agua y la relación de ancho de canal de la entrada a la salida son los factores principales en el desbordamiento. De acuerdo con estos estudios, los investigadores he intentado establecer una

fórmula adecuada del coeficiente de descarga. En China, experimentos en diferentes tipos de presas de tecla de piano se han llevado a cabo (Geng y Sun, 2006).

En base a estudios previos, la fórmula de capacidad de descarga de un aliviadero tecla de piano fue establecido a través de análisis adimensional y optimización de parámetros (Guo, Yang, Xia y Fu, 2014).

Salió a la luz el trabajo de Warnock, en el cual por primera vez se dan las coordenadas relativas de la lámina vertiente sobre un vertedor recto frontal de pared delgada y que tiene en cuenta la carga relativa sobre el vertedor en la forma  $h_v/H_o$ , siendo  $h_v$  la carga por velocidad en el canal de aproximación y la carga total sobre el vertedor  $H_o = H + V^2/2g$  (Warnock, 1939).

Más recientemente, a pequeña escala las estructuras hidráulicas en los canales urbanos, incluidos los aliviaderos en forma de engranaje, se utilizan cada vez más en la arquitectura del paisaje. El aliviadero en forma de engranaje es artístico por su estilo de engranaje y también es útil en sistemas de canales urbanos. Este tipo de aliviadero tiene dos características principales: el aliviadero en forma de engranaje consiste en engranajes en una estructura; a baja descarga, el agua fluye a través del aliviadero entre engranajes mientras que no fluye agua sobre la cresta de los engranajes, por lo tanto los engranajes se utilizan como puente. Sin embargo, las características hidráulicas de los diques en forma de engranaje aún no se han estudiado. Con el objetivo de determinar la relación entre el coeficiente de descarga y los parámetros geométricos de los diques en forma de engranaje, una serie de experimentos se llevaron a cabo en este estudio. Sobre la base de la mecánica

hidráulica del flujo del aliviadero, una fórmula semi-experimental del coeficiente de descarga fue desarrollado.

## 2.2. Bases teóricas

### 2.2.1. Coeficiente de descarga.

Para las condiciones del teorema de Torricelli, con la caída del tirante H-h, y las diferencias de energía a lo largo de las líneas de corriente  $DE = DK + DU$ , con C como coeficiente de Coriolis, se tiene (CHOW, 1994).

$\left(\frac{1}{2} \frac{Cv^2}{g} - 0\right) + (h - H) = \Delta E$  Para la pérdida de carga nula  $\Delta E = 0$ , entonces

$H = \frac{1}{2} C \frac{v^2}{g} + h$  De tal manera que el ancho unitario,  $A = h$ , el gasto es  $Q=Av$  o

$Q = h \sqrt{\frac{2g}{C} (H - h)}$  La cual puede formularse como la ecuación:

$$Q = \sqrt{\frac{2g}{C} H^3 \left(\frac{h}{H}\right) \left(1 - \frac{h}{H}\right)^{1/2}} \dots\dots\dots[\text{Ecuación 1}]$$

Donde:

Q = Caudal m<sup>3</sup>/s

g = Fuerza der gravedad

C = Coeficiente de Coriolis

H = Profundidad estática m

h = Tirante en el aliviadero

Dado que el coeficiente de Coriolis es mayor que 1, y puede llegar a acercarse al valor 2, su efecto puede interpretarse como un reforzamiento del

número de Froude, visto como una intensificación de la inercia o un debilitamiento de la gravedad. En forma adimensional, el gasto, para un vertedor de cresta ancha en canal de sección rectangular, es  $Q = \sqrt{C} \frac{Q}{\sqrt{2gH^3}} = \left(\frac{h}{H}\right) \left(1 - \frac{h}{H}\right)^{1/2}$  (Ramirez, 1997).

Que tiene la forma  $Q = \left(\frac{h}{H}\right)^{2-1} \left(1 - \frac{h}{H}\right)^{\frac{3}{2}-1}$  para definir el caudal máximo, según el cambio del régimen de funcionamiento, se aplica el principio de mínima energía en la ecuación adimensional y se obtiene la condición de régimen,

$$\left(\frac{h}{H}\right) = \frac{1}{1+1/2} = \frac{2}{3} \text{ La moda, con lo cual se puede definir.}$$

$$Q = \frac{\left(\frac{h}{H}\right)^{2-1} \left(1 - \frac{h}{H}\right)^{\frac{3}{2}-1}}{\frac{2}{3} \left(\frac{1}{3}\right)^{1/2}}, 0 < \frac{h}{H} < \left(\frac{h}{H}\right)_{cr} \dots\dots\dots [\text{Ecuación 2}]$$

Por lo que la ecuación debe formularse en términos de un gasto adimensional, adoptando una forma que generalice el gasto derivado del teorema de Torricelli.

$$Q = \left(\frac{h}{H}\right)^{a-1} \left(1 - \frac{h}{H}\right)^{b-1}$$

Desde el punto de vista de la teoría de probabilidades, el factor  $(1-h/H)^{b-1}$  se ve como proporcional al flujo (volumen) por unidad de tiempo y por unidad de área y, por tanto, representa la densidad de corriente de probabilidad; en tanto, el factor  $(h/H)^{a-1}$ , como proporcional al área, representa la función de riesgo, por lo que el producto de los dos designa la probabilidad por unidad de tiempo, y donde  $h/H$  es la cota superior del dominio de los valores que puede asumir la variable aleatoria en el intervalo  $(-\infty, h/H)$ . Aunque es igualmente probable definir al

primero como el flujo y al segundo como el área, porque bastaría con hacer un cambio de variable y medir  $h/H$  de derecha a izquierda, y no al revés, como se acostumbra, lo que equivale al cambio  $h / H \rightarrow 1 - (h / H)$ ; en todo caso, uno de ellos representa al flujo de energía y el otro, al riesgo (Ramírez, 1997).

Se formula un coeficiente de descarga de la siguiente forma:

$$Cd = \frac{\left(\frac{h}{H}\right)^{a-1} \left(1-\frac{h}{H}\right)^{b-1}}{\left(\frac{h}{H}\right)_{cr}^{a-1} \left(1-\frac{h}{H}\right)_{cr}^{b-1}}, < \frac{h}{H} < \left(\frac{h}{H}\right)_{cr} \dots\dots\dots[\text{Ecuación 3}]$$

Se trata de una densidad beta re normalizada  $\frac{(h)^{a-1}(1-h)^{b-1}}{(h)_{cr}^{a-1}(1-h)_{cr}^{b-1}}$  de tal manera que  $h = h_{cr}$  valga 1, por lo que queda normalizada por su máximo y no por el área debajo de la curva, como se acostumbra con la densidad beta. Ésta es la función de distribución más probable en el sentido del principio de mínima energía y queda determinada por la relación beta re normalizada ( $c$ ), definida hasta el cambio de régimen.

En la sección de exposición de los prototipos e ilustra su aplicación al vertedor de cresta ancha, de cresta aguda, de compuerta, etcétera.

Se conoce el comportamiento característico de la energía específica de una sección, que muestra un sub rango dado por una función creciente de la energía con el tirante, el flujo sub crítico o lento; otro sub rango con una función decreciente con el tirante es el flujo supercrítico o rápido; un punto que los separa y a la vez los une corresponde al tirante crítico, y al mínimo de la energía con respecto al tirante. El tirante puede adimensionalizarse con el tirante crítico, definiendo  $h/h_c$  (Rocha, 2007).



### **2.2.2. Parámetros geométricos del aliviadero.**

Los parámetros son las características que presenta todos los aliviaderos construidos, esto puede ser fácilmente comprobado al utilizar las ecuaciones de semejanza hidráulica empleadas en la modelación física, en el caso de que la fuerza predominante sea la gravedad, ya que la coincidencia de que exista el par de datos  $Q, H$  es poco probable y no refleja todas las condiciones reales, topográficas e hidrológicas para el correcto diseño del aliviadero. Precisamente esta situación llevó a la necesidad de modelar constantemente los aliviaderos de abanico, al no estar generalizada la metodología, se debe subrayar principalmente la situación de que, si los valores en planta pueden ser determinados, aunque sea de una forma burda, los valores en la vertical, con la ayuda de este cuadro, son imposibles de cuantificar, otra gran insuficiencia del método de cálculo es la no existencia de recomendaciones para el diseño del perfil práctico del vertedor. Estos vertedores se deben proyectar según las coordenadas de Creager (Ulloa, 1956).

La debilidad de esta adopción es evidente, como es evidente y sobradamente importante el papel que juega en estos vertedores. Esta cuestión será analizada con más detalle en la próxima sección, donde se presentan las diferentes formas para determinar las coordenadas del perfil de la lámina vertiente para vertedores rectos en planta de diferentes alturas (Creager, Justin, y Hinds, 1945).

### **2.2.3. Represa.**

En el Reino Unido, el nombre de presa se le da a una estructura construida a través de un valle para formar un lago artificial como un depósito de agua. Hay numerosas variantes algunos embalses se forman en tierras relativamente planas construyendo

presas largas para circunda las áreas requeridas (United States Bureau of Reclamation [USBR], 1987).

#### **2.2.4. Aliviadero.**

Un aliviadero es una estructura hidráulica que conforman una represa, que pasa los flujos normales (operacionales) y/o de inundación de una manera que protege la integridad estructural de la presa y/o los diques (USBR, 1987).

El aliviadero se encuentra entre las estructuras más importantes de un proyecto de presa. Proporciona el proyecto con la capacidad de liberar exceso o inundación de agua de manera controlada o incontrolada para garantizar la seguridad del proyecto. Es de suma importancia para las instalaciones del aliviadero para ser diseñado con la capacidad suficiente para evitar el desbordamiento de la presa, especialmente cuando se selecciona un tipo de represa de relleno de tierras o relleno rocoso para el proyecto. En casos donde la seguridad de los habitantes aguas abajo es una consideración clave durante el desarrollo del proyecto, el aliviadero debe diseñarse para acomodar la inundación máxima probable. Muchos tipos de aliviaderos se pueden considerar con respecto al costo, las condiciones topográficas, la presa altura, geología de cimentación e hidrología. El aliviadero discutido en este capítulo incluye desbordamiento, caída, canal lateral, orificio, campanario, laberinto, sifón, túnel aliviaderos de vertientes verticales, una sección sobre el diseño de aliviaderos que considera la cavitación y la aireación hidráulica, también está incluido (Wayne, Wei y Lindell, 2004).

### **2.2.5. Necesidad de un aliviadero.**

La función de un aliviadero se puede ilustrar mejor como emana del conocido argumento legal anterior. El hecho de despojar gran cantidad de agua detrás de una represa crea el peligro de una corriente de inundación que podría romperse, lo que podría tener consecuencias catastróficas. El diseño seguro de una presa para evitar un peligro de este tipo incluye un aliviadero, bien descrito como la válvula de seguridad del sistema de presa-reservorio (Khatsuria, 2005).

### **2.2.6. Importancia de un aliviadero.**

Un aliviadero está diseñado para evitar el derribo excesivo de una presa en un lugar que no está diseñado para el rebalse (Vischer y Rutschmann, 1988).

El reservorio se desbordará si su capacidad es menor que la diferencia entre los volúmenes de entrada y salida. Si una presa puede económicamente, hacerse lo suficientemente alta para proporcionar un espacio de retención por encima del nivel de suministro completo para absorber todo el volumen de la inundación del diseño de entrada, no se requeriría un aliviadero y una salida como una turbina o compuerta solo sería necesario para regular / utilizar el almacenamiento. De hecho, hay algunas represas donde los aliviaderos eran prescindibles o una instalación de aliviadero nominal era todo lo que se necesitaba (Moric ,1997).

Por encima de nivel de suministro completo, lo suficientemente grande como para absorber la inundación del diseño de entrada y, por lo tanto, se requiere un dispositivo especial para superar la cantidad extra de agua, es decir, un aliviadero.

### **2.2.7. Funciones de un aliviadero.**

La función de un aliviadero se puede ilustrar mejor como emana del conocido argumento legal anterior. El hecho de despojar gran cantidad de agua detrás de una represa crea el peligro de una corriente de inundación que podría romperse, lo que podría tener consecuencias catastróficas. El diseño seguro de una presa para evitar un peligro de este tipo incluye un aliviadero, bien descrito como la válvula de seguridad del sistema de presa-reservorio (Khatsuria, 2005).

- Mantener las funciones normales del agua del río (suministro de agua de compensación).
- Descarga de agua para su utilización.
- Mantener el nivel inicial de agua en la operación de control de inundaciones.
- Controlando las inundaciones.
- Controlando inundaciones adicionales.
- Liberación de agua excedente (seguridad de la presa y el reservorio).
- Bajar los niveles de agua (agotando los niveles de agua en una emergencia).

### **2.2.8. Clasificación de aliviaderos.**

Los aliviaderos han sido clasificados de acuerdo a varios criterios (Sandoval, 2013).

#### **2.2.8.1. Según el rasgo más destacado.**

- Aliviadero de desbordamiento.
- Aliviadero con dirección a la corriente.
- Aliviadero del canal lateral.
- Aliviadero del eje.
- Sifón aliviadero.

- Aliviadero directo o alero.
- Aliviadero del túnel / aliviadero de alcantarilla.
- Aliviadero del laberinto.
- Aliviadero escalonado.

#### **2.2.8.2. Según la función.**

- Aliviadero de servicio.
- Aliviadero auxiliar.
- Tapón del fusible o aliviadero de emergencia.

#### **2.2.8.3. Según estructura de control.**

- Aliviadero cerrado.
- Aliviadero sin gas.
- Orificio de aliviadero de esclusa.

Han propuesto una clasificación más completa que busca incluir esencialmente todos los componentes del aliviadero: entrada, regulación o control, portador de descarga y salida (incluidos los adaptadores de energía) (Vischer y Rutschmann, 1988).

#### **2.2.8.4. Aliviadero de desbordamiento.**

Un aliviadero de desbordamiento puede ser cerrado o no, y normalmente proporciona flujo sobre una sección de presa de gravedad. El flujo permanece en contacto con la superficie de los aliviaderos (excepto posibles rampas de aireación) desde la cresta de la presa a las proximidades de su base. (Wayne, Wei y Lindell, 2004).

El aliviadero de desbordamiento es el tipo más común de aliviadero. Tiene un vertedero de control que es en forma de S. Es una estructura de gravedad que requiere una base sólida y está ubicada preferiblemente en el canal principal del río, aunque hay muchos aliviaderos ubicados en los flancos de los canales excavados debido a problemas con la fundación. La estructura se divide naturalmente en tres zonas: la cresta, la pendiente posterior y el dedo del pie. Debido a su alta eficiencia de descarga, el perfil en forma de napa se usa para la mayoría de las crestas de control de aliviaderos (Khatsuria, 2005).

**2.2.8.5. El perfil de cresta del aliviadero.**

Normalmente, la cresta tiene una forma que se adapta a la superficie inferior de la napa a partir de un vertedero de cresta aguda completamente aireado, como se muestra en la figura 1. Las presiones en la cresta serán atmosféricas. La forma de dicho perfil depende de la cabeza, la inclinación de la cara corriente arriba de la sección de rebosamiento y la altura de esa sección sobre el piso del canal de entrada. Bazin (1886 - 1888) realizó la primera investigación de laboratorio completa de formas de nuca. Las formas tempranas de la cresta usualmente se basaban en una parábola simple diseñada para ajustarse a la trayectoria de la napa que cae en la forma general en donde los valores de varias constantes han sido evaluados por Creager, Justin y Hinds, Ippen, Blaisdell y Grzywienski (1951) ha discutido ampliamente el desarrollo de varios perfiles (Khatsuria, 2005).

$$\frac{y}{H} = A \left(\frac{x}{H}\right)^2 + B \left(\frac{x}{H}\right)^2 + C + D \dots\dots\dots [\text{Ecuación 4}]$$

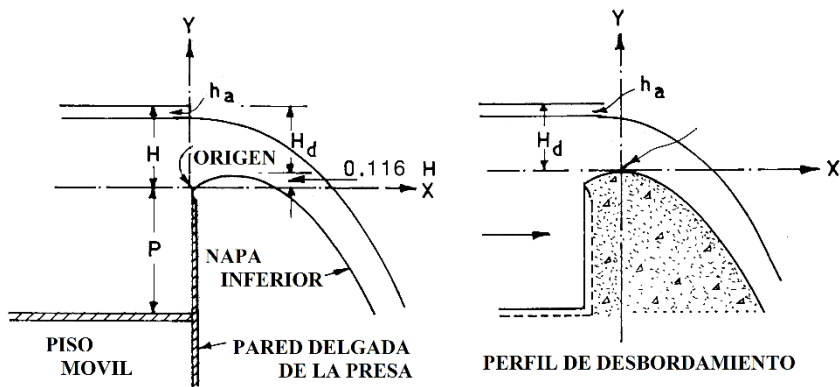


Figura 1. Principio de derivación del perfil de cresta delgada  
Fuente: Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators, 2005

Las formas de cresta se han estudiado ampliamente en los laboratorios hidráulicos United States Bureau of Reclamation (USBR) con varias profundidades de aproximación. Las superficies superior e inferior de la napa se midieron cuidadosamente para varias descargas y velocidades de aproximación. Sobre la base de datos experimentales, incluidos los de Bazin, la oficina ha desarrollado coordenadas de superficies de napa para presas inclinadas verticales y ascendentes.

Los resultados están bien documentados en la publicación de United States Bureau of Reclamation (USBR) “Design of Small Dams” (1960). Los archivos pro se definen según su relación con los ejes de coordenadas en el vértice de la cresta. La porción aguas arriba del origen se define como un arco circular compuesto. La parte aguas abajo está definida por la ecuación.

$$\frac{y}{H_d} = -K \left( \frac{x}{H_d} \right)^n \dots\dots\dots [\text{Ecuación 5}]$$

Donde:

H<sub>d</sub>: altura de diseño

K y n: son constantes cuyos valores dependen de la inclinación ascendente y la velocidad de aproximación.

Sobre la base de los datos del United States Bureau of Reclamation (USBR), el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU., World Education Services

(WES) en 1952, ha desarrollado varias formas estándar, designadas como formas de derrames estándar de World Education Services (WES), representadas en la parte inferior del eje de la cresta mediante la ecuación:

$$X^n = K(H_d)^{n-1}Y \dots\dots\dots[\text{Ecuación 6}]$$

Donde:

X e Y: son coordenadas del perfil de cresta con origen en el punto más alto de la cresta.

Cabezal de diseño HD que incluye el cabezal de velocidad del flujo de aproximación.

K y n: son parámetros que dependen de la pendiente de la cara corriente arriba.

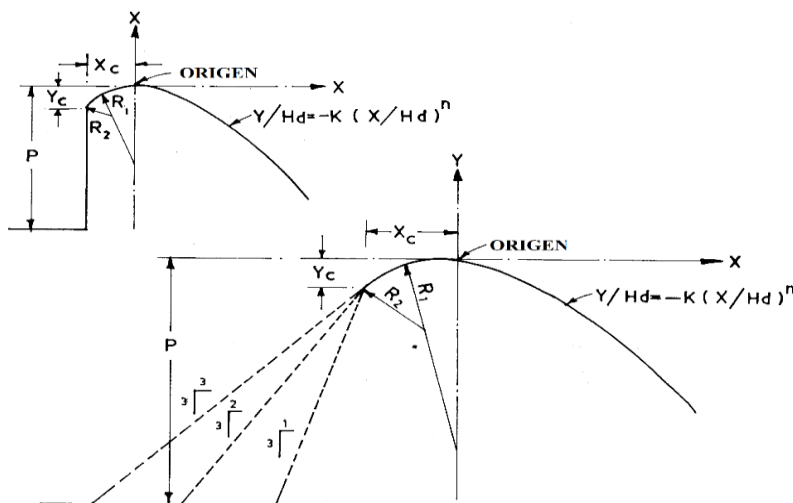


Figura 2. Se muestran el perfil típico de la cresta  
Fuente: Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators, 2005

Observó que no había un procedimiento universal simple para el diseño de crestas de aliviadero de desbordamiento y que los diseñadores seguían una serie de reglas si la profundidad de aproximación era profunda y otra si la profundidad de aproximación era superficial. Además, había diferentes conjuntos de reglas dependiendo de la inclinación de la cara corriente arriba del aliviadero. Murphy sintió la necesidad de eliminar la discontinuidad en la intersección de la cresta del



aliviadero y la cara aguas arriba de la presa. En el procedimiento revisado desarrollado por Murphy, utilizando los mismos datos básicos de USBR, el cuadrante anterior se configuró como una elipse con la ecuación (Murphy, 1973).

$$\left(\frac{X}{A}\right)^2 + \left(\frac{Y}{B}\right)^2 = 1 \dots\dots\dots [\text{Ecuación 7}]$$

Donde:

A: Eje semi mayor (funciones de la relación entre la profundidad de aproximación y la cabeza de diseño).

B: Eje semi menor.

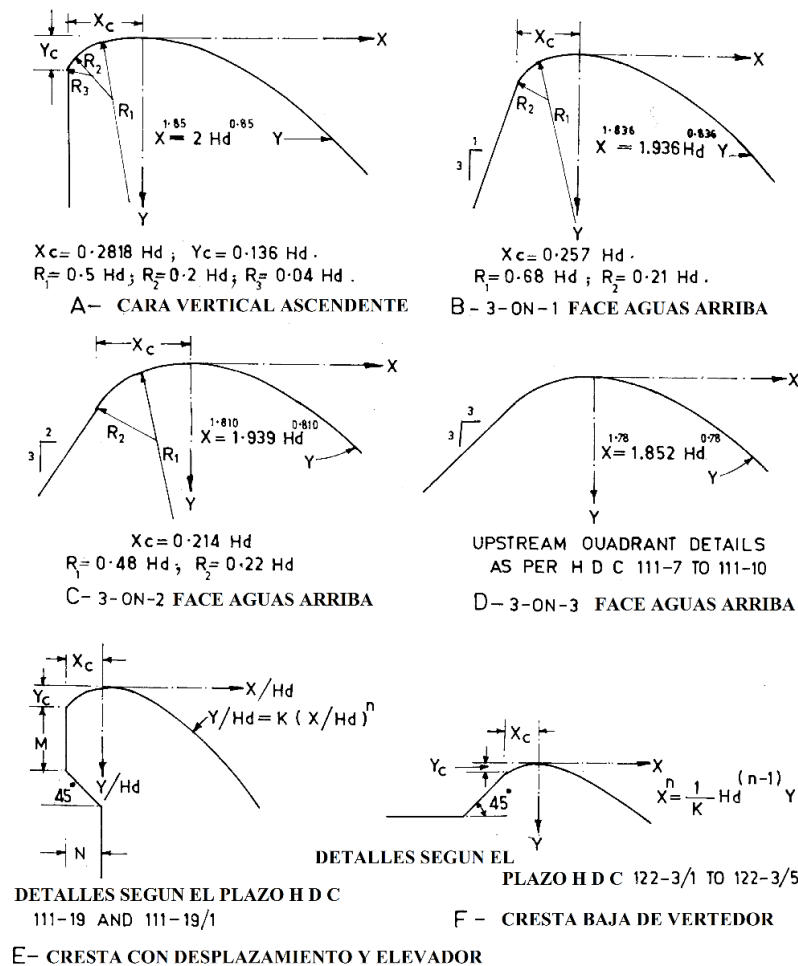


Figura 3. Faces de agua

Fuente: Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators, 2005

Perfil aguas abajo se ajustaba a la ecuación 8.

$$X^{1.85} = KH_d^{0.85}Y \dots\dots\dots[\text{Ecuación 8}]$$

Donde:

K es un parámetro que depende de la relación profundidad de acercamiento y cabeza de diseño.

Las curvas de diseño sugeridas por Murphy se reproducen en la figura 4 se vería que estas curvas cubren ambos parámetros de control, es decir, la cabeza de diseño y la cabeza de velocidad de aproximación, al mismo tiempo que facilitan cualquier pendiente de la cara ascendente deseada (incluida la vertical) sin introducir discontinuidad en la intersección de la cresta con la pendiente ascendente.

Para P/Hd 2, A y B se vuelven constantes con valores de 0,28 Hd y 0,164 Hd respectivamente.

Sería interesante ver cómo se comparan los tres perfiles. La tabla 2 muestra la comparación de los perfiles de dos casos típicos: un aliviadero de pared bajo (P/Hd = 0,5) y un aliviadero de alto desbordamiento (P/Hd = 4) para la misma profundidad de desbordamiento de 10 m y con cabezas apropiadas debido a la velocidad de aproximación.

Aunque los tres procedimientos para definir las formas de cresta descritos anteriormente se basan en el mismo conjunto de datos (es decir, USBR), existe cierta disimilitud. Mientras que los perfiles según los procedimientos USBR y WES (originales) muestran diferencias insignificantes, el perfil WES (Murphy) parece mostrar un cuadrante ascendente algo mayor que el de los otros dos perfiles,

especialmente para las caras ascendentes inclinadas. Esto se debe principalmente a la elaborada transición de un perfil elíptico a una cara ascendente en pendiente.

A veces, las crestas de aliviadero cuentan con compensaciones y elevadores para lograr una economía apreciable en la construcción de la gravedad del concreto o los derrames del dique del arco, siempre que la masa de hormigón eliminada de la forma de la cresta estándar no sea necesaria para la estabilidad estructural. WES (1952) ha desarrollado gráficos de diseño basados en los datos básicos del estudio de USBR de crestas sobresalientes producidas por un desplazamiento en una presa de cresta aguda. Las tablas de diseño se dan en HDC 111-19 a 111-19 / 2. En general, la profundidad de proyección vertical  $M$  debe ser igual a  $0,5 H_d$  y la relación de la columna ascendente ( $M$ ) al desplazamiento ( $N$ ) no debe ser menor a  $0,5$  a menos que este valor sea cero, en cuyo caso se obtiene un retroceso de  $45$  grados vertedero inclinado. Algunos de los vertederos provistos de canalización vertical y compensación son: Monteynard (Francia), San Esteban (España), San Jacinto (Bolivia) para presas de arco, Al Massira (Marruecos) para presas de contrafuertes y Ukai, Jawaharsagar (India) para presas de gravedad. Se han provisto aliviaderos con caras inclinadas hacia atrás en las presas de arco de teclas de piano. Presa de Roux (Sudáfrica) y presa de Victoria (Sri Lanka).

Todos los perfiles de cresta descritos anteriormente todavía tienen dos conjuntos de ecuaciones, es decir, una para el cuadrante de aguas arriba y otra para la de aguas abajo. (Hager, 1987) ha desarrollado una ecuación, que es aplicable a los dos cuadrantes dados por WES, es decir, arcos circulares compuestos de tres radios en sentido ascendente y la ecuación estándar para el flujo descendente

La ecuación de Hager es:

$$Z^* = -X \ln(X^*) \quad (X > -0,2818) \dots \dots \dots \text{[Ecuación 9]}$$

Donde:

$$X^* = 1,3055 (X + 0,2818)$$

$$Z^* = 2,7050 (Z + 0,136)$$

$$X = x/Hd; \quad Z = z/Hd$$

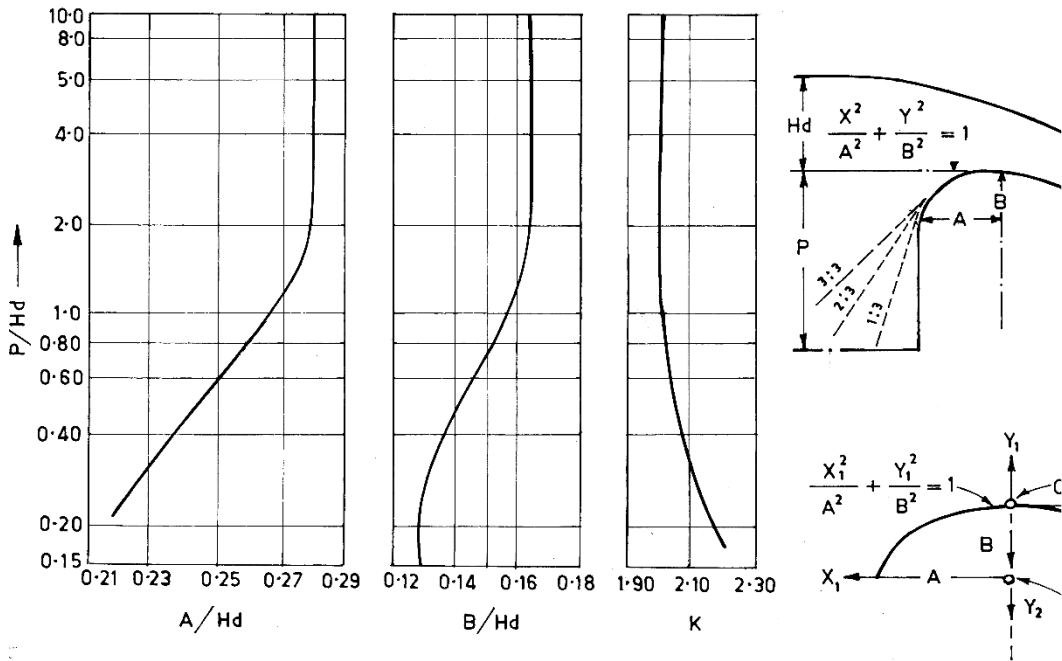


Figura 4. Curvas de diseño sugeridas por Murphy

Fuente: Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators, 2005

**Tabla 2***Comparación de aliviadero y perfiles de cresta*

<b>Caso I</b>		<b>Aliviadero de bajo desbordamiento: P=5m, Hd=10m, P/Hd =0,5</b>										
<b>U/S Face</b>	<b>USBR</b>			<b>N</b>	<b>WES (Original)</b>			<b>n</b>	<b>WES (Elíptico)</b>			
	<b>Xc</b>	<b>Yc</b>	<b>K</b>		<b>Xc</b>	<b>Yc</b>	<b>K</b>		<b>Xc</b>	<b>Yc</b>	<b>K</b>	<b>n</b>
Vertical	2,595	0,968	0,511	1,835	no definido				2,683	1,572	0,488	1,85
1 :3	2,465	0,836	0,511	1,815	no definido				2,633	1,271	0,488	1,85
2 :3	2,282	0,628	0,51	1,764	no definido				2,498	1,00	0,488	1,85
3 :3	2,139	0,463	0,51	1,748	2,135	0,445	0,524	1,748	2,314	0,777	0,488	1,85
<b>Caso II</b>		<b>Aliviadero de alto desbordamientos: P=40m, Hd=10m, P/Hd = 4</b>										
Vertical	2,817	1,242	0,5	1,868	2,818	1,36	0,5	1,85	2,800	1,64	0,5	1,85
1 :3	2,474	0,91	0,5	1,848	2,57	0,875	0,516	1,836	2,748	1,326	0,5	1,85
2 :3	2,161	0,667	0,53	1,795	2,14	0,75	0,516	1,810	2,608	1,043	0,5	1,85
3 :3	2,019	0,454	0,54	1,776	2,00	0,454	0,54	1,776	2,416	0,811	0,5	1,85

Fuente: Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators, 2005

Donde:

$$X^* = 1,3055 (X + 0,2818)$$

$$Z^* = 2,7050 (Z + 0,136)$$

$$X = x/Hd; Z = z/Hd$$

X y Z son coordenadas del perfil en el eje horizontal y vertical respectivamente. Y el origen está en la cresta. Las coordenadas al inicio del agua arriba. la cara vertical es (0,2818; 0,136) es decir, las mismas coordenadas para el estándar forma de la cresta WES.

Esta ecuación tiene la ventaja de ser suave y tener una curvatura gradualmente variada. La diferencia entre el perfil WES original y este perfil es solo alrededor del 1 % de la cabeza de diseño. Sin embargo no está claro. Si se puede aplicar el mismo a cualquier inclinación de la pendiente aguas arriba otra vertical o con contrahuella y offset, etc.

**2.2.8.6. Características de descarga.**

Al igual que en el perfil de la cresta, las características de descarga del aliviadero estándar también pueden derivarse de las características del vertedero de cresta aguda. La ecuación de vertedero en la forma.

$$Q = C_d \frac{2}{3} b \sqrt{2gH^3} \dots\dots\dots [Ecuación 10]$$

Contiene el coeficiente de descarga Cd que es el producto del coeficiente de contracción Cc y del coeficiente de velocidad Cv.

$$C_d = C_c * C_v \dots\dots\dots [Ecuación 11]$$

Para un vertedero infinitamente alto, la velocidad de enfoque es despreciable, el valor de Cv es la unidad y Cd toma el valor  $[\pi / (\pi+1)] = 0,611$ , como se deriva de la teoría del flujo potencial. La expresión más general para Cd derivada por Rehbock relaciona el efecto de la velocidad de aproximación en términos de altura de la presa, por lo tanto.

$$C_d = 0,611 + 0,08 \frac{H}{P} \dots \dots \dots [Ecuación 12]$$

Para el caso de vertedero muy alto, H/P se acerca a cero y la sustitución de la Ecuación 9 en la Ecuación 7 obtenida es lo siguiente:

$$Q = 1,804bH^{\frac{3}{2}} \dots \dots \dots [Ecuación 13]$$

H en la ecuación 10 se refiere a la cresta del vertedero de cresta aguda. Si se considera la cresta del aliviadero, la cabeza Hd en la cresta del aliviador se encuentra experimentalmente en aproximadamente 0,884 veces la cabeza en la cresta aguda. El coeficiente de descarga del aliviadero sería entonces igual a 2,17. La profundidad de desbordamiento Hd para esta condición se conoce como la cabeza de diseño para la cual se espera que las presiones sobre el perfil de cresta sean atmosféricas. Sin embargo, el aliviadero también tendrá que operar en cabezas más bajas o más altas. Lo primero dará como resultado presiones más altas que la atmosférica y un coeficiente de descarga más bajo; en este último, ocurrirá lo contrario.

El coeficiente de descarga Cd no es una cantidad adimensional. Su valor estándar para el jefe de diseño, en unidades británicas, es 3,98 que es equivalente a unidades métricas de 2,198. Sin embargo, es conveniente utilizar el coeficiente no dimensional C de la expresión.

$$Q = \frac{2}{3} C, L \sqrt{2gH^3} \dots \dots \dots [Ecuación 14]$$

El rango de variación de C es entonces de 0,578 correspondiente al vertedero de cresta ancha, a 0,75 aproximadamente, correspondiente al valor más alto posible sin exceder las presiones sub atmosféricas admisibles en la cresta.

La figura 5 muestra la variación del coeficiente de descarga con respecto a la cabeza para el aliviadero de alto desbordamiento con la cara vertical ascendente y la velocidad de aproximación despreciable para los perfiles de cresta que cumplen con USBR, WES (Original) y WES (Elliptical). Se verá que la variación entre los valores correspondientes a los tres perfiles es insignificante.

#### ***2.2.8.7. Factores que afectan el coeficiente de descarga.***

Los valores del coeficiente de descarga mencionados anteriormente son para el perfil de forma ideal que opera sin control y con una velocidad de aproximación despreciable; es decir, un valor muy alto de la relación  $P/H_d$ . El coeficiente está influenciado por una serie de factores tales como, (1) la relación de la forma real de la cresta con la forma ideal de napa, (2) la profundidad de aproximación, (3) la inclinación de la cara aguas arriba, (4) la contracción causada por los pilares y el tope de la cresta, (5) la interferencia debida a la plataforma corriente abajo y (6) la inmersión de la cresta debido al nivel del agua corriente abajo.

Los efectos de las cabezas distintas a la cabeza de diseño, la profundidad de aproximación, la inclinación de la cara corriente arriba, la interferencia debida a la plataforma descendente y la inmersión por el nivel de agua corriente abajo han sido estudiados y bien documentados por USBR (1960). La figura 6 muestra la variación de  $C$  para un aliviadero no controlado con cara vertical ascendente, con respecto a la profundidad de aproximación, en el caso de los perfiles USBR y WES (elípticos) para  $H_e/H_d = 1$  la figura 7 muestra una comparación similar con respecto a la inclinación de la cara corriente arriba. Al comentar sobre el estudio informado se ha declarado que la cresta con el mejor rendimiento hidráulico fue una con la cara vertical aguas arriba, seguida de la cresta con una pendiente de 3: 3 cara arriba;



mientras que la cresta con una cara aguas arriba 2: 3 plantea algunos problemas de cavitación y separación de flujo, que empeoran en el caso de una cara 1: 3 cuesta arriba. Sin embargo, las observaciones se referían a un WES.

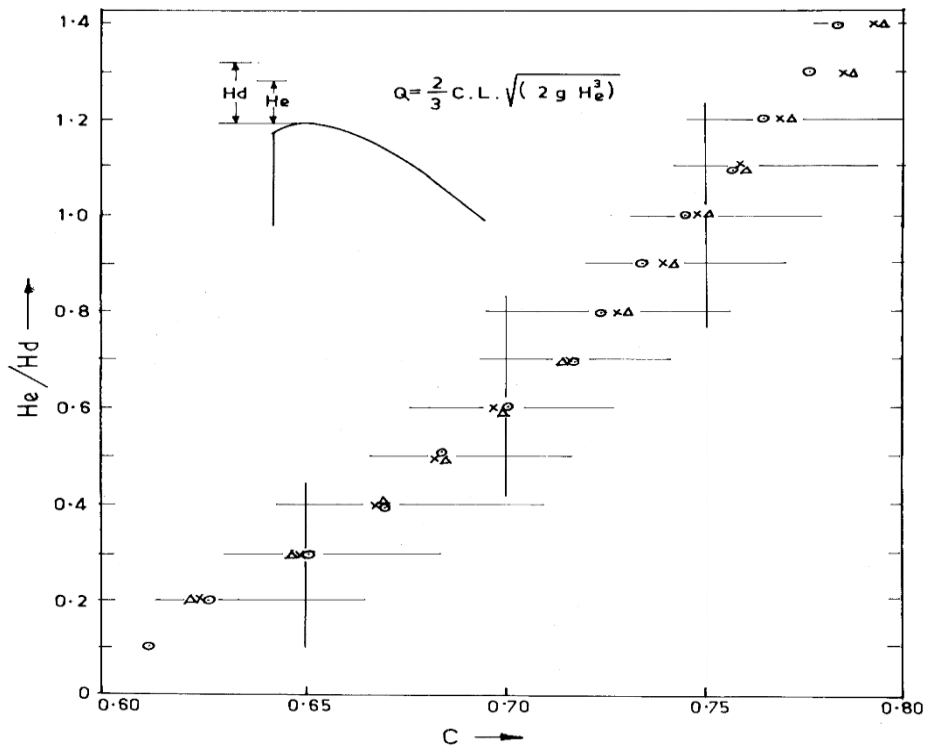


Figura 5. Coeficiente de descarga para la cabeza de diseño para la cara vertical ascendente

Fuente: Design of Small Dams, United States Bureau of Reclamation, 1987

Perfil de cresta de un diseño anterior que tenía un cuadrante ascendente formado por dos radios. Se puede mencionar que no hay datos disponibles con respecto al perfil elíptico WES para la inclinación de la cara corriente arriba.

WES (HDC - 111 - 3/3) ha estudiado el efecto de otras cabezas distintas de la cabeza de diseño, utilizando los datos del modelo para diez diseños de aliviaderos que varían ampliamente para generalizar la relación.

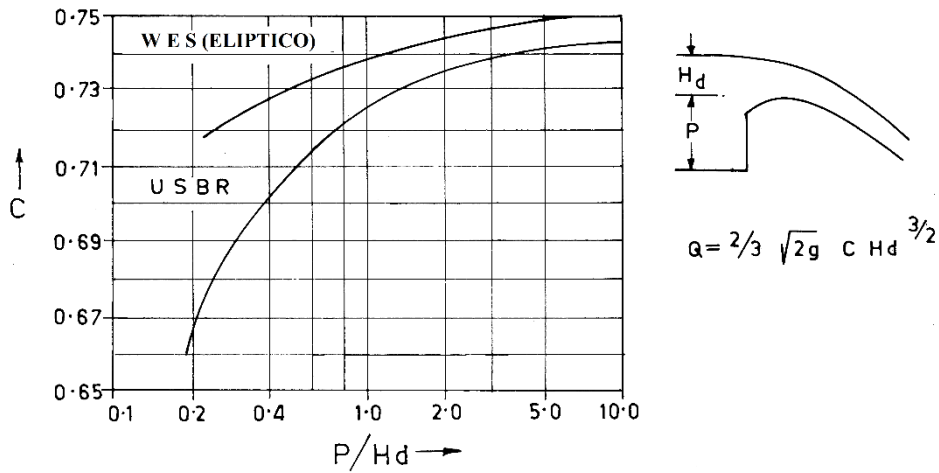


Figura 6. Efecto de la profundidad de aproximación sobre el coeficiente de descarga

Fuente: Design of Small Dams, United States Bureau of Reclamation, 1987

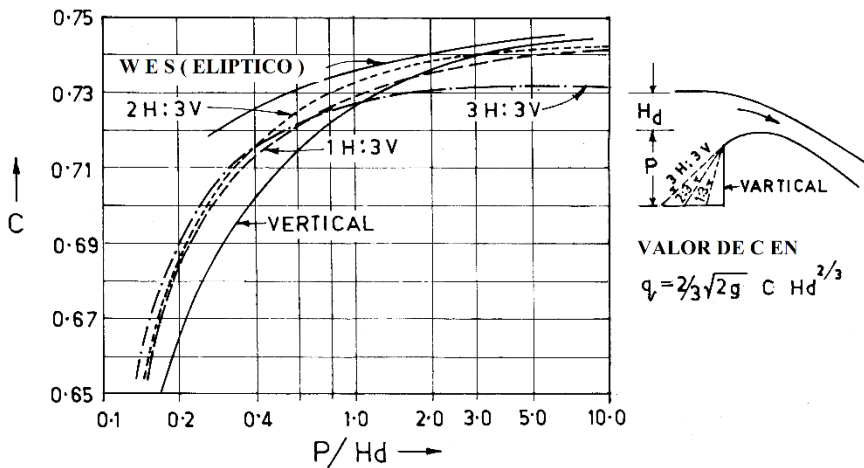


Figura 7. Efecto de la inclinación de la cara aguas arriba sobre el coeficiente de descarga

Fuente: Design of Small Dams, United States Bureau of Reclamation, 1987

$$Q = Q_d \left( \frac{H_c}{H_d} \right)^{1.6} \dots \dots \dots [\text{Ecuación 15}]$$

Donde:

$H_c$  = cabezal de diseño.

$Q_d$  = Descarga correspondiente al cabezal de diseño.

$H_d$  = Cabezal distinto del cabezal de diseño, incluido el cabezal debido a la velocidad de aproximación.

$Q$  = Descarga correspondiente a  $H_c$ .

Los pilares de la cresta causan la contracción del flujo, la reducción de la longitud efectiva de la cresta y la reducción de la descarga en comparación con la de una cresta que de otro modo no está controlada. Se aplica la siguiente relación:

$$L' = L - 2(NK_p + K_a) H_e \dots\dots\dots [\text{Ecuación 16}]$$

Donde:

$L$  = Longitud efectiva de la cresta para calcular la descarga.

$L'$  = Longitud neta de la cresta.

$N$  = Número de muelles.

$K_p$  = Coeficiente de contracción del muelle.

$K_a$  = Coeficiente de contracción del pilar.

$H_e$  = Total cabeza en la cresta.

Como resultado de extensos estudios basados en investigaciones de modelos hidráulicos de varios aliviaderos, WES ha desarrollado gráficos de diseño para diferentes configuraciones de pilares y pilares. En general, el coeficiente de contracción del muelle se ve afectado por la forma y la ubicación de la punta del muelle, el grosor del muelle, la cabeza en relación con la cabeza de diseño y la velocidad de aproximación. Para la condición del cabezal de diseño  $H_d$ , los

coeficientes de contracción del muelle promedio se pueden tomar de la siguiente manera:

- Para pilares de punta cuadrada con esquinas redondeadas 0,02 para pilares de nariz redonda 0,02 y para muelles puntiagudos es 0.
- El coeficiente de contracción del pilar se ve afectado por la forma del pilar, el ángulo entre la pared de aproximación corriente arriba y el eje de flujo, la cabeza en relación con la cabeza de diseño  $H_d$  y la velocidad de aproximación.

#### ***2.2.8.8. Aliviadero de caída.***

Un aliviadero de caída puede ser cerrado o no y proporcionar un flujo sobre un arco o contrafuerte presa, donde el flujo libre cae una cierta distancia antes de entrar en un pozo disipador de energía en el final (Wayne, Wei y Lindell, 2004).

#### ***2.2.8.9. Aliviadero de canal lateral.***

Un aliviadero de canal lateral puede ser cerrado o no y proporciona flujo a un canal o túnel en ángulo recto debido a que la topografía del contrafuerte no es favorable para una cresta normal alineación muestra una disposición típica. Ilustra un canal lateral aliviadero en funcionamiento las características hidráulicas se definen de la siguiente manera (USBR, 1987).

#### ***2.2.8.10. Aliviadero de orificio.***

Un aliviadero de orificio normalmente está cerrado y se usa cuando hay una capacidad de descarga sustancial necesario en niveles bajos de embalses, es útil cuando se requiere la sedimentación de sedimentos. También es útil para desviar el flujo durante la construcción. Portón los tamaños son normalmente más pequeños

para estos aliviaderos, pero los detalles más altos de cabeza y sellado pueden hacerlos altos los aliviaderos de orificios se pueden encontrar en las presas de gravedad, adyacentes a las presas de terraplén, y en presas de arco (USBR, 1987).



*Figura 8.* Aliviadero tipo orificio de la represa Dique San Roque, en Córdoba, Argentina

Fuente: Design of Small Dams, United States Bureau of Reclamation, 2014

#### ***2.2.8.11. Aliviadero en forma de laberinto.***

El aliviadero del laberinto se usa para concentrar la descarga en un conducto estrecho, donde el espacio no permite una cresta lineal sin unir. Por lo general, minimiza la excavación de aproximación, mientras que el aliviadero de concreto es más complicado de construir. Aliviaderos laberínticos han sido construidos con una amplia gama de tamaños y capacidades de descarga, y son adecuados para la rehabilitación de aliviaderos existentes cuando se necesita una mayor capacidad de aliviadero (Hinchliff y Houston, 1984).

El aliviadero más eficiente la entrada para la mayoría de las aplicaciones de yacimientos es un enfoque curvo adyacente a cada ciclo final del aliviadero, con el flujo de aproximación paralelo a la línea central de los ciclos del aliviadero para un flujo de aproximación más uniforme. La entrada al aliviadero debe colocarse tan

arriba el depósito como sea posible para reducir las pérdidas de carga localizadas aguas arriba. Para evitar la sumersión efecto, la condición de flujo supercrítico debe mantenerse en la cresta del canal inclinado hacia abajo del laberinto el número de ciclos de aliviaderos debe determinarse sobre la base de magnitud de la cabeza aguas arriba, el efecto de la interferencia de napa y la economía del diseño. Con condiciones de operación normales, la relación de aspecto vertical para cada ciclo de laberinto, debe ser 2,5 o mayor (Tullis, 2011).

Las presiones sub atmosféricas debajo de la base causarán oscilación y ruido debe evitarse mediante la ventilación por razones estructurales. Muelles divisores se pueden colocar a lo largo de las paredes laterales del aliviadero, o piedra triturada se pueden colocar a lo largo del borde aguas abajo de la cresta. Los muelles deben estar ubicados a una distancia igual al 10 por ciento de la longitud de la pared corriente arriba de los ápices aguas abajo (Tullis,2011).

Aunque el uso de piedra triturada puede reducir la capacidad del aliviadero, puede ser rentable. La capacidad de descarga es una función de la cabeza sobre la cresta, la altura de la pared de la cresta, la forma de la cresta, el ángulo del laberinto, el número de ciclos y la longitud de la pierna lateral (Tullis, 2011).



Figura 9. Aliviadero tipo laberinto de Presa Sayano-Shusenskaya

Fuente: Design of Small Dams, United States Bureau of Reclamation

#### ***2.2.8.12. Aliviadero forma túnel.***

Los aliviaderos de los túneles se utilizan con diques de contención, donde no hay una ubicación adecuada para un aliviadero de caída. Se requiere un pilar de roca competente. Los aliviaderos del túnel pueden ser cerrados o no, dependiendo de las restricciones topográficas y geológicas en la entrada del túnel. En algunos casos, pueden requerirse puertas (Wayne, Wei, Lindell, 2004).

#### ***2.2.8.13. Aliviadero en forma creager.***

El conducto del aliviadero conecta la estructura de la cresta con un dissipador de energía. En plan, puede ser recto o curvo, tener un ancho uniforme o ser cónico. El diseño más común es un tobogán recto con una disminución gradual. Diseños más complejos requieren pruebas de modelo físico. En sección, puede tener una pendiente uniforme o tener más de una pendiente conectada por vertical curvas. El perfil más común del canal es un canal inclinado superior plano y un canal inclinado más bajo conectado por una curva vertical (Wayne, Wei y Lindell, 2004)

## **2.2.9. Clasificación de aliviadero según su función**

### ***2.2.9.1. Aliviadero de servicio.***

Un aliviadero de servicio proporciona descargas continuas o reguladas frecuentes o cinco etapas (controladas) o no reguladas (no controladas) de un yacimiento sin daños significativos a la presa, el dique o las estructuras adjuntas debido a las liberaciones hasta e incluyendo la descarga máxima de diseño. Los aliviaderos de servicio son típicamente estructuras muy robustas y resistentes a la erosión que consisten principalmente en hormigón armado moldeado (in situ).

### ***2.2.9.2. Aliviadero auxiliar.***

Un aliviadero auxiliar se usa con poca frecuencia y puede ser un aliviadero secundario (lo que aumenta la capacidad de descarga de un aliviadero de servicio).

Durante la operación, podría haber algún grado de daño estructural o erosión en el aliviadero auxiliar debido a las descargas hasta e incluyendo la descarga máxima de diseño. Los aliviaderos auxiliares pueden ser estructuras menos resistentes, resistentes a la erosión, que consisten en hormigón armado in situ moldeado, protección del canal del rip-rap y / o canales excavados sin armadura.

### ***2.2.9.3. Aliviadero de emergencia.***

Un aliviadero de emergencia está diseñado para proporcionar protección adicional contra el desbordamiento de una presa y/o dique y está diseñado para uso bajo condiciones inusuales o extremas tales como mal funcionamiento o mal funcionamiento del aliviadero de servicio o salidas durante inundaciones muy grandes y remotas como modelos hidrológicos y/u otras condiciones de emergencia. Al igual que con los aliviaderos auxiliares, se puede esperar cierto grado de daño



estructural y/o erosión debido a las liberaciones hasta e incluyendo la descarga máxima de diseño. Los aliviaderos de emergencia son las estructuras menos robustas y resistentes a la erosión que consisten en concreto colado in situ moldeado.

### 2.2.10. Partes del aliviadero.

#### 2.2.10.1. Cresta del Aliviadero.

(s): es la parte superior de la estructura con pasa el agua de la sobre carga.

#### 2.2.10.2. Longitud de la cresta.

(b): Es la longitud medida a lo largo de la cresta del aliviadero.

#### 2.2.10.3. Altura del aliviadero.

(P): Es la altura desde la base del aliviadero hasta el nivel del punto de la cresta sobresaliente del aliviadero.

#### 2.2.10.4. Carga del aliviadero.

(H): Es la altura medida desde la superficie horizontal ubicada en el punto sobresaliente de la cresta del aliviadero.

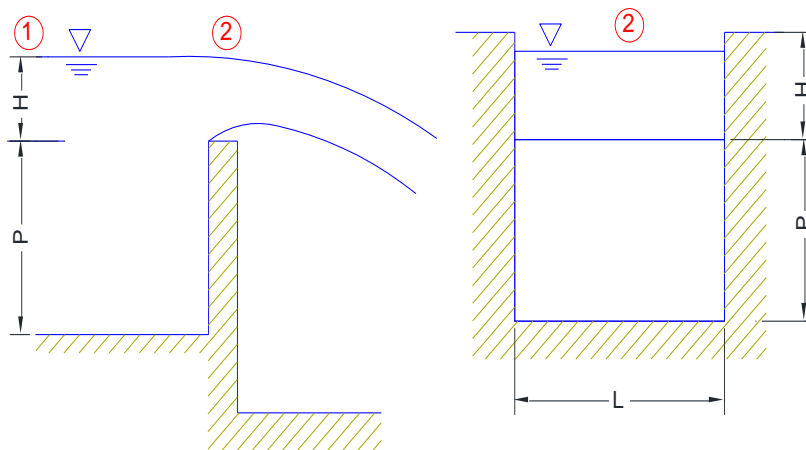


Figura 10. Partes de principales de un vertedero

**2.2.11. Desarrollo de la fórmula teórica.**

Para el desarrollo de la fórmula teórica existen varios considerandos la velocidad de llegada despreciable.

**2.2.11.1. Considerando la velocidad de llegada despreciable.**

La fórmula clásica básica de orificios.

$$Q = C_o * A_o * \sqrt{2gy} \dots \dots \dots [Ecuación 17]$$

Considerando una diferencia de caudal que pasa por un orificio con un diferencial de área de altura dy y ancho constante L, tenemos:

$$dQ = C_o * dA * \sqrt{2gy} = C_o * dyL\sqrt{2gY^{\frac{1}{2}}}$$

El gasto se obtiene integrando esta ecuación:

$$Q = C_o\sqrt{2gL} \int_{h_1}^h y^{1/2} dy$$

Considerando el h1 = 0, ya que que el borde superior se encuentra sin pared.

$$Q = C_o\sqrt{2gL}(h^{3/2})$$

O también.

$$Q = \frac{2}{3}C_o\sqrt{2gL}H^{3/2}$$

Si se considera a:  $\frac{2}{3}C_o\sqrt{2g} = Cd$  (coeficiente de gasto)

Se tiene:

$$Q = C_dLH^{3/2} \dots \dots \dots [Ecuación 18]$$

### 2.2.11.2. Considerando la velocidad de llegada.

Se considera la velocidad de llegada a través de su carga de velocidad  $h_v$ , por lo que se tiene la misma fórmula que para el caso A, incluyendo la carga de velocidad de llegada  $h_v$ , por lo que se tiene:

$$dQ = C_o dA \sqrt{2g(y + h_v)} = C_o L dy [2g(y + h_v)]^{1/2}$$

De acuerdo con la teoría algebraica en lo correspondiente a desarrollo de binomios.

$$(a + b)^n = a^n + \frac{n}{1i} a^{n-2} b + \frac{n(n-1)}{2i} a^{n-2} b^2 + \frac{n(n-1)(n-2)}{3i} a^{n-2} b^2 + \dots$$

Considerando los dos primeros términos del desarrollo de binomios

$$dQ = C_o L \sqrt{2g} dy \left( y^{1/2} + \frac{1}{2} \frac{y^{\frac{1}{2}-1}}{1} h_v \right)$$

$$dQ = C_o \sqrt{2g} L \left( y^{1/2} + \frac{1}{2} \frac{y^{\frac{1}{2}-1}}{1} h_v \right) dy$$

El gasto se obtiene integrando la ecuación anterior,

$$dQ = C_o \sqrt{2g} L \int_0^h \left( y^{1/2} + \frac{1}{2} \frac{y^{\frac{1}{2}-1}}{1} h_v \right) dy$$

$$dQ = C_o \sqrt{2g} L \left[ \frac{2}{3} y^{3/2} + y^{\frac{1}{2}} h_v \right]_0^h$$

$$dQ = C_o \sqrt{2g} L \left[ \frac{2}{3} H^{3/2} + h_v H^{1/2} \right]$$

$$dQ = C_o \sqrt{2g} H^{3/2} \left( 1 + \frac{3}{2} H^{-1} h_v \right)$$

Pero:

$$h_v = \frac{v^2}{2g} = \frac{Q^2/A^2}{2g} = \frac{Q^2}{D^2 L^2 2g}$$

Donde  $D=H+P$

$$h_v = \frac{(CLH^{3/2})^2}{2gD^2L^2} = \frac{C^2L^2H^3}{2gD^2L^2} = \frac{C^2H^3}{2gD^2} = \frac{\left(\frac{2}{3}C_0\sqrt{2g}\right)^2 H^3}{2gD^2}$$

$$h_v = \frac{4}{9} \frac{C_0^2 H^3}{2gD^2}$$

Sustituyendo en la fórmula de gasto:

$$Q = \frac{2}{3} C_0 \sqrt{2g} L H^{3/2} \left[ 1 + \frac{3}{2} H^{-1} \left( \frac{4 C_0^2 H^3}{9 D^2} \right) \right]$$

$$Q = \frac{2}{3} C_0 \sqrt{2g} L H^{3/2} \left[ 1 + \frac{3}{2} \left( \frac{2 C_0^2 H^2}{3 D^2} \right) \right]$$

De acuerdo a situaciones observadas anteriormente,  $\frac{2}{3} C_0 \sqrt{2g} = C$  y si para esta ecuación se considera a  $\frac{2}{3} C_0 \sqrt{2g} = C$  se tiene:

$$Q = CLH^{3/2} \left[ 1 + C_1 \frac{H^2}{D^2} \right] \dots \dots \dots [\text{Ecuación 19}]$$

**2.2.11.3. Fórmulas comúnmente utilizadas para la estimación de coeficientes de descarga en el diseño de vertederos.**

A continuación, se presentan las fórmulas comúnmente utilizadas para vertederos de pared delgada sin contracciones en el sistema de unidades métrico.

a. *Fórmula de Kindsvater y Carter.*

Considerando la velocidad de llegada.

$$Q = C_0 \frac{2}{3} \sqrt{2g} L_e H_e^{3/2} \dots\dots\dots [\text{Ecuación 20}]$$

Para Aliviadero rectangulares sin contracción delgada:

$$C_e = 0,602 + 0,075 \frac{H}{P}$$

$$L_e = L - 0,001$$

$$H_e = H + 0,001$$

Límites de aplicación:

No indica.

b. *Fórmula de Rehbock..*

Sin considerar velocidad de llegada

$$Q = C_0 \frac{2}{3} \sqrt{2g} L H^{3/2} \dots\dots\dots [\text{Ecuación 21}]$$

$$C_0 = \left( 0,6035 + 0,0813 \frac{H}{P} + \frac{0,00009}{P} \right) \left( 1 + \frac{0,0011}{H} \right)^{3/2}$$

Considerando la velocidad de llegada

$$Q = \left( 1,787 + 0,236 \frac{H}{P} \right) L H^{3/2} \dots\dots\dots [\text{Ecuación 22}]$$

Límites de aplicación

$$0,03m \leq H \leq 0,06m$$

$$0,03m \leq L$$

$$0,03m \leq H$$

c. *Fórmula de Bazin corregida por Hegly.*

Sin considerar velocidad de llegada

$$Q = C_0 \sqrt{2g} LH^{3/2} \dots\dots\dots [\text{Ecuación 23}]$$

$$C_0 = \left\{ 0,405 + \frac{0,0027}{H} \right\} \left\{ 1 + 0,551 \left( \frac{H}{H+P} \right)^2 \right\}$$

Considerando la velocidad de llegada

$$C_0 = \left\{ 1,794 + \frac{0,0133}{H} \right\} \left\{ 1 + 0,55 \left( \frac{H}{D} \right)^2 \right\} LH^{3/2} \dots\dots\dots [\text{Ecuación 24}]$$

Límites de aplicación

$$0,10m \leq H \leq 0,06m$$

$$0,50m \leq L \leq 2,00m$$

$$0,20m \leq P \leq 2,00m$$

d. *Fórmula de Francis.*

Sin considerar velocidad de llegada

$$Q = 1,84LH^{3/2} \dots\dots\dots [\text{Ecuación 25}]$$

Considerando la velocidad de llegada

$$Q = 1,84LH^{3/2} \left\{ 1 + 0,2 \left( \frac{H}{D} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots [\text{Ecuación 26}]$$

Límites para la aplicación de la formula

$$0,18m \leq H \leq 0,5 m$$

$$2,40m \leq L \leq 3 m$$

$$0,60m \leq P \leq 1,50m$$

Procurar que  $L > 3H$

e. *Fórmula de King.*

Sin considerar velocidad de llegada

$$Q = 1,84LH^{1,47} \dots\dots\dots[\text{Ecuación 27}]$$

Considerando la velocidad de llegada

$$Q = 1,84LH^{1,47} \left\{ 1 + 0,56 \left( \frac{H}{D} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots[\text{Ecuación 28}]$$

f. *Fórmula de la Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos.*

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_0 L H^{3/2} = 2,953 C_0 L H^{3/2} \dots\dots\dots[\text{Ecuación 29}]$$

$$C_0 = \left\{ 0,615 + \frac{0,615}{1000H + 1,6} \right\} \left\{ 1 + 0,5 \left( \frac{H}{D} \right)^2 \right\}$$

Límites de aplicación

$$0,025m \leq H \leq 0,80m$$

$$0,3m \leq P$$

$$\frac{H}{P} \leq 1$$

g. *Fórmula de Harris.*

Esta fórmula es única ya que introduce un coeficiente de corrección por temperatura, la fórmula está dada para unidades inglesas.

$$Q = \left[ 3,27 + \frac{c}{H} + 1,5 \left( \frac{H}{d} \right)^2 \right] L H^{3/2} \dots\dots\dots[\text{Ecuación 30}]$$

El valor de c varía en función de la temperatura siendo c = 0,023 para 39° F y 0,018 para 68° F.

Su aplicación se hizo en un vertedero de 2 pies de ancho, 4 pies de altura de vertedero y cargas de 1 pie.

### 2.3. Definición de términos

- **Aliviadero tipo engranaje:** Son estructuras en forma de engranaje dentada, utilizado como regulación y de protección que sirven para evacuar caudales de demasías o caudales superiores a los del diseño.
- **Carga relativa en el aliviadero (H/P):** Es una relación entre el tirante de con la de aproximación y la altura de la pared del aliviadero.
- **Coefficiente de descarga (Cd):** Es un factor adimensional característico de una obra hidráulica, que permite calcular el caudal (Q) con el que desembalsa en función del nivel del fluido en el embalse o reserva ( $\Delta h$ ).
- **Descarga (Q):** Es la cantidad de fluido que circula a través de una sección del ducto (tubería, cañería, oleoducto, río y canal) por unidad de tiempo. Normalmente se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.
- **Parámetros geométricos:** La sección transversal que presenta el aliviadero de es generalmente de forma muy irregular y varia de un lugar a otro, desde aproximadamente la forma geométrica que presenta en forma perpendicular a la dirección de flujo en el vertedor.
- **United States Bureau of Reclamation (USBR):** Oficina de reclamación de los Estados Unidos.
- **World Education Services (WES):** Servicios de educación mundial.



## **CAPÍTULO III**

### **MÉTODO**

#### **3.1. Tipo de la investigación**

La presente investigación es de tipo correlacional y explicativo puesto que tiene como propósito de relacionar y vincular entre sí, las variables geométricas en el coeficiente de descarga en un aliviadero en forma de engranaje, además para la validación de hipótesis se utiliza una prueba t – Student, si se observa la existencia de una cierta tendencia lineal en la relación.

La investigación correlacional asocia variables mediante un patrón predecible para un grupo o población (Hernández, 2006).

##### **3.1.1. Nivel de la investigación.**

El nivel de esta investigación es explicativo, ya que se estudian las causas que originan la variación de resultados al manipular la variable independiente. La investigación explicativa pretende establecer las causas de los eventos, sucesos o fenómenos que se estudian (Hernández, 2006).

### 3.1.2. Método de investigación.

El método de investigación es cuantitativo, puesto que el medio de prueba de hipótesis se basa en mediciones numéricas y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías.

## 3.2. Diseño de la investigación

### 3.2.1. Modelo experimental.

Se instala un aliviadero en forma de engranaje en el canal del área de prueba modelo, que tiene 0,5 m de profundidad y 0,5 m de ancho Figura 11 (a). Los parámetros geométricos detallados de la presa de aliviadero en forma de engranaje se muestran en la figura 11 (b).  $L$  es el ancho total del aliviadero (0,5 m en este experimento),  $P$  es la altura del aliviadero (0,06 m en este experimento),  $d$  es el espesor del aliviadero (0,02 m en este experimento),  $a$  es el ancho del engranaje,  $b$  es el ancho entre dos engranajes vecinos, y  $c$  es la altura del engranaje.  $a$ ,  $b$  y  $c$  son los principales parámetros geométricos de la presa en forma de engranaje, con  $L = n(a + b)$ , donde  $n$  es el número de engranajes, que fueron diseñados simétricamente.

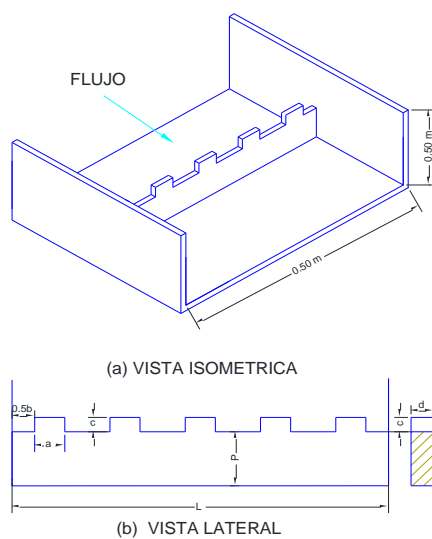


Figura 11. Aliviadero en forma de engranaje que se pretende diseñar con parámetros geométricos del aliviadero

Aliviadero en forma de engranaje, con engranajes de dos alturas diferentes, son examinados en este estudio: el tipo de engranaje bajo velocidad (tipo C1, con  $c = 10$  mm) y el tipo de alta velocidad (tipo C2, con  $c = 20$  mm). Los experimentos se llevaron a cabo en dos grupos, con cada uno tiene cuatro esquemas de diferentes tamaños. Los detalles se muestran en la tabla 3.

**Tabla 3**

*Esquema experimental para tipos de alta y baja velocidad*

Tipo	Esquema	a(mm)	b(mm)	a/b	a/c
C1	C1a1	10	40	0,25	1,00
	C1a2	20	30	0,67	2,00
	C1a3	30	20	1,50	3,00
	C1a4	40	10	4,00	4,00
C2	C2a1	10	40	0,25	0,50
	C2a2	20	30	0,67	1,00
	C2a3	30	20	1,50	1,50
	C2a4	40	10	4,00	2,00

### 3.2.2. Configuración experimental.

El experimento se llevó a cabo en el laboratorio hidráulica de pendiente variable. Un modelo que incluye un depósito de almacenamiento de agua, estanque de alimentación, un medidor de caudal, manómetros, limnómetros, una electrobomba centrífuga, un medidor de flujo, una válvula de compuerta, un modelo área de prueba, y se estableció un canal de aguas estáticas en la figura muestra un bosquejo de la sección de prueba.



*Figura 12.* Canal de prueba hidráulica de laboratorio

*Nota:* Es un canal de prueba de 15 metros longitud para realizar las pruebas hidráulicas y de mecánica de fluidos.

### Esquema de canal de prueba hidráulica

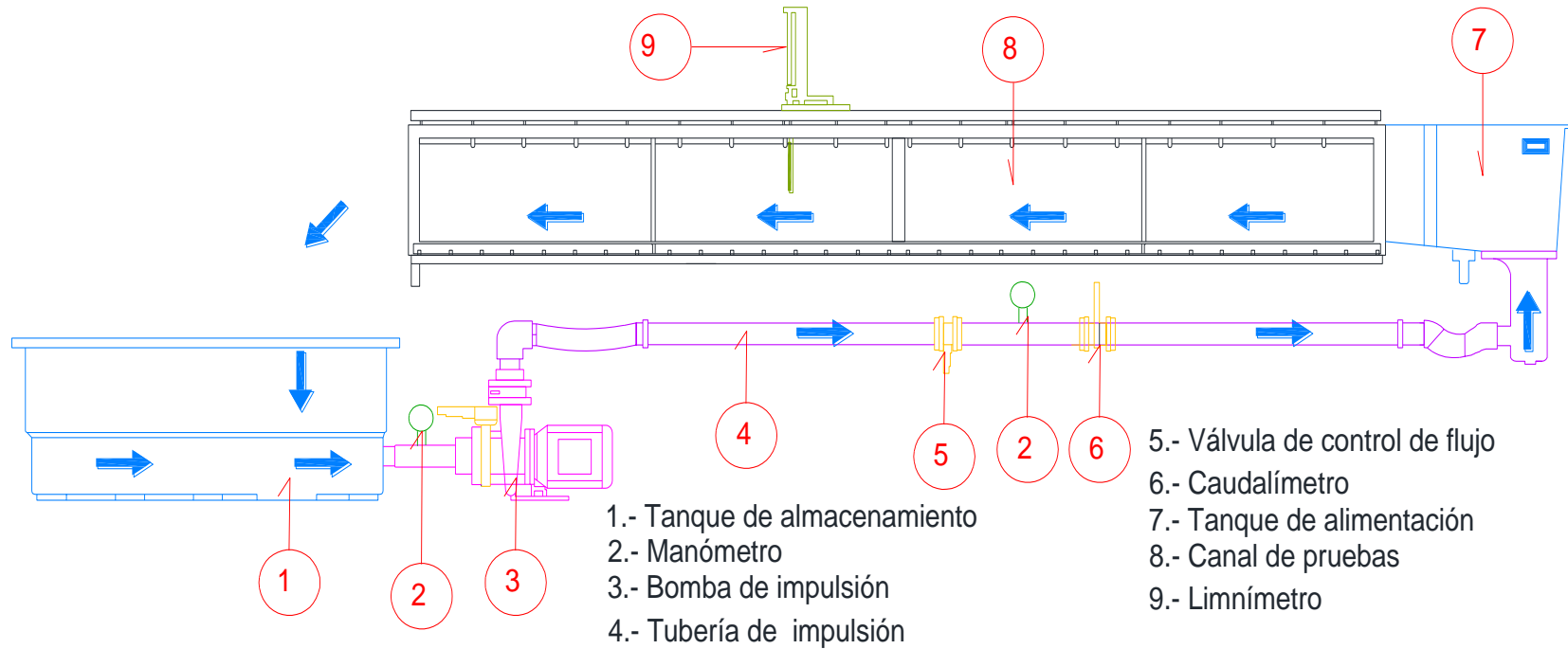


Figura 13. Bosquejo del esquema de equipos del laboratorio Canal de prueba hidráulica

### 3.2.3. Medida experimental

La descarga, la profundidad del agua y la velocidad de flujo se midió en este estudio. Los regímenes de flujo alrededor y sobre el aliviadero en forma de engranaje. Los detalles de las mediciones se muestran a continuación.

La válvula de compuerta se usa para controlar la descarga. El valor de la descarga se midió con un dispositivo medidor de flujo. Con hidrómetro instalada a en altura de aliviadero en forma de engranaje a 30 cm aguas arriba se mide el caudal, la velocidad, la fuerza.



Figura 14. Medidor de caudales Streamflow 430, marca Nixon

Un indicador de nivel de agua se usa para medir el nivel del agua en el área de prueba. Los niveles de aguas arriba y aguas abajo del aliviadero se midieron. Se realizó el aforo volumétrico aforo se hizo la comparación donde considera con el medidor de caudales.

Una cosa debe enfatizarse: solo se considera la salida libre en este estudio. Basado en los términos críticos de la libertad flujo de salida, cuando el nivel del agua aguas abajo es menor que la altura del aliviadero, no se producirá efecto de remanso en la prueba área, por lo que se puede garantizar una salida libre.

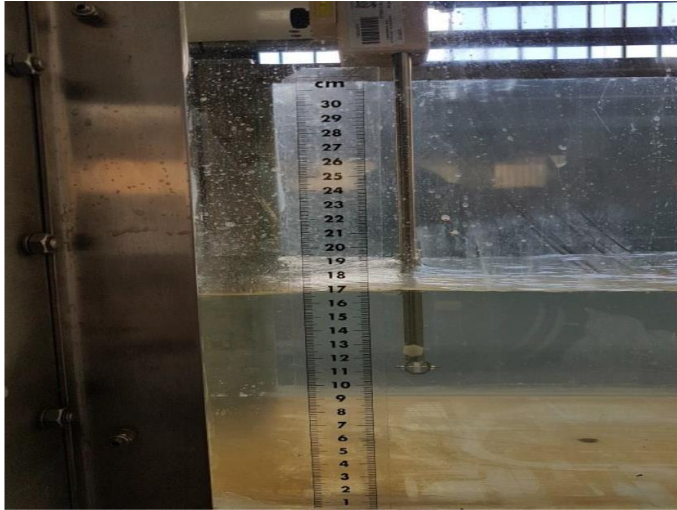


Figura 15. Medidor regla graduada de tirante en canal de prueba

### **3.3. Población y muestra**

#### **3.3.1. Población.**

Son todas las pruebas que se va analizar por el método experimental de por cada sección tipos de aliviaderos en forma de engranaje C1 de baja velocidad, C2 de alta velocidad esquemas experimentales para C1a1, C1a2, C1a3 , C1a4, C2a1, C2a2, C2a3 y C2a4:

#### **3.3.2. Muestra**

Son las pruebas que se realizan con diferentes caudales de descarga (5 m<sup>3</sup>/h, 10 m<sup>3</sup>/h, 20 m<sup>3</sup>/h, 30 m<sup>3</sup>/h, 40 m<sup>3</sup>/h, 50 m<sup>3</sup>/h, 60 m<sup>3</sup>/h, 70 m<sup>3</sup>/h, 80 m<sup>3</sup>/h, 90 m<sup>3</sup>/h, 100 m<sup>3</sup>/h, 110 m<sup>3</sup>/h, 120 m<sup>3</sup>/h) con combinaciones de secciones de esquemas experimentales C1a1, C1a2, C1a3 , C1a4, C2a1, C2a2, C2a3 y C2a4 formando una matriz de 13 x 8.

### **3.4. Descripción de instrumentos para recolección de datos.**

En el presente trabajo de investigación científica se realizó en laboratorio de hidráulica como se detalla los siguientes instrumentos.

- **Canal de prueba hidráulica:** Donde se hace fluir el agua con caudal de 5 m<sup>3</sup>/h hasta 120 m<sup>3</sup>/h donde se apunta los parámetros hidráulicos.
- **Depósito de almacenamiento:** Se almacena 3 m<sup>3</sup> de agua para realizar la prueba.
- **Aforador volumétrico:** Consiste un recipiente cilíndrico para aforo de caudales por volumetría.
- **Caudalímetro:** Es un aparato que está equipado con una válvula de control tipo mariposa para el control de caudal que se quiere estudiar.
- **Medidor de caudal:** Equipo electrónico que indica las caudales de la descarga.
- **Correntómetro:** Se usó correntómetro en canal de pruebas para medir la velocidad de aproximación.
- **Limnómetro:** Es una regla graduada en mm indica la profundidad de agua (tirante H1).
- **Cronómetro:** Se utiliza para medir el tiempo de prueba.
- **01 laptop:** Con Microsoft Excel donde se registra los datos.
- **Termómetro:** Se utilizó para medir la temperatura del ambiente.

## CAPÍTULO IV

### DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 4.1. Metodología

La metodología seguida para la presente investigación se presenta según objetivos específicos de la investigación, los cuales están referidas a la medición de los principales parámetros geométricos en el aliviadero en forma de engranaje y la relación que estos tienen con el coeficiente de descarga para finalmente hallar una ecuación nueva de coeficiente de descarga utilizando los valores de los parámetros geométricos.

##### 4.1.1. Para la determinación de la relación entre el coeficiente de descarga, la descarga, $H_1/P$ y los parámetros $b$ y $c$ .

La descarga, la profundidad del agua y la velocidad de flujo se midieron en este estudio.

La válvula de compuerta se usó para controlar la descarga. El valor de la descarga se midió con un dispositivo electromagnético medidor de flujo.



Para medir el nivel del agua en el área de prueba se usó un indicador digital de nivel de agua, con una precisión de  $10^{-5}$  m. Los niveles de agua corriente arriba y aguas abajo del vertedero se midieron y cada sección de medición tenía tres líneas de medición (centro, margen izquierdo y derecho), y el valor promedio representa la profundidad del agua de cada sección.

El velocímetro con una sonda que mira hacia abajo y una sonda de aspecto lateral, se utilizó para medir la velocidad. El muestreo la frecuencia se ajustó a 50 Hz, y el tiempo de muestreo se estableció en 60 segundos en este experimento.

Se utilizó una hoja de cálculo Microsoft Excel para procesar los datos y graficar las diferentes relaciones de los parámetros y el coeficiente de descarga.

**4.1.2. Para la comparación de la capacidad de descarga entre aliviadero en forma de engranaje y aliviadero lineal.**

Para estudiar más a fondo la capacidad de descarga de un vertedero en forma de engranaje y un vertedero lineal, con la misma altura (0,06 m) y ancho (0,5 m), se usó en los experimentos la profundidad del agua en la cresta del aliviadero y la velocidad de aproximación. La relación de aumento de la descarga (S) se definió para describir las diferentes capacidades de descarga de estos dos tipos de aliviadero. S es la relación entre la descarga del vertedero en forma de engranaje y la del vertedero lineal con la misma profundidad de agua en la cresta de la presa. Se puede calcular con Ecuación. (31) de la siguiente manera:

$$s = \frac{Q_e}{Q_L} = \frac{C_{de}}{C_{dL}} \dots \dots \dots [Ecuación 31]$$

Donde  $C_d$  es coeficiente de descarga en aliviadero en forma de engranaje y  $C_{d1}$  es el coeficiente de descarga del vertedero lineal. De acuerdo con los datos medidos, los resultados calculados de  $S$  para diferentes esquemas experimentales se procesaron en una hoja de cálculo para graficar la relación de la capacidad de descarga de los dos tipos de aliviadero, engranaje y aliviadero lineal, se discutió las principales diferencias.

#### **4.1.3. Para la determinación de la ecuación de coeficiente de descarga para un aliviadero en forma de engranaje.**

Se usó un método estadístico regresión lineal múltiple utilizando hoja de cálculo Microsoft Excel y los datos obtenidos y desarrollados, se desarrolló una fórmula experimental para el coeficiente de descarga para ser derivado en una fórmula incluyendo parámetros geométricos del aliviadero en forma de engranaje.

#### **4.2. Procedimiento experimental.**

Las características de desbordamiento en aliviadero tipo engranaje, se investigó en el laboratorio en 113 ensayos con varias configuraciones, es decir, dos velocidades baja  $C_1$  y alta  $C_2$ : ( $C_{1a1}$ ,  $C_{1a2}$ ,  $C_{1a3}$ ,  $C_{1a4}$ ,  $C_{2a1}$ ,  $C_{2a2}$ ,  $C_{2a3}$  y  $C_{2a4}$ ), con diferentes caudales de descarga ( $5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $20 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $30 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $40 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $60 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $70 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $80 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $90 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $100 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $110 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $120 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

Se consideró varios parámetros para la experimentación:  $H_1$  altura del flujo sobre la cresta del vertedero,  $P$  altura desde la base del Aliviadero hasta el nivel del punto de la cresta sobresaliente del aliviadero,  $H_{01}$  altura de carga estática en el aliviadero tipo engranaje y lineal como se indica en la figura 10.

#### 4.2.1. Métodos estadísticos.

La técnica estadística utilizada para el análisis de los resultados y la validación de la Hipótesis, es el valor determinado a partir de la información de la muestra, y se va a utilizar para aceptar o rechazar la hipótesis nula.

El estadístico de prueba para una distribución de t - Student con  $n + m - 2$  grados de libertad es el siguiente:

$$t_p = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{(n-1)S_X^2 + (m-1)S_Y^2}} \sqrt{\frac{n(n+m-2)}{n+m}} \dots\dots\dots [\text{Ecuación 32}]$$

Donde:

$t_p$  : Estadístico de prueba.

X, Y : Medias muestrales.

$S_x^2, S_y^2$  : Varianzas.

m, n : Tamaño de muestras.

Para interpretar el coeficiente de correlación (r) que se obtiene, se toma como criterio de decisión, la siguiente calificación:

**Tabla 4**

*Parámetros de una relación lineal*

Correlación	Rango
(+) (-) Correlación inexistente	$0,00 = r < 0,00$
(+) (-) Correlación muy baja	$0,01 = r < 0,20$
(+) (-) Correlación baja	$0,21 < r > 0,40$
(+) (-) Correlación moderada	$0,41 < r > 0,60$
(+) (-) Correlación alta	$0,61 < r > 0,80$
(+) (-) Correlación muy alta	$0,81 = r = 0,99$
(+) (-) Correlación perfecta	$1,00 = r = 1,00$

Fuente: García, 2011

Para la prueba de hipótesis estadística se tomó en cuenta lo siguiente:

- Hipótesis nula  $H_0: \rho = 0$  (no existe correlación)

- Hipótesis alterna  $H_a: \rho \neq 0$  (existe correlación)

Se consideró para el análisis un nivel de significancia de  $\alpha = 0,05$ .

Estadístico de prueba para comprobación.

$$t_c = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \dots\dots\dots [\text{Ecuación 33}]$$

Con  $gl = n - 1$  (grados de libertad);  $t(\alpha ; gl)$

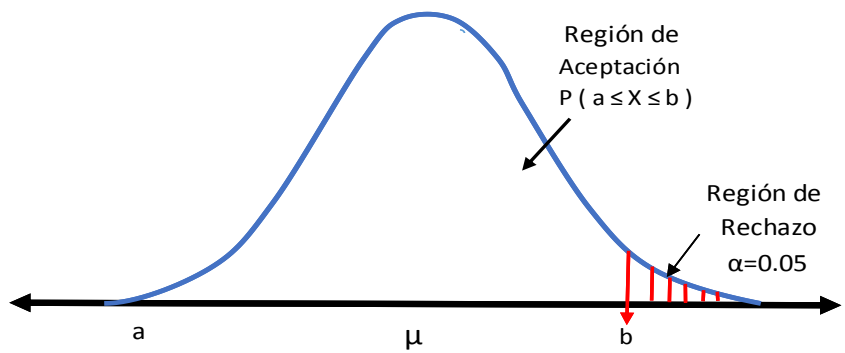


Figura 16. Gráfico de Distribución de t - Student

Fuente: García, 2011

El análisis de la comprobación de los datos con la prueba de t-Student crítico "tc", se muestra en la tabla de distribución de t-Student en el anexo de la presente investigación. El paquete computacional para trabajar los datos está compuesto por: Microsoft Excel 2016.

## CAPÍTULO V

### ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 5.1. Presentación de resultados

Los resultados obtenidos en laboratorio se muestran en las siguientes tablas y resultados aplicando las siguientes ecuaciones:

$$Q = CdL\sqrt{2g}H_{01}^{3/2} \dots\dots\dots [Ecuación 34]$$

Donde:

Q: Caudal de descarga

Cd: Coeficiente de descarga

L: Ancho del aliviadero

g: Aceleración de la gravedad

H<sub>01</sub>: Carga estática en el aliviadero

$$H_{01} = H_1 + \frac{\alpha V_{11}^2}{2g} \dots\dots\dots [Ecuación 35]$$

Donde:

H1: la carga hidráulica en el aliviadero

V11 velocidad en el canal de aproximación

$$S = \frac{Q_e}{Q_l} = \frac{C_{de}}{C_{dl}} \dots\dots\dots [Ecuación 36]$$

Donde:

$Q_e, Q_L$ : Capacidad de descarga aliviadero tipo engranaje y lineal

$C_{de}, C_{dL}$ : coeficiente de descarga aliviadero tipo engranaje y lineal

– Para el siguiente esquema experimental C1a1 se tiene lo siguiente:

- C1a1 : Configuración del aliviadero tipo engranaje
- Q : Caudal de descarga
- S : Relación entre la descarga del aliviadero lineal y tipo engranaje
- Cd : Coeficiente de descarga
- Cd1 : Coeficiente de descarga para aliviadero lineal
- H1/P : Carga relativa en el aliviadero
- g : Aceleración de gravedad 9,81 m/s<sup>2</sup>
- H01 : Altura total de carga estática
- P : Altura de pantalla de aliviadero 0,06 mm
- L : Ancho de solera de canal 0,5 m
- a : Ancho de engranaje 10 mm
- b : Distancia entre los engranajes 40 mm
- c : Altura de engranajes 10 mm

**Tabla 5***Resultados obtenidos en laboratorio y calculados en gabinete para tipo de configuración C1a1*

Resultados de laboratorio				Resultados calculados				
Descarga (m <sup>3</sup> /h)	Qe (m <sup>3</sup> /h)	QL (m <sup>3</sup> /h)	H1 (m)	V11 (m/min)	S	Cd	H1/P	H01 (m)
5	5,21	5,75	0,027	6.00	0,96	0,141	0,45	0,027
10	11,06	11,69	0,036	9.00	0,904	0,184	0,60	0,036
20	20,98	21,63	0,045	15.0	0,953	0,263	0,75	0,045
30	31,86	32,26	0,053	18,6	0,942	0,308	0,883	0,053
40	41,22	42,27	0,061	21,6	0,97	0,333	1,017	0,061
50	51,75	52,52	0,068	24,6	0,966	0,354	1,133	0,068
60	61,51	62,83	0,076	26,4	0,975	0,359	1,267	0,076
70	70,83	72,00	0,081	28,8	0,988	0,381	1,350	0,081
80	81,15	82,17	0,087	30,6	0,986	0,391	1,450	0,087
90	92,29	93,08	0,094	31,8	0,975	0,392	1,567	0,094
100	106,88	106,82	0,100	33,6	0,936	0,397	1,667	0,100
110	116,7	116,5	0,105	34,8	0,943	0,405	1,750	0,105
120	127,97	126,5	0,111	36.0	0,938	0,407	1,850	0,111

– Para el siguiente esquema experimental C1a2 se tiene lo siguiente:

C1a2 : Configuración del aliviadero tipo engranaje

Q : Caudal de descarga

S : Relación entre la descarga del aliviadero lineal y tipo engranaje

Cd : Coeficiente de descarga

Cd1 : Coeficiente de descarga para aliviadero lineal

H1/P : Carga relativa en el aliviadero

g : Aceleración de gravedad 9,81 m/s<sup>2</sup>

H01 : Altura total de carga estática

P : Altura de pantalla de aliviadero 0,06 mm

L : Ancho de solera de canal 0,5 m

a : Ancho de engranaje 20 mm

b	:	Distancia entre los engranajes	30 mm
c	:	Altura de engranajes	10 mm

**Tabla 6**

*Resultados obtenidos en laboratorio y calculados en gabinete para tipo de configuración C1a2*

Resultados de laboratorio					Resultados calculados			
Descarga (m <sup>3</sup> /h)	Qe (m <sup>3</sup> /h)	QL (m <sup>3</sup> /h)	H1 (m)	V11 (m/min)	S	Cd	H1/P	H01 (m)
5	6,26	5,75	0,02	10,2	1,089	0,222	0,333	0,02
10	11,30	11,69	0,024	13,8	0,967	0,337	0,400	0,024
20	21,11	21,63	0,034	19,8	0,976	0,400	0,567	0,034
30	31,82	32,26	0,043	23,4	0,986	0,422	0,717	0,043
40	41,78	42,27	0,051	26,4	0,988	0,436	0,850	0,051
50	51,90	52,52	0,057	29,4	0,988	0,461	0,950	0,057
60	62,93	62,83	0,066	30,6	1,002	0,444	1,100	0,066
70	71,64	72,00	0,073	31,8	0,995	0,445	1,217	0,073
80	82,00	82,17	0,081	33,0	0,998	0,435	1,350	0,081
90	92,55	93,08	0,086	34,8	0,994	0,448	1,433	0,086
100	106,51	106,82	0,093	36,0	0,997	0,442	1,550	0,093
110	115,73	116,5	0,097	37,8	0,993	0,457	1,617	0,097
120	124,4	126,5	0,102	39,0	0,983	0,462	1,700	0,102

– Para el siguiente esquema experimental C1a3 se tiene lo siguiente:

C1a3 : Configuración del aliviadero tipo engranaje

Q : Caudal de descarga

S : Relación entre la descarga del aliviadero lineal y tipo engranaje

Cd : Coeficiente de descarga

Cd1 : Coeficiente de descarga para aliviadero lineal

H1/P : Carga relativa en el aliviadero

g : Aceleración de gravedad 9,81 m/s<sup>2</sup>

H01 : Altura total de carga estática

P : Altura de pantalla de aliviadero 0,06 mm



L	Ancho de solera de canal	0,5 m
a	: Ancho de engranaje	30 mm
b	: Distancia entre los engranajes	20 mm
c	: Altura de engranajes	10 mm

**Tabla 7**

*Resultados obtenidos en laboratorio y calculados en gabinete para tipo de configuración C1a3*

Resultados de laboratorio				Resultados calculados				
Descarga (m <sup>3</sup> /h)	Qe (m <sup>3</sup> /h)	QL (m <sup>3</sup> /h)	H1 (m)	V11 (m/min)	S	Cd	H1/P	H01 (m)
5	5,92	5,75	0,019	9,00	0,971	0,239	0,317	0,019
10	12,28	11,69	0,027	12,6	0,952	0,283	0,450	0,027
20	22,46	21,63	0,037	18,00	0,963	0,352	0,617	0,037
30	32,88	32,26	0,045	22,2	0,981	0,394	0,750	0,045
40	43,1	42,27	0,053	25,2	0,981	0,411	0,883	0,053
50	53,19	52,52	0,059	28,2	0,987	0,438	0,983	0,059
60	63,49	62,83	0,067	30,0	0,99	0,434	1,117	0,067
70	72,89	72,00	0,075	31,2	0,988	0,427	1,250	0,075
80	83,4	82,17	0,082	32,4	0,985	0,427	1,367	0,082
90	93,88	93,08	0,088	34,2	0,991	0,432	1,467	0,088
100	107,43	106,82	0,094	35,4	0,994	0,435	1,567	0,094
110	117,26	116,5	0,099	37,2	0,994	0,443	1,65	0,099
120	128,04	126,5	0,106	37,8	0,988	0,436	1,767	0,106

– Para el siguiente esquema experimental C1a4 se tiene lo siguiente:

C1a4 : Configuración del aliviadero tipo engranaje

Q : Caudal de descarga

S : Relación entre la descarga del aliviadero lineal y tipo engranaje

Cd : Coeficiente de descarga

Cd1 : Coeficiente de descarga para aliviadero lineal

H1/P : Carga relativa en el aliviadero

g : Aceleración de gravedad 9,81 m/s<sup>2</sup>

H01	:	Altura total de Carga Estática	
P	:	Altura de pantalla de aliviadero	0,06 mm
L	:	Ancho de solera de canal	0,5 m
a	:	Ancho de engranaje	40 mm
b	:	Distancia entre los engranajes	10 mm
c	:	Altura de engranajes	10 mm

**Tabla 8**

*Resultados obtenidos en laboratorio y calculados en gabinete para tipo de configuración C1a4*

Resultados de laboratorio				Resultados calculados				
Descarga (m <sup>3</sup> /h)	Qe (m <sup>3</sup> /h)	QL (m <sup>3</sup> /h)	H1 (m)	V11 (m/min)	S	Cd	H1/P	H01 (m)
5	7,06	5,75	0,022	7,8	0,814	0,192	0,367	0,022
10	13,43	11,69	0,029	11,4	0,870	0,254	0,483	0,029
20	23,84	21,63	0,039	16,8	0,907	0,326	0,650	0,039
30	33,97	32,26	0,047	21,0	0,950	0,369	0,783	0,047
40	44,77	42,27	0,055	24,0	0,944	0,389	0,917	0,055
50	55,33	52,52	0,061	27,6	0,949	0,416	1,017	0,061
60	65,22	62,83	0,069	28,8	0,963	0,415	1,150	0,069
70	74,85	72,00	0,077	30,6	0,962	0,411	1,283	0,077
80	84,08	82,17	0,083	32,4	0,977	0,420	1,383	0,083
90	95,51	93,08	0,09	33,6	0,975	0,418	1,500	0,090
100	107,78	106,82	0,094	35,4	0,991	0,435	1,567	0,094
110	118,18	116,5	0,100	36,6	0,986	0,436	1,667	0,100
120	128,48	126,5	0,107	37,2	0,985	0,430	1,783	0,107

– Para el siguiente esquema experimental C2a1 se tiene lo siguiente:

C2a1	:	Configuración del aliviadero tipo engranaje
Q	:	Caudal de descarga
S	:	Relación entre la descarga del aliviadero lineal y tipo engranaje
Cd	:	Coefficiente de descarga
Cd1	:	Coefficiente de descarga para aliviadero lineal

H1/P	:	Carga relativa en el aliviadero	
g	:	Aceleración de gravedad	9,81 m/s <sup>2</sup>
H01	:	Altura total de carga estática	
P	:	Altura de pantalla de aliviadero	0,06 mm
L	:	Ancho de solera de canal	0,5 m
a	:	Ancho de engranaje	10 mm
b	:	Distancia entre los engranajes	40 mm
c	:	Altura de engranajes	20 mm

**Tabla 9**

*Resultados obtenidos en laboratorio y calculados en gabinete para tipo de configuración C2a1*

Resultados de laboratorio				Resultados calculados				
Descarga (m <sup>3</sup> /h)	Qe (m <sup>3</sup> /h)	QL (m <sup>3</sup> /h)	H1 (m)	V11 (m/min)	S	Cd	H1/P	H01 (m)
5	5,21	5,75	0,017	9,6	0,906	0,283	0,283	0,017
10	11,06	11,69	0,024	13,8	0,946	0,337	0,400	0,024
20	20,98	21,63	0,034	19,8	0,970	0,400	0,567	0,034
30	31,86	32,26	0,043	23,4	0,988	0,422	0,717	0,043
40	41,22	42,27	0,049	27,0	0,975	0,462	0,817	0,049
50	51,75	52,52	0,056	30,0	0,985	0,473	0,933	0,056
60	61,51	62,83	0,064	31,2	0,979	0,465	1,067	0,064
70	70,83	72,00	0,072	32,4	0,984	0,454	1,200	0,072
80	81,15	82,17	0,079	33,6	0,988	0,452	1,317	0,079
90	92,29	93,08	0,086	34,8	0,992	0,448	1,433	0,086
100	106,88	106,82	0,093	36,0	1,001	0,442	1,550	0,093
110	116,7	116,5	0,098	37,2	1,002	0,45	1,633	0,098
120	127,97	126,5	0,106	37,8	1,012	0,436	1,767	0,106

– Para el siguiente esquema experimental C2a2 se tiene lo siguiente:

C2a2	:	Configuración del aliviadero tipo engranaje
Q	:	Caudal de descarga
S	:	Relación entre la descarga del aliviadero lineal y tipo engranaje
Cd	:	Coefficiente de descarga

Cd1	:	Coeficiente de descarga para aliviadero lineal	
H1/P	:	Carga relativa en el aliviadero	
g	:	Aceleración de gravedad	9,81 m/s <sup>2</sup>
H01	:	Altura total de carga estática	
P	:	Altura de pantalla de aliviadero	0,06 mm
L	:	Ancho de solera de canal	0,5 m
a	:	Ancho de engranaje	20 mm
b	:	Distancia entre los engranajes	30 mm
c	:	Altura de engranajes	20 mm

**Tabla 10**

*Resultados obtenidos en laboratorio y calculados en gabinete para tipo de configuración C2a2*

Resultados de laboratorio					Resultados calculados			
Descarga (m <sup>3</sup> /h)	Qe (m <sup>3</sup> /h)	QL (m <sup>3</sup> /h)	H1 (m)	V11 (m/min)	S	Cd	H1/P	H01 (m)
5	5,21	5,75	0,019	9,0	0,906	0,239	0,317	0,019
10	11,30	11,69	0,027	12,6	0,967	0,283	0,450	0,027
20	21,11	21,63	0,037	18,0	0,976	0,352	0,617	0,037
30	31,82	32,26	0,045	22,2	0,986	0,394	0,750	0,045
40	41,78	42,27	0,052	25,8	0,988	0,423	0,867	0,052
50	51,90	52,52	0,059	28,2	0,988	0,438	0,983	0,059
60	62,93	62,83	0,066	30,6	1,002	0,444	1,100	0,066
70	71,64	72,00	0,074	31,8	0,995	0,436	1,233	0,074
80	82,00	82,17	0,080	33,6	0,998	0,443	1,333	0,080
90	92,55	93,08	0,087	34,2	0,994	0,44	1,450	0,087
100	106,51	106,82	0,092	36,0	0,997	0,449	1,533	0,092
110	115,73	116,50	0,099	37,2	0,993	0,443	1,650	0,099
120	124,40	126,50	0,105	37,8	0,983	0,442	1,750	0,105

– Para el siguiente esquema experimental C2a3 se tiene lo siguiente:

C2a3	:	Configuración del aliviadero tipo engranaje
Q	:	Caudal de descarga

S	:	Relación entre la descarga del aliviadero lineal y tipo engranaje	
Cd	:	Coefficiente de descarga	
Cd1	:	Coefficiente de descarga para aliviadero lineal	
H1/P	:	Carga relativa en el aliviadero	
g	:	Aceleración de gravedad	9,81 m/s <sup>2</sup>
H01	:	Altura total de carga estática	
P	:	Altura de pantalla de aliviadero	0,06 mm
L	:	Ancho de solera de canal	0,5 m
a	:	Ancho de engranaje	30 mm
b	:	Distancia entre los engranajes	20 mm
c	:	Altura de engranajes	20 mm

**Tabla 11**

*Resultados obtenidos en laboratorio y calculados en gabinete para tipo de configuración C2a3*

Resultados de laboratorio				Resultados calculados				
Descarga (m <sup>3</sup> /h)	Qe (m <sup>3</sup> /h)	QL (m <sup>3</sup> /h)	H1 (m)	V11 (m/min)	S	Cd	H1/P	H01 (m)
5	5,92	5,75	0,023	7,2	0,845	0,180	0,383	0,023
10	12,28	11,69	0,031	10,8	0,814	0,230	0,517	0,031
20	22,46	21,63	0,041	16,2	0,890	0,302	0,683	0,041
30	32,88	32,26	0,048	21,0	0,912	0,358	0,800	0,048
40	43,10	42,27	0,056	24,0	0,928	0,379	0,933	0,056
50	53,19	52,52	0,065	25,8	0,940	0,378	1,083	0,065
60	63,49	62,83	0,072	27,6	0,945	0,389	1,200	0,072
70	72,89	72,00	0,079	29,4	0,960	0,395	1,317	0,079
80	83,40	82,17	0,084	31,8	0,959	0,412	1,400	0,084
90	93,88	93,08	0,092	32,4	0,959	0,404	1,533	0,092
100	107,43	106,82	0,097	34,2	0,931	0,415	1,617	0,097
110	117,26	116,50	0,103	35,4	0,938	0,417	1,717	0,103
120	128,04	126,50	0,109	36,6	0,937	0,418	1,817	0,109

– Para el siguiente esquema experimental C2a4 se tiene lo siguiente:

C2a4	:	Configuración del Aliviadero tipo engranaje	
Q	:	Caudal de descarga	
S	:	Relación entre la descarga del aliviadero lineal y tipo engranaje	
Cd	:	Coeficiente de descarga	
Cd1	:	Coeficiente de descarga para aliviadero lineal	
H1/P	:	Carga relativa en el aliviadero	
g	:	Aceleración de gravedad	9,81 m/s <sup>2</sup>
H01	:	Altura total de carga estática	
P	:	Altura de pantalla de aliviadero	0,06 mm
L	:	Ancho de solera de canal	0,5 m
a	:	Ancho de engranaje	40 mm
b	:	Distancia entre los engranajes	10 mm
c	:	Altura de engranajes	20 mm

**Tabla 12**

*Resultados obtenidos en laboratorio y calculados en gabinete para tipo de configuración C2a4*

Resultados de laboratorio					Resultados calculados			
Descarga (m <sup>3</sup> /h)	Qe (m <sup>3</sup> /h)	QL (m <sup>3</sup> /h)	H1 (m)	V11 (m/min)	S	Cd	H1/P	H01 (m)
5	5,21	5,75	0,027	6,0	0,96	0,141	0,450	0,027
10	11,06	11,69	0,036	9,0	0,904	0,184	0,600	0,036
20	20,98	21,63	0,045	15,0	0,953	0,263	0,750	0,045
30	31,86	32,26	0,053	18,6	0,942	0,308	0,883	0,053
40	41,22	42,27	0,061	21,6	0,970	0,333	1,017	0,061
50	51,75	52,52	0,068	24,6	0,966	0,354	1,133	0,068
60	61,51	62,83	0,076	26,4	0,975	0,359	1,267	0,076
70	70,83	72,00	0,081	28,8	0,988	0,381	1,350	0,081
80	81,15	82,17	0,087	30,6	0,986	0,391	1,450	0,087
90	92,29	93,08	0,094	31,8	0,975	0,392	1,567	0,094
100	106,88	106,82	0,100	33,6	0,936	0,397	1,667	0,100
110	116,7	116,50	0,105	34,8	0,943	0,405	1,750	0,105
120	127,97	126,50	0,111	36,0	0,938	0,407	1,850	0,111

– Para el siguiente esquema experimental CL se tiene lo siguiente:

CL	:	Configuración del aliviadero tipo lineal	
Q	:	Caudal de descarga	
S	:	Relación entre la descarga del aliviadero lineal y tipo engranaje	
Cd	:	Coefficiente de descarga	
Cd1	:	Coefficiente de descarga para aliviadero lineal	
H1/P	:	Carga Relativa en el aliviadero	
g	:	Aceleración de gravedad	9,81 m/s <sup>2</sup>
H01	:	Altura total de carga estática	
P	:	Altura de pantalla de aliviadero	0,06 mm
L	:	Ancho de solera de canal	0,5 m
a	:	Ancho de engranaje	0 mm
b	:	Distancia entre los engranajes	0 mm
c	:	Altura de engranajes	0 mm

**Tabla 13**

*Resultados obtenidos en laboratorio y calculados en gabinete para tipo de configuración CL*

Resultados de laboratorio				Resultados calculados		
Descarga (m <sup>3</sup> /h)	QL (m <sup>3</sup> /h)	H1 (m)	V11 (m/min)	CdL	H1/P	H01 (m)
5	5,75	0,006	27,6	1,348	0,100	0,006
10	11,69	0,008	30,6	1,752	0,133	0,008
20	21,63	0,020	33,6	0,887	0,333	0,020
30	32,26	0,032	31,2	0,657	0,533	0,032
40	42,27	0,039	34,2	0,651	0,650	0,039
50	52,52	0,046	36,0	0,636	0,767	0,046
60	62,83	0,054	37,2	0,600	0,900	0,054
70	72,00	0,061	38,4	0,583	1,017	0,061
80	82,17	0,068	39,0	0,566	1,133	0,068
90	93,08	0,075	40,2	0,550	1,250	0,075
100	106,82	0,081	41,4	0,544	1,350	0,081
110	116,50	0,086	42,6	0,547	1,433	0,086
120	126,50	0,090	44,4	0,557	1,500	0,090

### **5.1.1. Relación entre el coeficiente de descarga, la descarga, $H_1/P$ y los parámetros b y c.**

El coeficiente de descarga que varía con la descarga y  $H_1/P$  de acuerdo con los datos experimentales, las relaciones entre el coeficiente de descarga y la descarga para dos diferentes alturas de engranajes se muestran en la figura 17, y las relaciones entre el coeficiente de descarga y  $H_1/P$  se muestra en la Figura 18.

En la figura 17, que es baja velocidad tipo C1, vemos que cuando la descarga es inferior a 60 m<sup>3</sup>/h,  $C_d$  aumenta significativamente con la descarga, luego, con más aumentos de la descarga se muestran disminuciones insignificantes que fluctúan en rangos pequeños.

Por ejemplo, para C1a1 y una descarga de 10 m<sup>3</sup>/h se tiene un coeficiente de descarga de 0,337 y aumenta a medida que aumenta la descarga hasta llegar a un  $C_d$  de 0,476 para una descarga de 120 m<sup>3</sup>/h. Luego tenemos la configuración C1a2 que igualmente tiene un coeficiente de descarga de 0,337 hasta 0,462 para unas descargas de 10 y 120 m<sup>3</sup>/h respectivamente. Y las configuraciones C1a3 y C1a4 que obtuvieron valores similares teniendo 0,283 y 0,254 para una descarga de 10 m<sup>3</sup>/h y 0,436 para una descarga de 120 m<sup>3</sup>/h.

En la figura 18, que es alta velocidad tipo C2, vemos que cuando la descarga es inferior a 60 m<sup>3</sup>/h,  $C_d$  aumenta significativamente y cuando la descarga es mayor a 60 m<sup>3</sup>/h,  $C_d$  disminuye lentamente con el aumento de la descarga para los esquemas C2a1 y C2a2 con  $a/b \leq 1$  y  $a/c \leq 1$  Sin embargo,  $C_d$  aumenta lentamente con la descarga y  $H_1/P$  en los esquemas C2a3 y C2a4 con  $a/b > 1$  y  $a/c > 1$ .



Por ejemplo, en el esquema C2a1 vemos que para una descarga de 10 m<sup>3</sup>/h tiene un coeficiente de descarga de 0,337 alcanzando su mayor valor en una descarga de 50 m<sup>3</sup>/h que fue 0,473 y luego desciende hasta llegar a 0,436 para una descarga de 120 m<sup>3</sup>/h. Vemos también la curva de la configuración C2a2 donde de igual manera para una descarga de 10 m<sup>3</sup>/h se tiene un coeficiente de 0,283 alcanzando su máximo valor a 100 m<sup>3</sup>/h con un coeficiente de descarga de 0,449, descendiendo hasta 0,442 para 120 m<sup>3</sup>/h, Seguidamente en la curva de la configuración C2a3 se tiene un coeficiente de descarga de 0,230 para una descarga de 10 m<sup>3</sup>/h, su máximo valor se encuentra a 120 m<sup>3</sup>/h que fue 0,418; y por último la configuración C2a4 que obtuvo un coeficiente de descarga de 0,184 para una descarga de 10 m<sup>3</sup>/h y un valor máximo de 0,407 para una descarga de 120 m<sup>3</sup>/h.

En la relación de coeficiente de descarga con respecto a H<sub>1</sub>/P, podemos ver las gráficas para los dos tipos estudiados C1 y C2, con cuatro esquemas experimentales cada uno.

**Tabla 14**

*Resultados obtenidos de coeficiente de descarga para dos tipos de engranajes C1 y C2*

Descarga	Coeficiente de descarga (Cd)							
	Baja velocidad (C1)				Alta velocidad (C2)			
	Q	C1a1	C1a2	C1a3	C1a4	C2a1	C2a2	C2a3
5	0,283	0,222	0,239	0,192	0,283	0,239	0,18	0,141
10	0,337	0,337	0,283	0,254	0,337	0,283	0,23	0,184
20	0,418	0,4	0,352	0,326	0,4	0,352	0,302	0,263
30	0,437	0,422	0,394	0,369	0,422	0,394	0,358	0,308
40	0,462	0,436	0,411	0,389	0,462	0,423	0,379	0,333
50	0,473	0,461	0,438	0,416	0,473	0,438	0,378	0,354
60	0,465	0,444	0,434	0,415	0,465	0,444	0,389	0,359
70	0,464	0,445	0,427	0,411	0,454	0,436	0,395	0,381
80	0,46	0,435	0,427	0,42	0,452	0,443	0,412	0,391
90	0,455	0,448	0,432	0,418	0,448	0,44	0,404	0,392
100	0,457	0,442	0,435	0,435	0,442	0,449	0,415	0,397
110	0,464	0,457	0,443	0,436	0,45	0,443	0,417	0,405
120	0,476	0,462	0,436	0,43	0,436	0,442	0,418	0,407

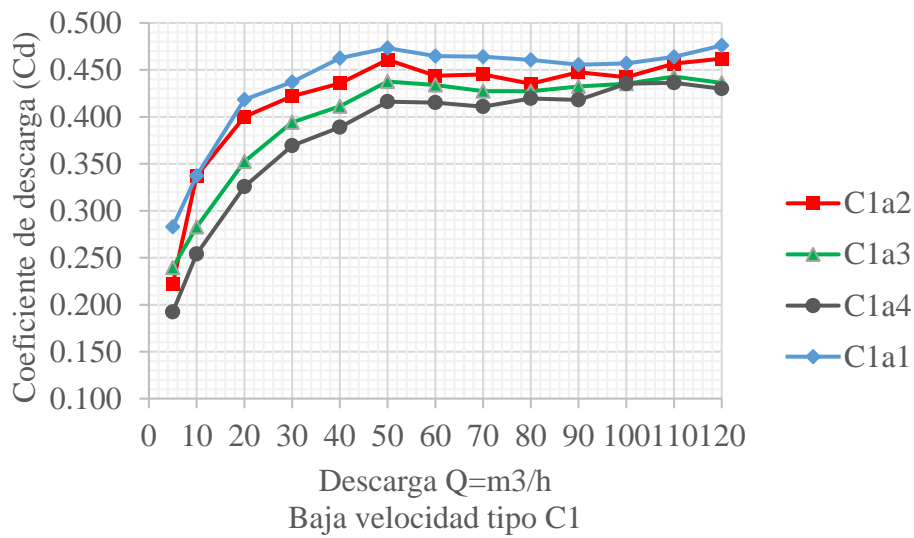


Figura 17. Relación entre el coeficiente de descarga (Cd) y la descarga (Q) de las configuraciones C1a1, C1a2, C1a3 y C1a4.

Nota. C1 Baja velocidad cuando  $c = 10 \text{ mm}$

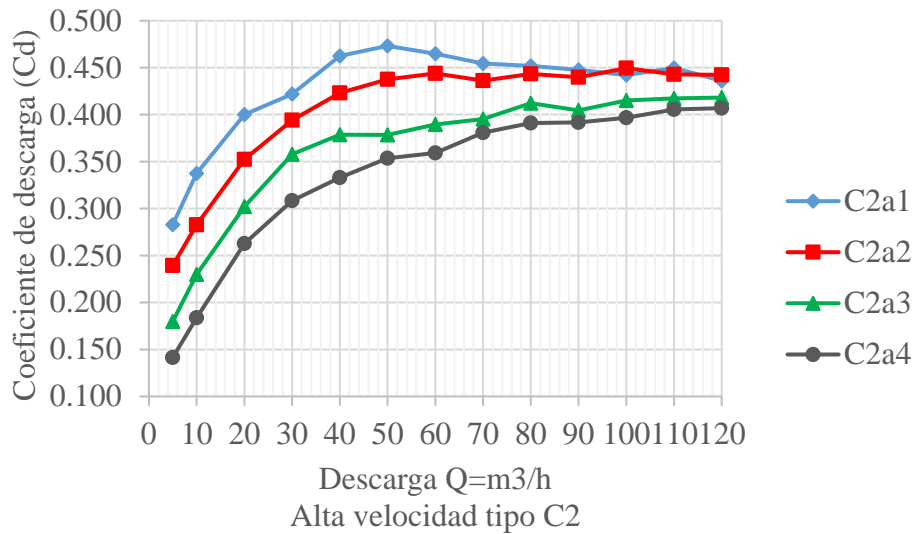


Figura 18. Relación entre el coeficiente de descarga (Cd) y la descarga (Q) de las configuraciones C2a1, C2a2, C2a3 y C2a4.

Nota. C2 Baja velocidad cuando  $c = 20 \text{ mm}$

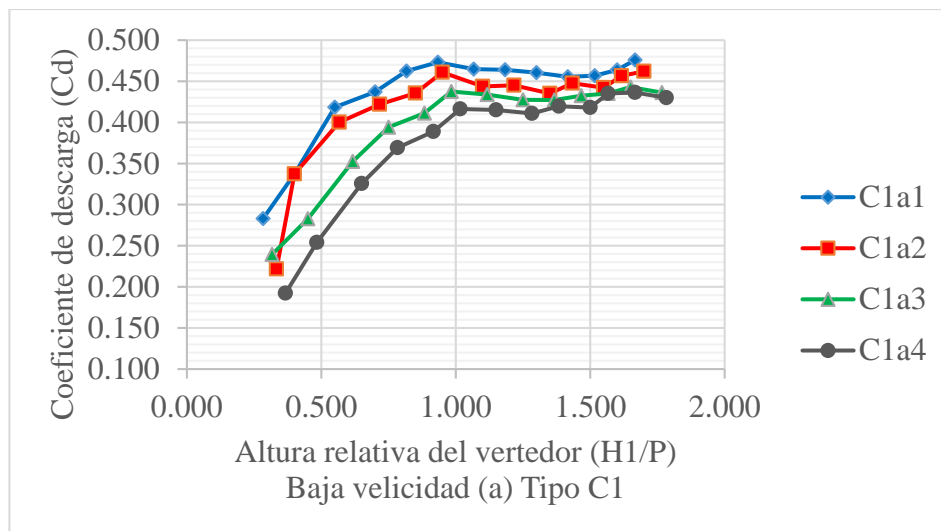
En donde se observa las curvas para los diferentes esquemas y de la cual podemos deducir que se obtuvo un comportamiento ascendente del coeficiente de descarga cuando  $H_1/P < 1$ , es decir, a medida que aumenta la altura relativa del aliviadero el

coeficiente de descarga aumenta, Cuando  $H_1/P > 1$  el Cd sufre disminuciones insignificantes, el mismo comportamiento se ve en los dos tipos C1 y C2 .

**Tabla 15**

*Resultados obtenidos de relación de tirante H1 y altura de Aliviadero P*

descarga	Carga relativa en el aliviadero (H1/P)							
	Baja velocidad (C1)				Alta velocidad (C2)			
	Q	C1a1	C1a2	C1a3	C1a4	C2a1	C2a2	C2a3
5	0,283	0,333	0,317	0,367	0,283	0,317	0,383	0,45
10	0,4	0,4	0,45	0,483	0,4	0,45	0,517	0,6
20	0,55	0,567	0,617	0,65	0,567	0,617	0,683	0,75
30	0,7	0,717	0,75	0,783	0,717	0,75	0,8	0,883
40	0,817	0,85	0,883	0,917	0,817	0,867	0,933	1,017
50	0,933	0,95	0,983	1,017	0,933	0,983	1,083	1,133
60	1,067	1,1	1,117	1,15	1,067	1,1	1,2	1,267
70	1,183	1,217	1,25	1,283	1,2	1,233	1,317	1,35
80	1,3	1,35	1,367	1,383	1,317	1,333	1,4	1,45
90	1,417	1,433	1,467	1,5	1,433	1,45	1,533	1,567
100	1,517	1,55	1,567	1,567	1,55	1,533	1,617	1,667
110	1,6	1,617	1,65	1,667	1,633	1,65	1,717	1,75
120	1,667	1,7	1,767	1,783	1,767	1,75	1,817	1,85



*Figura 19.* Relación entre el coeficiente de descarga (Cd) y altura relativa del aliviadero (H1/P) de las configuraciones C2a1, C2a2, C2a3 y C2a4.

*Nota.* C1 Baja velocidad cuando  $c = 10$  mm

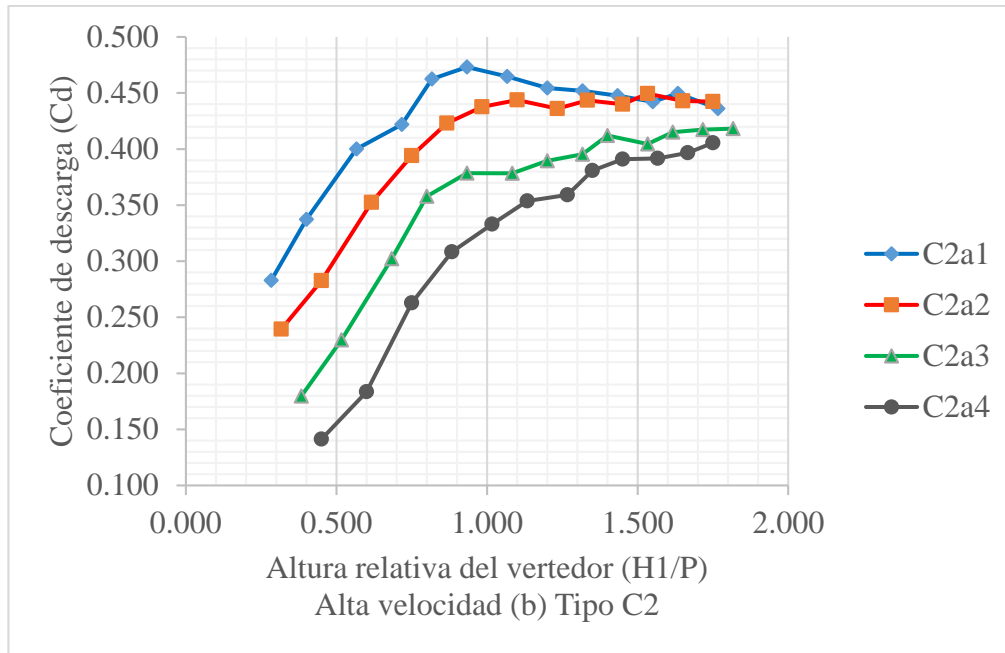


Figura 20. Relación entre el coeficiente de descarga (Cd) y altura relativa del aliviadero (H1/P) de las configuraciones C2a1, C2a2, C2a3 y C2a4.

Nota. C2 Baja velocidad cuando  $c = 20 \text{ mm}$

### 5.1.2. Comparación de la capacidad de descarga entre aliviadero en forma de engranaje y aliviadero lineal.

La capacidad de descarga entre el aliviadero en forma de engranaje y aliviadero lineal se presenta en la tabla 16, se analizó la capacidad de descarga de un aliviadero lineal y un aliviadero en forma de engranaje, para la cual se calculó la relación S, para el tipo C1 y para el tipo C2, donde podemos ver que para una descarga de  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  se tiene un S de menor para los dos tipos C1 Y C2 con 4 esquemas cada uno, y un valor máximo de S para una descarga de  $80 \text{ m}^3/\text{h}$ .

**Tabla 16**

*Resultados de las relaciones de la capacidad de la descarga de aliviadero en forma de engranaje y aliviadero lineal*

La relación de capacidad de descarga de aliviadero tipo engranaje y lineal (S=Qe/QL)								
Descarga (m <sup>3</sup> /h)	C1a1	C1a2	C1a3	C1a4	C2a1	C2a2	C2a3	C2a4
5	0,903	1,089	0,971	0,814	0,906	0,906	0,845	0,960
10	0,926	0,967	0,952	0,870	0,946	0,967	0,814	0,904
20	0,929	0,976	0,963	0,907	0,970	0,976	0,890	0,953
30	0,960	0,986	0,981	0,950	0,988	0,986	0,912	0,942
40	0,974	0,988	0,981	0,944	0,975	0,988	0,928	0,970
50	0,974	0,988	0,987	0,949	0,985	0,988	0,940	0,966
60	0,980	1,002	0,990	0,963	0,979	1,002	0,945	0,975
70	0,978	0,995	0,988	0,962	0,984	0,995	0,960	0,988
80	0,975	0,998	0,985	0,977	0,988	0,998	0,959	0,986
90	0,985	0,994	0,991	0,975	0,992	0,994	0,959	0,975
100	0,984	0,997	0,994	0,991	1,001	0,997	0,931	0,936
110	0,982	0,993	0,994	0,986	1,002	0,993	0,938	0,943
120	0,970	0,983	0,988	0,985	1,012	0,983	0,937	0,938

### 5.1.3. Determinación de la ecuación de coeficiente de descarga para un aliviadero en forma de engranaje.

Usando un método estadístico regresión lineal múltiple y los datos medidos, se deduce una fórmula experimental para el coeficiente de descarga se deriva de la siguiente manera:

$$C_d = 0,377 + 0,038 \frac{H_1}{P} + 0,014 \frac{a}{c} - 0,022 \frac{a}{b} \dots \dots \dots [Ecuación 37]$$

Donde:

Cd = Coeficiente de descarga

H1 = Carga hidráulica que se produce en el aliviadero

P = Altura de pantalla del aliviadero

a = Ancho de engranajes

b = Distancia entre los engranajes

c = altura de engranajes

La cual remplazando a la formula se obtiene los resultados como se indica en la tabla 17.

**Tabla 17**

*Resultados obtenidos a partir de la fórmula planteada de coeficiente de descarga para aliviadero tipo engranaje*

Descarga	Coeficiente de descarga (Cd) de acuerdo la formula obtenida							
	Baja velocidad (C1)				Alta velocidad (C2)			
Q	C1a1	C1a2	C1a3	C1a4	C2a1	C2a2	C2a3	C2a4
20	0,39	0,383	0,376	0,370	0,395	0,392	0,391	0,390
30	0,396	0,388	0,382	0,375	0,400	0,398	0,395	0,395
40	0,40	0,393	0,387	0,380	0,404	0,402	0,400	0,400
50	0,404	0,397	0,39	0,384	0,408	0,406	0,406	0,404
60	0,410	0,403	0,395	0,389	0,414	0,411	0,411	0,409
70	0,414	0,407	0,401	0,394	0,419	0,416	0,415	0,412
80	0,418	0,412	0,405	0,398	0,423	0,42	0,418	0,416
90	0,423	0,415	0,409	0,402	0,427	0,424	0,423	0,421
100	0,427	0,42	0,413	0,405	0,432	0,427	0,426	0,424
110	0,43	0,422	0,416	0,408	0,435	0,432	0,430	0,428
120	0,432	0,426	0,42	0,413	0,440	0,436	0,434	0,431

Cabe mencionar que cuando la descarga es de  $5 \text{ m}^3/\text{h}$  y  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ , el nivel del agua está pasa por debajo de los engranajes fluyendo por las brechas, por lo estos casos no se han tenido en cuenta al deducir ecuación (37) se puede usar cuando  $H_1 > c$ .

Para el primer objetivo se analizó primero el flujo sobre el aliviadero en forma de engranaje, donde el perfil de salida libre sobre el aliviadero tiene redistribución que afecta el flujo, por lo que el flujo de aproximación se ve obligado

a separarse en dos partes: una parte que fluye entre engranajes, y la otra parte que fluye por encima del engranaje. Entonces en la fig. 19,  $V_{21}$  representa la velocidad de salida a través de los huecos,  $V_{22}$  representa la velocidad de salida por encima del engranaje,  $H_1$  es la profundidad del agua en la cresta del vertedero bajo,  $H_2$  es la profundidad del agua en la cresta del vertedero alto,  $V_{11}$  es la velocidad de aproximación en la sección aguas arriba con la profundidad del agua de  $H_1$  y  $V_{12}$  es la velocidad en la sección aguas arriba con la profundidad del agua de  $H_2$ .

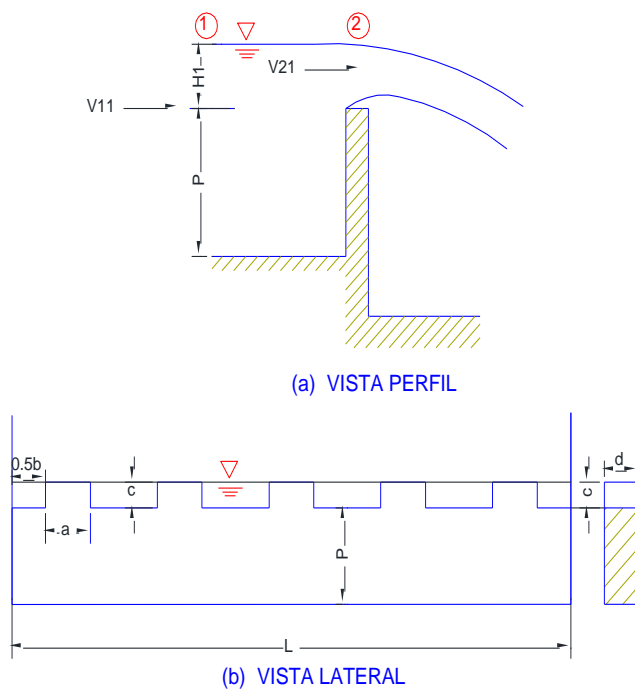
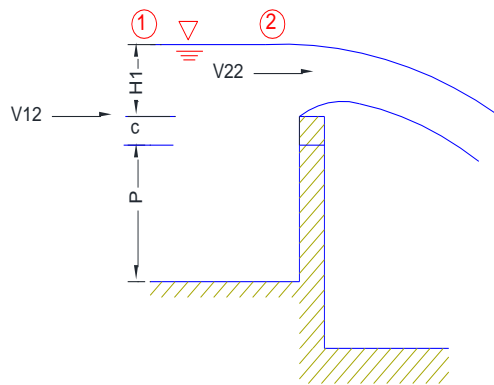
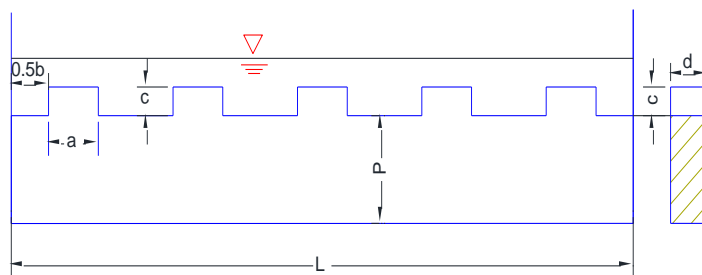


Figura 21. Descarga fluyendo a través de brechas



(a) VISTA PERFIL



(b) VISTA LATERAL

Figura 22. Descarga fluyendo por encima de los engranajes

La descarga de la presa en forma de engranaje del canal aguas arriba puede expresarse como:

$$Q=Q_1+Q_2 \dots \dots \dots \text{[Ecuación 38]}$$

Donde  $Q_1$  es la descarga a través de brechas, y  $Q_2$  es la descarga por encima de los engranajes. De acuerdo con el principio de flujo de vertedero, las descargas a través y por encima de los engranajes se pueden obtener, por separado, como:

$$Q_1 = nLCd_1\sqrt{2g}H_{01}^{3/2} \dots \dots \dots \text{[Ecuación 39]}$$

$$Q_2 = nLCd_2\sqrt{2g}H_{02}^{3/2} \dots \dots \dots \text{[Ecuación 40]}$$

Donde  $Cd_1$ : es el coeficiente de descarga de flujo a través de huecos,  $Cd_2$  es el coeficiente de flujo de descarga por encima de los engranajes,  $g$  es la aceleración



gravitacional,  $H_{01}$  es la borde del agua en la cresta del vertedero bajo, y  $H_{02}$  es la borde del agua en la cresta del vertedero alto.  $H_{01}$  y  $H_{02}$  se pueden expresar de la siguiente manera:

$$H_{01} = H_1 + \frac{\alpha V_{11}^2}{2g} \dots \dots \dots [\text{Ecuación 41}].$$

$$H_{02} = H_2 + \frac{\alpha V_{12}^2}{2g} \dots \dots \dots [\text{Ecuación 42}]$$

Donde  $\alpha$  es el factor de corrección de energía cinética (coeficiente de Coriolis). Sustituyendo las ecuaciones (39) y (40) en la ecuación (38) se obtiene:

$$Q = nLCd_1\sqrt{2g}\left(H_1 + \frac{\alpha V_{11}^2}{2g}\right)^{3/2} + nLCd_2\sqrt{2g}\left(H_2 + \frac{\alpha V_{12}^2}{2g}\right)^{3/2} \dots \dots \dots [\text{Ecuación 43}]$$

En comparación con el aliviadero de cresta delgada, el aliviadero de corona ancha clásica y algunos otros aliviaderos, los aliviaderos en forma de engranaje son más complicado en términos de sus características geométricas, y tiene efectos más fuertes en el régimen de flujo. Ecuación (43) se puede usar para calcular la capacidad de descarga de un vertedero en forma de engranaje, pero es difícil calcular  $Cd_1$  y  $Cd_2$  por separado.

Teniendo en cuenta este factor, se utilizó un coeficiente integral para evaluar la capacidad de descarga, y ecuación (44) era simplificado como:

$$Q = C_d L \sqrt{2g} H_{01}^{3/2} \dots \dots \dots [\text{Ecuación 44}]$$

donde  $C_d$  es el coeficiente de descarga integral, ecuación (44) muestra que la capacidad de descarga está influenciada por la profundidad del agua en el vertedero.

## 5.2. Contrastación de hipótesis

La hipótesis a probar es la siguiente:

En esta investigación permite determinar la relación que existe entre el coeficiente de descarga, la descarga, los parámetros geométricos y el planteamiento por método probabilístico de una nueva ecuación de coeficiente de descarga para un aliviadero en forma de engranaje. A continuación, se realiza la contrastación de hipótesis.

Para realizar la prueba de la hipótesis se va a seguir la siguiente secuencia:

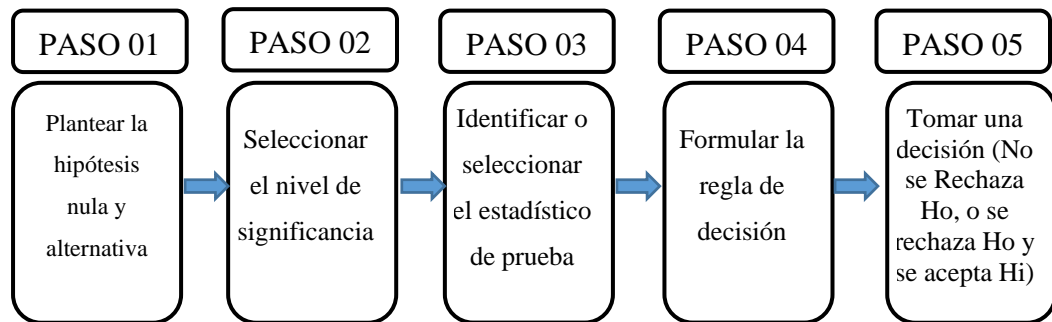


Figura 23. los pasos para seguir la validación de la hipótesis.

### 5.2.1. Paso N° 01: Hipótesis nula e hipótesis alternativa

Se va a probar la hipótesis sobre la diferencia de medias, bajo el supuesto de que la hipótesis nula es verdadera; es decir  $\mu_X - \mu_Y = 0$ .

Para todos los casos en diferentes caudales, y a la variedad de distribución de proporciones para el coeficiente de descarga la hipótesis nula será la siguiente:

$$H_0: \mu_N = \mu_G \text{ ó } \mu_N - \mu_G = 0$$

Donde  $\mu_N$ , representa a la media aritmética de la descarga, y  $\mu_M$  representa a la media aritmética del coeficiente de descarga para distintas configuraciones del aliviadero.

Mientras que la hipótesis alternativa se plantea de la siguiente manera:

$$H1: uN < uG \text{ ó } uN - uG < 0$$

### 5.2.2. Paso N° 02: Nivel de significancia

El nivel de significancia queda definido en una probabilidad de 0,05 (5 %)

### 5.2.3. Paso N° 03: Cálculo del estadístico de prueba

Este valor es determinado a partir de la información de la muestra, y se va a utilizar para aceptar o rechazar la hipótesis nula.

El estadístico de prueba para una distribución t-Student con  $n + m - 2$  grados de libertad es el siguiente:

$$t_p = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{(n-1)S_X^2 + (m-1)S_Y^2}{n+m}}} \sqrt{\frac{n(n+m-2)}{n+m}} \dots\dots\dots [\text{Ecuación 45}]$$

Donde:

$t_p$  : Estadístico de prueba

X, Y : Medias muestrales

$S_x^2, S_y^2$  : Varianzas

m, n : Tamaño de muestras

#### 5.2.3.1. Hipótesis específica 1.

La relación entre el coeficiente de descarga y la descarga para distintas caudales y configuraciones es la siguiente:

**Tabla 18***Análisis estadístico la relación coeficiente de descarga y la descarga*

Descarga	Coeficiente de descarga (Cd)							
	Baja velocidad (C1)				Alta velocidad (C2)			
Q	C1a1	C1a2	C1a3	C1a4	C2a1	C2a2	C2a3	C2a4
20	0,418	0,4	0,352	0,326	0,400	0,352	0,302	0,263
30	0,437	0,422	0,394	0,369	0,422	0,394	0,358	0,308
40	0,462	0,436	0,411	0,389	0,462	0,423	0,379	0,333
50	0,473	0,461	0,438	0,416	0,473	0,438	0,378	0,354
60	0,465	0,444	0,434	0,415	0,465	0,444	0,389	0,359
70	0,464	0,445	0,427	0,411	0,454	0,436	0,395	0,381
80	0,46	0,435	0,427	0,420	0,452	0,443	0,412	0,391
90	0,455	0,448	0,432	0,418	0,448	0,440	0,404	0,392
100	0,457	0,442	0,435	0,435	0,442	0,449	0,415	0,397
110	0,464	0,457	0,443	0,436	0,450	0,443	0,417	0,405
120	0,476	0,462	0,436	0,430	0,436	0,442	0,418	0,407
11,00			m,n	Observaciones			:	88,00
10,00			GL	Grados de libertad			:	87,00
95 %				Confiabilidad (%)			:	95,00
70,00			X,Y	Media aritmética			:	0,419
1100,00			Sx2,Sy2	Varianza			:	0,002
			tc	Valor de t critico			:	1,663
			tp	Estadístico de prueba			:	2,178

La relación entre la carga relativa en el aliviadero  $H_1/P$  y la descarga para distintas caudales y configuraciones es la siguiente:

**Tabla 19***Análisis estadístico la relación carga relativa en el aliviadero y la descarga*

Descarga	Carga relativa en el aliviadero (H1/P)							
	Baja velocidad (C1)				Alta velocidad (C2)			
Q	C1a1	C1a2	C1a3	C1a4	C2a1	C2a2	C2a3	C2a4
20	0,550	0,567	0,617	0,650	0,567	0,617	0,683	0,750
30	0,700	0,717	0,750	0,783	0,717	0,750	0,800	0,883
40	0,817	0,850	0,883	0,917	0,817	0,867	0,933	1,017
50	0,933	0,950	0,983	1,017	0,933	0,983	1,083	1,133
60	1,067	1,100	1,117	1,150	1,067	1,100	1,200	1,267
70	1,183	1,217	1,250	1,283	1,200	1,233	1,317	1,350
80	1,300	1,350	1,367	1,383	1,317	1,333	1,400	1,450
90	1,417	1,433	1,467	1,500	1,433	1,450	1,533	1,567
100	1,517	1,550	1,567	1,567	1,550	1,533	1,617	1,667
110	1,600	1,617	1,650	1,667	1,633	1,650	1,717	1,750
120	1,667	1,700	1,767	1,783	1,767	1,750	1,817	1,850
11,00			m, n	Observaciones			:	88,00
10,00			GL	Grados de libertad			:	87,00
95 %				Confiabilidad (%)			:	95,00
70,00			X, Y	Media aritmética			:	1,227
1100,00			Sx2, Sy2	Varianza			:	0,134
			tc	Valor de t critico			:	1,663
			tp	Estadístico de prueba			:	2,152

**5.2.3.2. Hipótesis específica 2.**

La diferencia entre coeficiente de descarga en el aliviadero en forma de engranaje y coeficiente de descarga en el aliviadero en forma lineal

**Tabla 20***La relación de la descarga de aliviadero en forma de engranaje y aliviadero lineal (s)*

Descarga (m <sup>3</sup> /h)	La relación de la descarga de aliviadero en forma de engranaje y aliviadero lineal (S)							
	Baja velocidad (C1)				Alta velocidad (C2)			
Q	C1a1	C1a2	C1a3	C1a4	C2a1	C2a2	C2a3	C2a4
5	0,903	1,089	0,971	0,814	0,906	0,906	0,845	0,960
10	0,926	0,967	0,952	0,870	0,946	0,967	0,814	0,904
20	0,929	0,976	0,963	0,907	0,970	0,976	0,890	0,953
30	0,960	0,986	0,981	0,950	0,988	0,986	0,912	0,942
40	0,974	0,988	0,981	0,944	0,975	0,988	0,928	0,970
50	0,974	0,988	0,987	0,949	0,985	0,988	0,940	0,966
60	0,980	1,002	0,990	0,963	0,979	1,002	0,945	0,975
70	0,978	0,995	0,988	0,962	0,984	0,995	0,960	0,988
80	0,975	0,998	0,985	0,977	0,988	0,998	0,959	0,986
90	0,985	0,994	0,991	0,975	0,992	0,994	0,959	0,975
100	0,984	0,997	0,994	0,991	1,001	0,997	0,931	0,936
110	0,982	0,993	0,994	0,986	1,002	0,993	0,938	0,943
120	0,970	0,983	0,988	0,985	1,012	0,983	0,937	0,938
11,00			m, n	Observaciones			:	88,00
10,00			GL	Grados de libertad			:	87,00
95 %				Confiabilidad			:	0,95
70,00			X, Y	Media aritmética			:	0,974
1100,00			Sx2, Sy2	Varianza				0,001
			tc	Valor de t critico			:	1,663
			tp	Estadística de prueba			:	2,161

**5.2.3.3. Hipótesis específica 3.**

La ecuación del coeficiente de descarga para un aliviadero en forma de engranaje se obtiene utilizando los parámetros geométricos del aliviadero en forma de engranaje que permite calcular el coeficiente de descarga (Cd).

**Tabla 21**

*Error relativo que se obtiene al calcular con la ecuación obtenida y ecuación general*

Descarga (m <sup>3</sup> /h)	Error relativo que se obtiene al calcular con la ecuación obtenida y ecuación genérica							
	Baja velocidad (C1)				Alta velocidad (C2)			
	C1a1	C1a2	C1a3	C1a4	C2a1	C2a2	C2a3	C2a4
20	0,068	0,044	0,068	0,135	0,014	0,113	0,294	0,482
30	0,095	0,080	0,032	0,015	0,051	0,009	0,105	0,280
40	0,135	0,097	0,060	0,023	0,126	0,050	0,058	0,200
50	0,145	0,138	0,108	0,078	0,137	0,071	0,073	0,143
60	0,119	0,092	0,089	0,064	0,110	0,074	0,054	0,139
70	0,108	0,085	0,063	0,042	0,079	0,046	0,050	0,083
80	0,091	0,053	0,052	0,052	0,064	0,054	0,015	0,064
90	0,071	0,072	0,055	0,038	0,045	0,036	0,046	0,074
100	0,066	0,050	0,052	0,070	0,023	0,049	0,027	0,070
110	0,073	0,075	0,061	0,064	0,032	0,025	0,031	0,054
120	0,091	0,079	0,037	0,040	0,009	0,015	0,038	0,060
11,00			m, n	Observaciones			:	88,00
10,00			GL	Grados de libertad			:	87,00
95 %				Confiabilidad			:	0,95
70,00			X, Y	Media aritmética			:	0,078
1100,00			Sx2, Sy2	Varianza			:	8,928
			tc	Valor de t critico			:	1,663
			tp	Estadístico de prueba			:	2,115

#### 5.2.4. Paso N° 04: Formular la regla de decisión

La regla de decisión se formula teniendo en cuenta que se trata de una prueba unilateral.

Para pruebas unilaterales, se rechaza la hipótesis nula cuando:

##### 5.2.4.1. Hipótesis Específica 1.

Hipótesis nula (Ho): No existe relación entre el coeficiente de descarga y la descarga.

Hipótesis alterna (H1): Existe una relación entre el coeficiente de descarga y la descarga.

Trabajando con un margen de error del 5 %, si  $P < 0,05$  En tal caso el estadístico de prueba cae en la región de rechazo de la figura 24, por lo tanto se

rechaza la hipótesis nula que afirma que no existe relación entre el coeficiente de descarga, la descarga y el valor de  $H_1/P$  y se acepta la hipótesis alterna.

El valor crítico, para la aceptación de o rechazo de la hipótesis nula de acuerdo a las tablas t - Student, para un nivel de significancia de 0,05 y 10 grados de libertad, queda definido en:

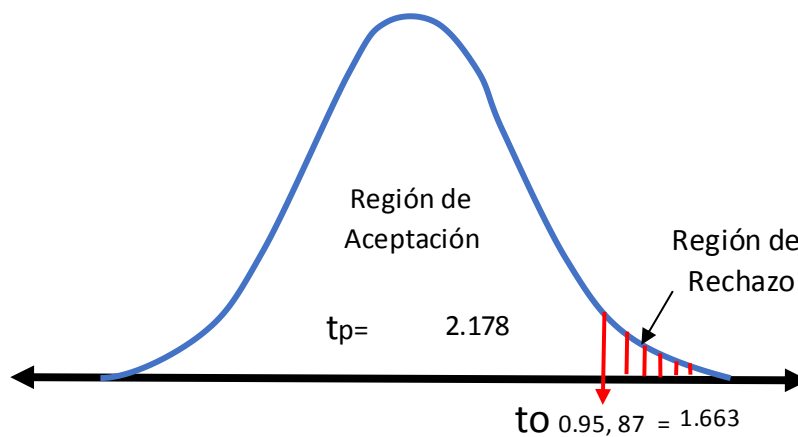


Figura 24. Estadístico de prueba en t - Student , Si existe la relación entre coeficiente de descarga y la descarga

Hipótesis nula ( $H_0$ ): No existe relación entre la descarga y el valor  $H_1/P$ .

Hipótesis alterna ( $H_1$ ): Existe una relación entre la descarga y valor  $H_1/P$ .

Trabajando con un margen de error del 5 %, si  $P < 0,05$  En tal caso el estadístico de prueba cae en la región de rechazo de la figura 25, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula que afirma que no existe relación entre el coeficiente de descarga, la descarga y el valor de  $H_1/P$  y se acepta la hipótesis alterna.

El valor crítico, para la aceptación de o rechazo de la hipótesis nula de acuerdo a las tablas t - Student, para un nivel de significancia de 0,05 y 10 grados de libertad, queda definido en:



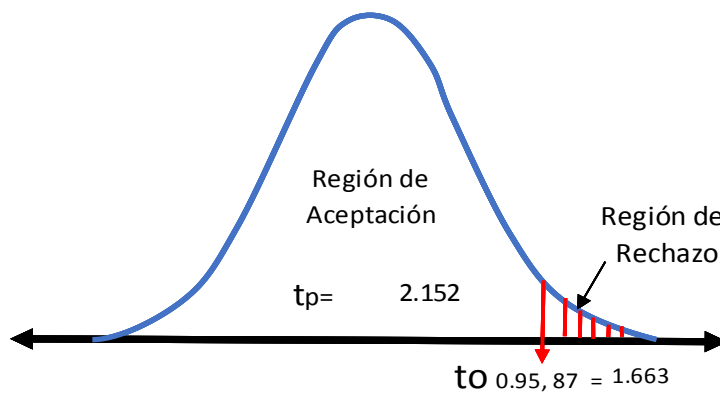


Figura 25. Estadístico de prueba en t - Student , Si existe la relación entre la descarga y H1/P  
**5.2.4.2. Hipótesis Específica 2.**

Hipótesis nula (Ho): No existe diferencia entre el coeficiente de descarga del aliviadero en forma de engranaje y aliviadero lineal.

Hipótesis alterna (H1): Existe diferencia entre el coeficiente de descarga de aliviadero en forma de engranaje y aliviadero lineal.

Trabajando con un margen de error del 5 %, si  $P < 0,05$  En tal caso el estadístico de prueba cae en la región de rechazo de la figura 26, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula que afirma que no existe diferencia entre el coeficiente de descarga, de un aliviadero lineal y un aliviadero en forma de engranaje; por lo tanto, se acepta la hipótesis alterna.

El valor crítico, para la aceptación de o rechazo de la hipótesis nula de acuerdo a las tablas t Student, para un nivel de significancia de 0,05 y 12 grados de libertad, queda definido en:

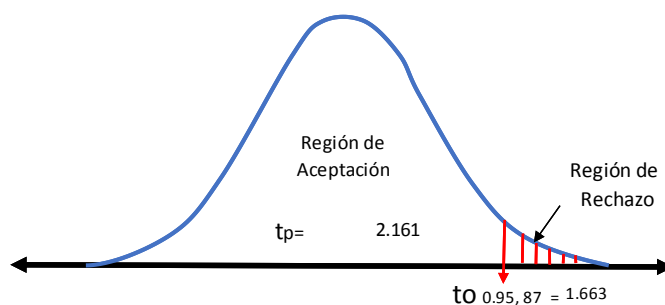


Figura 26. Estadístico de prueba en t-Student , Si Existe diferencia entre el coeficiente de descarga de aliviadero en forma de engranaje y aliviadero lineal

### 5.2.4.3. Hipótesis Específica 3.

Hipótesis nula ( $H_0$ ): la ecuación de coeficiente de descarga para un aliviadero en forma de engranaje no permite calcular  $C_d$ .

Hipótesis alterna ( $H_1$ ): la ecuación de coeficiente de descarga para un aliviadero en forma de engranaje permite calcular  $C_d$ .

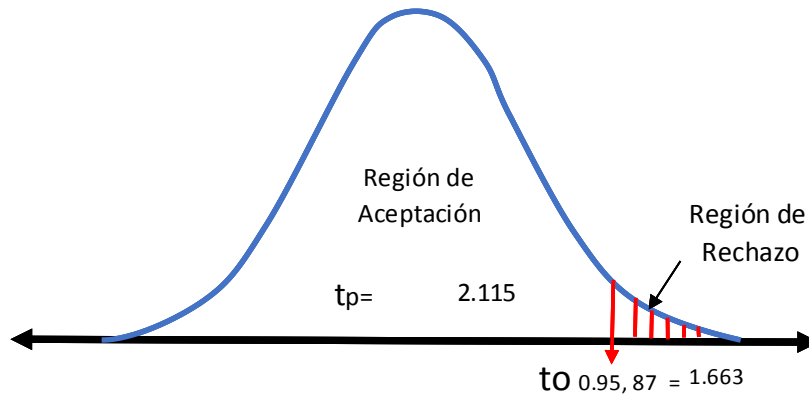


Figura 27. Estadístico de prueba en t - Student la ecuación de coeficiente de descarga para un aliviadero en forma de engranaje permite calcular  $C_d$

### 5.2.5. Paso N° 05: Toma de una decisión.

La toma de una decisión se hará respecto a los estadísticos de prueba calculados para distintas edades del concreto:

#### 5.2.5.1. Hipótesis Específica 1.

Los estadísticos de prueba que se han calculado

Hipótesis nula ( $H_0$ ): No existe relación entre el coeficiente de descarga y la descarga.

Hipótesis alterna ( $H_1$ ): Existe una relación entre el coeficiente de descarga y la descarga.

El estadístico de prueba  $t_p$  cae en la región de aceptación de la figura 26, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula que afirma, y se acepta la hipótesis

alternativa. Por lo tanto, si existe relación entre el coeficiente de descarga y la descarga, con un nivel de significancia de 0,05 (5 %).

Hipótesis nula ( $H_0$ ): No existe relación entre el coeficiente de descarga y el valor  $H_1/P$ .

Hipótesis alterna ( $H_1$ ): Existe una relación entre el coeficiente de descarga y valor  $H_1/P$ .

El estadístico de prueba  $t_p$  cae en la región de aceptación de la figura 24 por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula que afirma, y se acepta la hipótesis alternativa. Por lo tanto, si existe relación entre el coeficiente de descarga y el valor de carga relativa en el aliviadero, con un nivel de significancia de 0,05 (5 %).

#### **5.2.5.2. Hipótesis Especifica 2.**

Hipótesis nula ( $H_0$ ): No existe diferencia entre el coeficiente de descarga del aliviadero en forma de engranaje y aliviadero lineal.

Hipótesis alterna ( $H_1$ ): Existe diferencia entre el coeficiente de descarga de aliviadero en forma de engranaje y aliviadero lineal.

El estadístico de prueba  $t_p$  cae en la región de aceptación de la figura 25, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula que afirma, y se acepta la hipótesis alternativa. Por lo tanto, si existe una diferencia entre el coeficiente de descarga de aliviadero en forma de engranaje y aliviadero lineal, con un nivel de significancia de 0,05 (5 %).

#### **5.2.5.3. Hipótesis Especifica 3.**

Hipótesis nula ( $H_0$ ): la ecuación de coeficiente de descarga para un aliviadero en forma de engranaje no permite calcular  $C_d$ .

Hipótesis alterna (H1): la ecuación de coeficiente de descarga para un aliviadero en forma de engranaje permite calcular Cd.

El estadístico de prueba  $t_p$  cae en la región de aceptación de la figura 26, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula que afirma, y se acepta la hipótesis alternativa. Por lo tanto, la ecuación de coeficiente de descarga para aliviadero en forma de engranaje permite calcular, con un nivel de significancia de 0,05 (5 %).

La confiabilidad de esta hipótesis la comparación de datos medidos y los datos calculados en la ecuación de Cd con los valores absolutos de errores relativos menores a 5 % y al 10 % que representa 29,5 % y el 79,5 % respectivamente mientras que los esquemas con los valores absolutos de errores relativos mayores al 20 % solo cuentan para el 4,5 % de todos los esquemas. Por lo tanto, se puede demostrar que ecuación de coeficiente de descarga tiene una alta precisión en el cálculo de Cd de la forma de engranaje de una represa. Mediante la comparación del valor calculado y el valor medido de Cd, el histograma de error se traza en la figura 27 y muestra que los esquemas con los valores absolutos de errores relativos menores al 5 % y al 10 % representan el 29,5 % y el 79,5 % de todos los esquemas, respectivamente, mientras que los esquemas con los valores absolutos de errores relativos mayores al 20% solo cuentan para el 4,5 % de todos los esquemas. Por lo tanto, se puede demostrar que ecuación (37) tiene una alta precisión en el cálculo de Cd de la forma de engranaje de aliviadero de presa.

**Tabla 22**

*Resultado de error relativo en porcentaje entre coeficiente de descarga obtenida de laboratorio y coeficiente de descarga calculada formula determinada*

<b>Error relativo entre Cd laboratorio y Cd con parámetros geométricos</b>								
<b>Q</b>	<b>C1a1</b>	<b>C1a2</b>	<b>C1a3</b>	<b>C1a4</b>	<b>C2a1</b>	<b>C2a2</b>	<b>C2a3</b>	<b>C2a4</b>
20	6,79 %	4,39 %	6,81 %	13,52 %	1,39 %	11,35 %	29,4 %	48,23 %
30	9,47 %	7,99 %	3,21 %	1,49 %	5,15 %	0,85 %	10,52 %	27,95 %
40	13,48 %	9,70 %	5,98 %	2,34 %	12,64 %	4,99 %	5,79 %	20,02 %
50	14,50 %	13,82 %	10,79 %	7,83 %	13,68 %	7,13 %	7,34 %	14,26 %
60	11,86 %	9,24 %	8,86 %	6,38 %	11,02 %	7,43 %	5,42 %	13,91 %
70	10,77 %	8,51 %	6,30 %	4,16 %	7,88 %	4,64 %	4,97 %	8,27 %
80	9,13 %	5,27 %	5,23 %	5,25 %	6,38 %	5,35 %	1,48 %	6,42 %
90	7,14 %	7,17 %	5,47 %	3,84 %	4,49 %	3,58 %	4,64 %	7,37 %
100	6,59 %	5,04 %	5,20 %	7,04 %	2,33 %	4,93 %	2,72 %	6,99 %
110	7,30 %	7,49 %	6,14 %	6,40 %	3,25 %	2,52 %	3,09 %	5,43 %
120	9,13 %	7,87 %	3,66 %	4,00 %	0,93 %	1,54 %	3,79 %	5,98 %

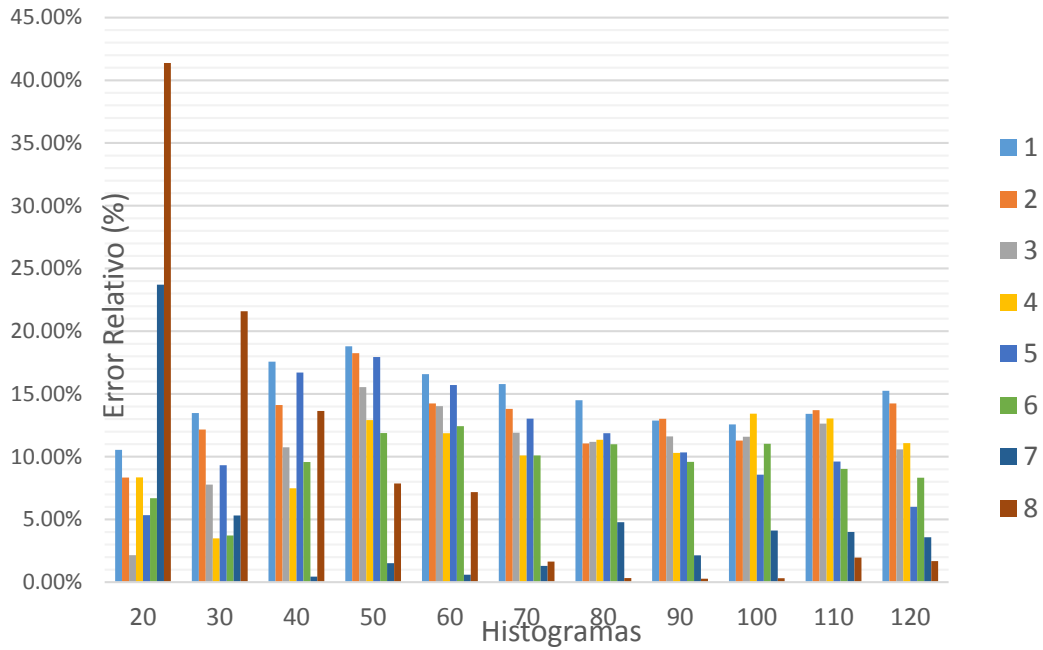


Figura 28. Histograma de error de Cd de vertedero en forma de engranaje

### 5.3. Discusión de resultados

#### 5.3.1. Relación entre el coeficiente de descarga, la descarga, $H_1/P$ y los parámetros b y c.

A través de una inspección o estudio de ingeniería, un aliviadero puede ser identificado como deficiente en una o más de las siguientes áreas: capacidad hidráulica, integridad estructural, operación, rendimiento y mantenimiento (Kabiri y Jahaveri, 2012)

Actualmente, muchos aliviaderos existentes ubicados en todo el mundo requieren

Rehabilitación por problemas de seguridad de presas según (Leite, Pfister, Schleiss y Boillat, 2012). Por ejemplo, en los Estados Unidos la Asociación de Funcionarios Estatales de Seguridad de Presas (ASDSO) estima que más de 1600 presas potenciales de alto riesgo reguladas por el estado necesitan rehabilitación a

un costo total de más de \$ 18.2 mil millones (Association of State Dam Safety Officials, 2015).

Por ello hay motivación para el desarrollo continuo de varias herramientas de diseño hidráulico que facilitan diseños mejores y más rentables para hacer frente a estas deficiencias (Leandro, Lopes, Carvalho, Páscoa, Martins y Romagnoli, 2015)

Un método para superar los vertederos con deficiencia de capacidad es aumentar la longitud de la cresta de la sección de control, o agregar un control pasivo como un aliviadero auxiliar. Un desarrollo reciente es los vertederos en forma de engranaje que reduce aún más la huella del aliviadero (en relación con presas laberínticas) a través de rampas, salientes y colocación de longitud (Leandro *et al*, 2016).

En las ecuaciones (38) a (44) muestran que  $Cd_1$  y  $Cd_2$  tienen ciertas relaciones con los parámetros geométricos del vertedero en forma de engranaje, pero estas relaciones no se pueden obtener directamente con el método teórico. Por lo tanto, una serie de experimentos se llevó a cabo.

En este estudio, las profundidades y las velocidades del agua en diferentes secciones de engranajes con dos alturas diferentes, junto con 08 diferentes esquemas con diferentes descargas, fueron medidos. Cada esquema incluyó 13 descargas:  $5\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $10\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $20\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $30\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $40\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $50\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $60\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $70\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $80\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $90\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $100\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $110\text{ m}^3/\text{h}$  y  $120\text{ m}^3/\text{h}$ .

$Cd$  se puede obtener de ecuación (44), donde  $H_{01}$  se calcula con ecuación (42) Con los valores  $Q$ ,  $L$  y  $H_{01}$  conocidos,  $Cd$  puede ser calculado.

Según análisis los resultados obtenidos con los datos experimentales la relación entre la descarga y el coeficiente descarga para diferentes alturas guarda una relación a menores caudales el coeficiente de descarga fluctúa entre 0.141 hasta 0.473 para aliviaderos según que van aumentando la descarga, de los 13 caudales planteadas de los cuales  $5 \text{ m}^3/\text{h}$  y  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  no logra superar la altura de engranaje (c) en lo cual no se considera los datos para obtener ecuación de Cd.

Cuando supera la descarga  $60 \text{ m}^3/$  empieza oscilar entre Cd 0,36 a 0,48 de misma manera que su incremento es insignificante fluctúa en rangos pequeños.

La comparación entre la figura 17 y la figura 18 muestra que, con la misma descarga y ancho de engranajes, Cd es influenciado por la altura de los engranajes, y es relativamente más grande para el tipo de engranaje bajo.

En cuanto a coeficiente de descarga que varía con una b y c; la relación de a b representa el efecto preventivo de la presa en forma de engranaje. La figura 17 muestra que las proporciones de un b y una c tiene un fuerte impacto en Cd a menor descarga y menores valores de  $H_1/P$ . Con los aumentos de la descarga y  $H_1/P$ , este impacto se debilita, para la misma descarga, el aliviadero con valores mayores de a, b y c tiene un menor valor de Cd.

### **5.3.2. Comparación de la capacidad de descarga entre aliviadero en forma de engranaje y aliviadero lineal.**

Para estudiar más a fondo la capacidad de descarga de un aliviadero en forma de engranaje en una presa se usó un vertedero lineal, con la misma altura (0,06 m) y ancho (0,5 m) como el vertedero en forma de engranaje, para los experimentos. Se midieron la profundidad del agua en la cresta de la presa y la velocidad de



aproximación. La relación de aumento de la descarga (S) se definió para describir las diferentes capacidades de descarga de estos dos tipos de presas. S es la relación entre la descarga del aliviadero en forma de engranaje y la del aliviadero lineal con la misma profundidad de agua en la cresta de la presa. Se puede calcular con ecuación (42) de la siguiente manera:

$$S = \frac{Q_e}{Q_l} = \frac{C_d}{C_{d1}} \dots \dots \dots [Ecuación 46]$$

Donde  $Q_L$  es la descarga del vertedero lineal y  $C_{d1}$  es el coeficiente de descarga del vertedero lineal. De acuerdo con los datos medidos, los resultados calculados de S para diferentes esquemas experimentales se enumeran en la tabla 7.

Como se muestra en la tabla 15, todos los valores de S están por debajo de 1, lo que significa que, con el mismo  $H_1/P$ , la capacidad de descarga del aliviadero en forma de engranaje es más bajo que el del vertedero lineal. La razón de este fenómeno es que, para el vertedero en forma de engranaje, el engranaje tiene un efecto de bloqueo de agua, y el área de flujo efectivo se reduce. Sin embargo, este nuevo tipo de vertedero no es diseñado para una corriente con gran descarga, y tiene sus propias condiciones de aplicación (Machiels, Piroton, Pierre, Dewals y Erpicum, 2014).

**5.3.3. Determinación de la ecuación de coeficiente de descarga para un aliviadero en forma de engranaje.**

Con la misma descarga, los vertederos con valores mayores de a, b y c tienen valores más pequeños de  $C_d$ . Aunque la capacidad de descarga de un vertedero en forma de engranaje es menor que la de un vertedero lineal con la misma altura y

ancho, como estructura del paisaje en un canal urbano, el vertedero en forma de engranaje tiene sus propias condiciones de aplicación.

En la práctica de ingeniería, un vertedero en forma de engranaje tiene muchos otros parámetros geométricos complicados que no han sido discutido en este documento. Además, solo se consideró la salida libre en este estudio.

Considerando que es un tipo de aliviadero parcialmente nuevo, no se tiene mucha información en cuanto a otros parámetros geométricos para lo cual se propone futuras investigaciones y experimentos con diferentes parámetros geométricos y las condiciones de flujo de salida sumergido.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones

**Primera.** El coeficiente de descarga ( $C_d$ ) está influenciado por los parámetros geométricos del aliviadero, la carga en el aliviadero ( $H_1/P$ ) y los parámetros geométricos: la distancia entre los engranajes ( $b$ ) y altura de los engranajes ( $c$ ).

**Segunda.** Al comparar un aliviadero de forma de engranaje y aliviadero lineal con la misma altura y ancho se hace una relación que no supera el valor de 1; por lo tanto, el coeficiente de descarga de aliviadero en forma de engranaje es menor que el coeficiente de descarga en aliviadero en forma lineal.

**Tercera.** Se determina la ecuación  $C_d = 0,377 + 0,038 \frac{H_1}{P} + 0,014 \frac{a}{c} - 0,022 \frac{a}{b}$  para calcular el coeficiente de descarga en un aliviadero en forma de engranaje, la cual es altamente confiable según los errores relativos menores a 5 % y al 10 % que representa 29,5 % y el 79,5 % respectivamente mientras que los esquemas con los valores absolutos de

errores relativos mayores al 20 % solo cuentan para el 4,5 % de todos los esquemas.

## **6.2. Recomendaciones.**

**Primera.** En estudios posteriores se recomienda hacer más ensayos a mayores caudales y tomando en cuenta nuevos parámetros geométricos.

**Segunda.** Se recomienda no tomar como referencia la presente investigación para la construcción de presas, ya que solo se investigó con caudales menores para fines de laboratorio.

**Tercera.** Se recomienda estudiar otros posibles parámetros en la fórmula de coeficiente de descarga ya que la fórmula que se ha obtenido es para caudales donde la relación de  $H/P$  no supera 1 y el cual satisface la ecuación,

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, R., (2011). *Piano Key Weir Head Discharge Relationships*. Ph. D. Dissertation. Utah State University, Logan.
- Association of State Dam Safety Officials ASDSO, (2015).
- Bautista-Capetillo, C., Robles, O., Júnez-Ferreira, H., y Playun, E. (2014). Discharge coefficient analysis for triangular sharp-crested weirs using low speed photographic technique. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 140(3), 06013005.
- Chanson, H., y Montes, J. (1998). Overflow Characteristics of Circular Weirs: Effects of Inflow Conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124(3), 152-162.
- Creager, W., Justin, J., y Hinds, J. (1945). Stability analysis of landslide dams under surge action based on large-scale flume experiments. *Engineering Geology*. 259(4), 105191.
- Crookston, B., y Tullis, B. (2013). Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs. *I: discharge relationships. J. Irrig. Drain Eng.* 139 (5), 363–370.
- Erpicum, S., Laugier, F., Pfister, M., Piroton, M., Cicero, G. M., y Schleiss, A. (2013). Labyrinth and Piano Key Weirs II. *Water Science and Engineering*, 68, August 2019, 101573.
- García, O. (2011). *Estadística descriptiva y probabilidades para ingenieros*. Volumen I. Bogotá, Colombia: Editorial Macro, p. 280.

- Geng, Y., y Sun, S. 2006. A new type of labyrinth-P.K weir. *South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology* 4(4), 57-59.
- Gharahjeh, S., Aydin, I., y Altan-Sakarya, A. (2015). Weir velocity formulation for sharp-crested rectangular weirs. *Flow Measurement and Instrumentation* 41, 50-56.
- Guo, X., Yang, K., Xia, Q., y Fu, H., 2014. Discharge capacity characteristics of piano key weir. *Journal of Hydraulic Engineering* 45(7), 867-874.
- Hager, W. (1987). Continuous crest profiles for standard spillway. *Jnl. ASCE, Hyd. Engg*, 1987, 113(No.11).
- Hay, N., y Taylor, G., (1970). Performance and design of labyrinth weirs. *Journal of the Hydraulics Division* 96(11), 2337-2357.
- Henderson, P. (1966). Open Channel Flow. *New York: MacMillan Publishing Co*, 23(2), 404-498
- Hinchliff D., y K. L., (1984). Houston, Hydraulic Design and Application of Labyrinth Spillways, *Research Engineering and Research Center, U.S. Bureau of Reclamation.fbbbhgg1111122bppppp*
- Kabiri-Samani, A., Javabheri, A., y Borghei, S. (2013). Discharge coefficient of a rectangular labyrinth weir. *Proceedings of the ICE: Water Management* 166(8), 433-451.
- Khatsuria R. (2005). *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*. New York. USA. Marcel Dekker.

- Laugier, F. (2007). Design and construction of the first piano key weir (PKW) spillway at the Goulours Dam. *International Journal on Hydropower and Dams* 14(5), 94-101.
- Leandro, J., Lopes, P., Carvalho, R., Páscoa, P., Martins, R., y Romagnoli, M. (2014). Numerical and experimental characterization of the 2D vertical average-velocity plane at the centre-profile and qualitative air entrainment inside a gully for drainage and reverse flow. *Comput. Fluids* 102, 52–61.
- Leite, M., Pfister, M., Schleiss, A., y Boillat, J. (2012). Hydraulic design of a-type piano key weirs. *J. Hydraulic Res.* 50 (4), 400–408.
- Lempérière, F., y Ouamane, A. (2003). The piano keys weir: A new cost-effective solution for spillways. *International Journal on Hydropower and Dams* 10(5), 144-149.
- Machiels, O., Piroton, M., Pierre, A., Dewals, B., y Erpicum, S. (2014). Experimental parametric study and design of Piano Key Weirs. *J. Hydraulic Res.* 52 (3), 326–335.
- Moric, P. (1996). Electrowatt Engineering Ltd. *Switzerland Optimizing desanding facilities for hydro Plants Hydropower Dams*, 6, 31 -35.
- Peng, R, Li, B., Wang, Q., y Wu, X. (2002). Experimental research on the weir flow pressing the wall for the rectangle thin-wall weir. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)* 3(2), 197-202.

- Qi, Q., Meng, Q., y Shan, C. (2002). The calculating formula of flow coefficient of WES weir. *Journal of Hebei Engineering and Technical College* 12(4), 8-9.
- Ribeiro, M., Pfister, M., Schleiss, A., y Boillat, J. (2012). Hydraulic design of A-type piano key weirs. *Journal of Hydraulic Research* 50(4), 400-408.
- Rocha, A. (2007). *Hidráulica de tuberías y canales*. Lima, Peru: UNI
- Sandoval, W. (2013). *Principios de la hidráulica 2*. Sangolqui, Ecuador: EDIESPE.
- Shan, C., y Qi, Q. (2008). Calculation and discussion of the discharge coefficient for ridge-free, broad-crest weirs. *Traffic Engineering and Technology for National Defence* 15(5), 31-32.
- Sotelo, G. (1999). *Hidráulica General*. México, D.F.: Editorial Limusa, 1999
- Técnico de Conceso de Recursos Hídricos de Cuenca CNHC, (2018) recuperado de <https://www.ana.gob.pe/consejo-de-cuenca/quilca-chili/portada>
- Te V. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Editorial Mc Graw Hill
- Tong, H., Ai, K., y Ding, X. (2002). Discharge capacity of broken-line practical weir. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute* 19(2), 7-10.
- Tullis, B. (2011). Behavior of submerged ogee crest weir discharge coefficients. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 137(10), 677-681.
- USBR, United States. Bureau of Reclamation, (1987). *Design of Small Dams* Denver, CO.



- Ulloa, O. (1986). *Aliviaderos de abanico*. México
- Vischer, D.; y Rutschmann, P. (1988). *Spillway facilities – Typology and General Safety Questions*. San Francisco EE. UU., ICOLD.
- Wagner, W. (1956). Morning-glory shaft spillway determination of pressure-controlled profiles. *Trans. ASCE*. 1 (56), 121- 345.
- Wang, S., y Shu, Y. (1989). Correction method to hydraulic design for labyrinth weir. *Jiangxi Hydraulic Science and Technology* 5(2), 36-46.
- Wang, Z. (2002). Analysis of scale effect of thin-plate weir in hydraulic model test. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)* 33(4), 499-502.
- Warnock, J. (1939). *Study for the design of crests for overfall dams*. Denver: University of Colorado, Lab Work by USBR.
- Wei, C., y F., DeFazio. (1982). Simulation of Free Jet Trajectories for the Design of Aeration Devices on Hydraulic Structures, *Proceedings of the 4th International Conference on Finite Elements in Water Resources, Hannover, Germany*, June. 23(3), 32-42.
- Yang, L., Liang, Y., Fan, R., y Wu, Q. (2010). The study on orifice outflow with broad-crested, ridged weir. *Yellow River* 32(2), 107-108.
- Yu, H. (1998). Critical submerged method applied to the computation of flow over broad-crested weirs. *Journal of Chongqing Jiaotong Institute* 17(1), 28-30.

Zaji, A., Bonakdari, H., y Karimi, S. (2015). Radial basis neural network and particle swarm optimization-based equations for predicting the discharge capacity of triangular labyrinth weir. *Flow Measurement and Instrumentation* 45, 341-347.

Zhang, J., Zhai, X., Miao, R., y Hou, C. (2010). Experiment on discharge coefficient of broken-line practical weir. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)* 41(3), 469 - 473.