



DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS VARIABLES ASOCIADAS AL CONTROL DE FLUJO EN MODELO FÍSICO PARA LOS CAUDALES DE DISEÑO EN LA ESTRUCTURA DE COMPUERTA DE LA DERIVADORA CAÑAR

RESUMEN

La presente tesis es una investigación experimental de las variables asociadas al control del flujo que descarga a través de una compuerta y su posterior cuenco disipador. Estructuras que son parte de la obra de derivación de caudales en el Río Cañar, Ecuador. El cual es una solución para proteger la cuenca baja del Río Cañar que anualmente es azotada por fenómenos hidrológico-torrenciales y de flujo de gran magnitud en cauces que se traducen en eventos de inundación.

Para la investigación se diseñó y construyó un modelo físico a escala de las estructuras hidráulicas, partiendo de los diseños en prototipo. Los materiales empleados fueron madera y lámina metálica para la compuerta.

La experimentación se realizó en un canal con paredes laterales de vidrio, que permitieron observar los fenómenos hidráulicos. Las variables analizadas fueron abertura de la compuerta, alturas conjugadas, longitud del resalto hidráulico y velocidad al final del cuenco disipador; para tres diferentes tratamientos de caudales de diseño, de posición de la compuerta y de profundización del cuenco disipador; manteniendo siempre una carga constante de agua en la compuerta.

El propósito del modelamiento físico fue, por un lado, determinar las incógnitas que la modelización matemática todavía no las puede resolver; y por otro, verificar el funcionamiento y predecir el comportamiento de las estructuras hidráulicas, para los tratamientos planteados. De ello obtener conclusiones que faciliten la toma de decisiones en el diseño definitivo; es preciso mencionar que fue importante el trabajo conjunto con el equipo de diseño del prototipo.

Palabras Clave: Modelación Física, Compuerta Radial, Análisis Dimensional, Control de Inundaciones, Disipación de Energía, Hidráulica, Río Cañar.

CONTENIDO GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	15
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS	31
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	63
BIBLIOGRAFÍA	65
ANEXOS	67



Universidad de Cuenca



**UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS VARIABLES
ASOCIADAS AL CONTROL DE FLUJO EN MODELO FÍSICO PARA
LOS CAUDALES DE DISEÑO EN LA ESTRUCTURA DE
COMPUERTA DE LA DERIVADORA CAÑAR**

Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniero Civil

Autor: José Vicente Tinoco Ochoa

Director: Ing. Felipe Cisneros E. PhD.

**Tutores: Ing. Esteban Pacheco MSc.
Ing. Christian Coello MSc.
Ing. Verónica Carrillo**

Cuenca – Ecuador

Octubre 2011



DEDICATORIA

A la Voluntad de Dios Padre. Yo puse mi esfuerzo, pero Él trazó el verdadero camino.

A mi papá Braulio Tinoco y a mi mamá María del Carmen Ochoa; ya que han sido la fuerza que muchas veces me ha empujado para dar un paso más, el sabio consejo y, con mucho cariño los auspiciantes de mis estudios.



AGRADECIMIENTOS

A mis compañeras y compañeros Johana Gárate, Katy Solís, Edison Calle y Juan Domínguez, con quienes compartimos las jornadas de trabajo para la elaboración de éste gran proyecto, que abarca nuestras tesis. Por su esfuerzo, perseverancia, valiosas enseñanzas y amistad; gracias a lo cual hemos logrado concluir con nuestro objetivo.

Al Ing. Felipe Cisneros PhD., Director del Programa para el Manejo de Agua y Suelo, PROMAS, por su gestión para proporcionarme el tema de tesis, los espacios y materiales de trabajo. Su motivación para el correcto desarrollo del proyecto; y, sus oportunas correcciones académicas de éste documento final.

Al Ing. Esteban Pacheco MSc., Investigador Principal del PROMAS, por su orientación, docencia y tiempo dedicado durante el desarrollo de la tesis, siendo un ejemplo a seguir en cuanto al trabajo, conocimiento y destreza en las actividades realizadas durante este proyecto.

A la Ing. Verónica Carrillo, Investigadora Asistente del PROMAS, por su favorable disposición ante múltiples consultas, y trabajo conjunto durante la experimentación.

Al Ing. Cristian Coello, Investigador Principal del PROMAS, por su valioso aporte en la parte estadística, y sincera disposición para solventar las inquietudes planteadas.

A todo el personal del PROMAS, que me hicieron sentir parte de su grupo de trabajo mientras utilicé sus instalaciones.

Al Ing. Marcelo Cabrera, Jefe de Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca, por la confianza brindada en cuanto al uso de equipos, materiales y espacio físico del mismo.

Al Sr. Bruno Aguirre, Instrumentista del Laboratorio de Hidráulica, por su buena voluntad y ayuda brindada durante el tiempo de desarrollo de la parte experimental de la tesis.



RESUMEN

La presente tesis es una investigación experimental de las variables asociadas al control del flujo que descarga a través de una compuerta y su posterior cuenco disipador. Estructuras que forman parte de la obra de derivación de caudales en el Río Cañar, Ecuador; que ha sido concebido como una solución para proteger la cuenca baja del Río Cañar que anualmente es azotada por fenómenos hidrológico-torrenciales y de flujo de gran magnitud en cauces que se traducen en eventos de inundación. Éste es un proyecto financiado por la Secretaria Nacional del Agua (SENAGUA) y está siendo ejecutado por la Asociación de Compañías Consultoras, CONSULTORÍA TÉCNICA ACSAM, y cuyo componente, Climatología, Hidrología y Modelos ha sido subcontratado con la Universidad de Cuenca a través del Programa Para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS).

Para la investigación se diseñó y construyó un modelo físico a escala de la compuerta y su posterior cuenco disipador, partiendo de los diseños en prototipo. Los materiales empleados fueron madera y una lámina metálica para la compuerta.

Los ensayos se realizaron en un canal con paredes laterales de vidrio, que permitieron observar los fenómenos hidráulicos durante la experimentación. Las variables analizadas fueron abertura de la compuerta, alturas conjugadas y longitud del resalto hidráulico; y, velocidad al final del cuenco disipador; para tres diferentes tratamientos de caudales de diseño, de posición de la compuerta y de profundización del cuenco disipador; manteniendo siempre una carga constante de agua en la compuerta.

El propósito del modelamiento físico fue, por un lado, determinar las incógnitas que la modelización matemática todavía no las puede de resolver y por otro, verificar el funcionamiento y predecir el comportamiento de las estructuras hidráulicas, para los tratamientos planteados. De ello obtener conclusiones que faciliten la toma de decisiones en el diseño definitivo; es preciso mencionar que fue importante el trabajo conjunto con el equipo de diseño de la Asociación.



ABSTRACT

This thesis is an experimental research of the variables related with flow control through a radial gate and its subsequent still basin. Those structures are part of the river diversion works in the Cañar River, Ecuador. This project aims to protect the lower basin of the Cañar River, which is a productive Ecuadorian area; but unfortunately is annual hitting by torrential hydrological phenomena and large-scale flow that result in flood events. This is a project funded by the National Secretariat for Water (SENAGUA) and is performed by the Association of Consulting Companies, technical consulting ACSAM, whose components: Climatology, Hydrology and models has been subcontracted with the Universidad of Cuenca through the Water and Soil Management Program (PROMAS).

For the research, a physical scale model of the radial gate and the still basin was designed and built, based on the prototype designs. The materials used were wood and a steel plate for the gate.

The tests were performed on a channel with glass sidewalls, which allowed the observation of the hydraulic phenomena during the experimentation. The variables analyzed were: opening of the gate, conjugated depths, hydraulic jump length, and velocity at the end of the still basin. Those variables were depended for three different treatments such as: design flow, gate position and still basin depth. The radial gate head was equal for all tests.

The objective of the physical model was, on one hand, to find out the unknown value of the variables that mathematical modeling is not yet able to solve. And on the other hand, to verify the performance and predict the behavior of hydraulic structures for the treatment performed. Therefore draw conclusions to optimize the hydraulic structures and to help the decision-making process for final design. Thus, it was important to work together with the engineers design team.



CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN 13

1.1 Antecedentes y justificación 13

1.2 Objetivos 14

1.2.1 Objetivo General..... 14

1.2.2 Objetivos específicos..... 14

1.3 Alcance 14

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO 15

2.1 Modelación física en la hidráulica 15

2.1.1 Principios básicos de la modelación 15

2.1.1.1 Relaciones de escalas subsecuentes..... 16

2.1.2 Análisis dimensional y similitud dinámica 16

2.1.2.1 Parámetros básicos..... 17

2.1.2.2 Análisis dimensional 17

2.1.2.3 Similitud dinámica 19

2.1.2.4 Efectos de escala 21

2.2 Aspectos hidráulicos relacionados al diseño de cuencos disipadores de energía..... 22

2.2.1 Resalto hidráulico en canales horizontales rectangulares 23

2.2.2 Tipos de resalto hidráulico 24

2.2.3 Características básicas del resalto. 25

2.2.3.1 Altura del resalto 25

2.2.3.2 Pérdida de energía..... 25

2.2.3.3 Eficiencia 25

2.2.3.4 Longitud del resalto hidráulico 26

2.2.4 Cuencos disipadores de energía 27

2.3 Compuertas Radiales (Tainter) 28

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS 31

3.1 Materiales..... 31

3.1.1 Descripción del Proyecto 31

3.1.1.1 Descripción del sistema hidráulico 31



3.1.1.2 Sistema Cañar.....	32
3.2 Métodos	35
3.2.1 Diseño y construcción del modelo físico.....	35
3.2.2 Descripción de variables de estudio y diseño de la experimentación	38
3.2.3 Instalación, calibración y verificación del modelo físico	40
<i>Construcción de la curva de descarga del canal</i>	41
<i>Validación de la curva de descarga</i>	43
<i>Construcción de la curva de calibración de la compuerta</i>	44
3.3 Medición de variables y toma de datos	48
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
4.1 Procesamiento de los datos obtenidos en la experimentación.....	49
4.2 Análisis de resultados	51
4.2.1 Comportamiento teórico de las variables.....	51
4.2.1.1 Análisis de la normalidad de la muestra	53
4.2.1.2 Análisis de variables dependientes	54
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	63
BIBLIOGRAFÍA	65
ANEXOS	67
ANEXO 1	67
EQUIPOS Y LABORATORIO	67
EQUIPOS Y LABORATORIO	68
ANEXO 2	76
CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA.....	76
ANEXO 3	89
ANOVA Y PRUEBAS POST HOC DE VARIABLES INDEPENDIENTES	89
ANEXO 4	95
FORMATO PARA TOMA DE DATOS.....	95
ANEXO 5	96
ANEXO FOTOGRÁFICO	96
ANEXO 6	102
ILUSTRACIONES DEL SISTEMA HIDRÁULICO DEL PROYECTO PARA EL	



CONTROL DE INUNDACIONES DE LOS RÍOS BULUBULU – CAÑAR -
NARANJAL 102

Índice de Figuras

Figura 2.1 Parámetros básicos del flujo bajo una compuerta radial 17
Figura 2.2 Tipos de resalto hidráulico 24
Figura 2.3 Esquema longitud de resalto y longitud de remolino 26
Figura 2.4 Longitud del resalto para canal horizontal. USBR..... 27
Figura 2.5 Compuerta Radial 28
Figura 2.7 Coeficiente de descarga para compuerta radial (Chow, 1982) 30
Figura 3.1 Ubicación de la Derivadora Cañar..... 33
Figura 3.2 Perfil transversal de la Estructura de Compuerta de la Derivadora Cañar, prototipo (PROMAS, 2011)..... 35
Figura 3.3 Estructura a escala de la compuerta y cuenco disipador de energía. Modelo físico (Equipo Consultor, 2011) 37
Figura 3.4 Modelo físico de Compuerta y Cuenco disipador de energía 38
Figura 3.5 Variables de posición de compuerta y profundización de cuenco disipador. Dimensiones en modelo. 39
Figura 3.6 Curva de descarga aguas arriba del azud..... 42
Figura 3.7 Curva altura – velocidad aguas arriba del azud 43
Figura 3.8 Curva de descarga validada..... 44
Figura 3.8 Ajuste coeficiente de descarga 45
Figura 3.9 Curva de calibración del modelo de compuerta 47
Figura 4.1 Formación de hoyas..... 51
Figura 4.1 Histogramas de variables dependientes con curva normal..... 53
Figura 4.3 Diagramas de caja de V. Dependientes en función de Q..... 55
Figura 4.7 Diagramas de caja de V. Dependientes en función de P 58
Figura 4.8 Diagramas de caja de V. Dependientes en función de z..... 60
Figura A.1.1 Canal Armfield Tilting Flume S6. Laboratorio de Hidráulica. Universidad de Cuenca. Facultad de Ingeniería..... 70
Figura A.1.2 Limnímetro y carro base 71
Figura A.1.3 Flow Traker 72
Figura A.1.4 Vista Lateral de la Sensor y Volumen de Muestreo del Flow Tracker73
Figura A.1.5 Tubos piezométricos estáticos..... 75
Figura A.2.1 Distribuciones normales con diferentes medias y desviaciones típicas



..... 78

Figura A.2.2 Distribución F..... 80

Figura A.2.4 Detalles de un Diagrama de Caja 87

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Parámetros adimensionales del teorema de Buckingham Π 20

Tabla 3.1 Valores de coeficiente de descarga C. (Schröder & Press, 1966)..... 45

Tabla 3.2 Datos para la curva de calibración de compuerta para $Q = 13.42 \text{ L/s}$... 45

Tabla 3.3 Ajuste de compuertas para ensayos 47

Tabla 4.1 Resultados de la Experimentación 49

Tabla 4.2 Cálculos teóricos de variables dependientes 52

Tabla 4.3 Variables en las que se forman hoyas..... 62

Tabla A.2.1 Análisis de Varianza..... 85

Tabla A.3.1 Análisis ANOVA para las variables en función de Q..... 90

Tabla A.3.2 Prueba Tukey, Post Hoc, Comparaciones Múltiples $f(Q)$ 90

Tabla A.3.3 Análisis ANOVA para las variables en función de P 91

Tabla A.3.4 Prueba Tukey, Post Hoc, Comparaciones Múltiples $f(P)$ 92

Tabla A.3.5 Análisis ANOVA para las variables en función de z..... 93

Tabla A.3.6 Prueba Tukey, Post Hoc, Comparaciones Múltiples $f(z)$ 93



Listado de Símbolos:

- a: Abertura de la compuerta
- A: Área de la sección transversal; cantidades del teorema de Π Buckingham
- β : Ángulo de descarga del flujo a través de la compuerta
- B: Longitud de la compuerta
- C: Coeficiente de descarga del flujo a través de una compuerta
- d: Parámetro de diámetro
- E: Energía específica
- E_b : Módulo de elasticidad del cuerpo del agua
- Eu: Número de Euler
- F: Fuerza, estadístico F .
- Fr: Número de Froude
- g: Aceleración de la gravedad
- H: Altura o calado del agua, aguas arriba de la compuerta
- L: dimensión de longitud en teorema de Π Buckingham
- l: Parámetro de longitud
- Lr: Longitud del resalto hidráulico, Relación entre los parámetros longitud características entre el modelo y el prototipo.
- L_t : Longitud del remolino turbulento
- M: masa
- m: Subíndice empleado cuando se hace referencia al modelo
- Ma: Número de Sarrau-Mach
- P: Posición de la compuerta
- P: presión
- p: Subíndice empleado cuando se hace referencia al prototipo
- Q: caudal
- r: Radio de la compuerta
- r: subíndice r, indica la relación entre el modelo y el prototipo de un parámetro
- Re: Número de Reynolds
- t: tiempo
- T: dimensión de tiempo en teorema de Π Buckingham
- u: viscosidad dinámica del agua
- V: Velocidad del fluido
- V_m : Velocidad media
- We: Número de Weber
- y1: Calado de agua, en régimen supercrítico
- y2: Calado de agua, en régimen subcrítico
- z: Profundización del cuenco disipador
- α : Coeficiente de Coriolis
- ΔP : Diferencias de presión



Universidad de Cuenca

μ : media

η : Eficiencia del resalto hidráulico

Π : parámetros adimensionales de las cantidades A , según teorema de Buckingham

ρ : densidad

σ : Tensión superficial de aire y agua. Desviación típica



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes y justificación

Las cuencas bajas de los ríos Bulubulu, Cañar y Naranjal dan origen a una de las regiones hidro-económicas y ambientales con mayor potencial para el desarrollo del país; pero al ser una zona de planicie costera, está expuesta a graves problemas relacionados a los fenómenos hidrológico-torrenciales y de avenidas, que desbordan los cauces y que se traducen en eventos de inundación. En este sentido la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA), a través de la Subsecretaría de la Demarcación Hidrográfica del Guayas (ex CEDEGE) ha financiado un estudio para control de inundaciones que contribuya en la resolución de estos problemas, dicho estudio se ha ejecutado a través de la Asociación de Compañías Consultoras, CONSULTORÍA TÉCNICA ACSAM. Para el desarrollo de los estudios climáticos, hidrológicos y la modelización matemática y física, la Asociación ha subcontratado a La Universidad de Cuenca, a través del Programa para el Manejo del Agua y del Suelo PROMAS.

El empleo de modelos físicos como una etapa de estudio dentro del proyecto, es una herramienta que permitirá a los ingenieros comprobar sus opciones de diseño y además determinar cuantitativa y cualitativamente las variables asociadas al control del flujo a través de la estructura hidráulica, que en muchos casos no es posible determinar por técnicas analíticas. Es por ello que el modelo físico aportará datos importantes acerca del comportamiento de la estructura hidráulica para los caudales de diseño; siempre y cuando se cumpla la condición de similitud entre el modelo y el prototipo, esta simulación debe ser definida en función del tipo de modelo a construir. En el presente caso, se ha considerado para la modelación hidráulica, la similitud en la geometría de la estructura, en el movimiento del flujo y en las fuerzas predominantes entre la estructura y el flujo.

Es preciso mencionar que para el empleo de un modelo físico y para que la experimentación en él mismo, sea adecuada, se requiere de un entendimiento claro de los principios básicos de los procesos hidráulicos del flujo en canales abiertos y de la teoría de similitud; de un buen criterio para escalar el modelo, así como para observar y recopilar los datos de los fenómenos que ocurren durante la experimentación; de conocimientos estadísticos para poder procesar y validar los resultados; todo esto con la finalidad de garantizar que la experimentación realizada en el modelo prediga en forma adecuada el comportamiento de la estructura hidráulica, y así facilitar la toma de decisiones para el diseño definitivo.

En el marco del Proyecto para el Control de Inundaciones de los Ríos Bulubulu, Cañar y Naranjal se llevó a cabo la modelización hidráulica en modelo físico a escala reducida para la compuerta radial y su posterior cuenco dissipador convencional en el canal de pendiente variable S6, $L = 12,00\text{m}$ $b = 0,30\text{ m}$, del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca; para el efecto se construyeron sendos modelos a escala no distorsionada



de las estructuras que forman parte de la obra de derivación de caudales en el Río Cañar, en el sector de la junta con el estero de Pancho Negro.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Estudiar el comportamiento hidráulico tridimensional del flujo a través de la compuerta radial y del cuenco disipador de energía asociado a la misma; mediante el empleo de un modelo físico a escala reducida.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinación experimental de las variables asociadas a los fenómenos de flujo en la estructura de compuerta y en el cuenco de disipación de energía.
- Conocer y verificar el comportamiento del flujo en las estructuras de estudio y que conforman el diseño para el proyecto de control de inundaciones.
- Verificar las características de funcionamiento hidráulico del cuenco disipador de energía asociado a la operación planeada para la estructura de compuerta.

1.3 Alcance

Se ha determinado mediante experimentación en el canal de pendiente variable S6, $L= 12,00m$ $b= 0,30 m$, del laboratorio de hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca; las variables asociadas al control del flujo a través de un modelo físico construido a escala, que consta de una compuerta radial y un cuenco disipador convencional; obra que constituye parte de la derivadora proyectada para el control de inundaciones del Río Cañar, a ser emplazadas en Pancho Negro, sector Puerto Inca.

Se ha realizado la determinación cuantitativa de las variables estudiadas en los ensayos realizados; resultados que permitirán visualizar con mayor precisión, el comportamiento de la estructura en tres dimensiones, lo cual no es posible lograrlo con la modelización matemática. El correcto entendimiento del comportamiento hidráulico de las variables determinadas significará un aporte tanto para el conocimiento científico como para el diseño de esta importante obra para el país. El presente modelo físico brindará importantes conclusiones acerca de la teoría de las compuertas, ajustándola en una primera aproximación a las condiciones de nuestro medio (flujo torrencial presente en ríos de montaña). Por lo que se espera se convierta en un aporte a posteriores estudios para el desarrollo de una publicación científica dentro del programa de fortalecimiento del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca, así como a la investigación científica en la Facultad de Ingeniería y en el PROMAS de la Universidad de Cuenca.



CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Modelación física en la hidráulica

Un modelo físico es una reproducción a escala de una configuración hidráulica de flujo, técnica, utilizada por los investigadores para observar de una manera concreta el comportamiento en tres dimensiones del problema y con esta información a priori, corregir y definir la configuración que pueda optimizar el diseño de estructuras, asegurar una buena operación de la estructura y/o facilitar la toma de decisiones. En este contexto y dado la trascendencia de los elementos que están en juego, es necesario que tanto las condiciones de frontera (paredes laterales, lecho de canal), como las condiciones de flujo aguas arriba y el campo de flujo sean correctamente llevadas a escala.

El empleo modelos físicos requiere un entendimiento profundo de los principios básicos de la mecánica de fluidos y de la teoría de similitud, estos temas de trascendencia fundamental han sido revisados y estarán en la base de las formulaciones del presente trabajo, sin embargo, al no ser el tema central de la tesis, en el presente documento únicamente se los referenciará con la bibliografía correspondiente, estos se refieren a los principios básicos de la hidráulica (Conservación de la energía, momentum y masa). En consecuencia y con el propósito de desarrollar adecuadamente el tema motivo de la presente tesis, en éste trabajo será abordado en forma detallada lo referente a la modelación hidráulica.

2.1.1 Principios básicos de la modelación

Las investigaciones experimentales requieren estar basadas en sólidas bases teóricas que se deducen en su mayor parte de los principios básicos y de la teoría de la similitud. En este contexto, se establece como premisa que las condiciones de flujo de un modelo físico deben ser similares a la del prototipo, esto es posible si y solo si el modelo. (Chanson, 2002)

1. *Similitud geométrica* o similitud de forma, está relacionada con los parámetros de longitud, área y volumen, establece que la relación de las longitudes características del modelo con respecto a las longitudes características del prototipo son iguales:

$$L_r = \frac{l_m}{l_p} = \frac{d_m}{d_p} = \frac{H_m}{H_p} \quad (2.1)$$

Donde los subíndices m y p se refieren a los parámetros del modelo y del prototipo (escala total) respectivamente, y el subíndice r indica la relación de cantidades de prototipo a modelo.

2. *Similitud cinemática* o similitud de movimiento, pone como condición que la



relación de las velocidades características del modelo con respecto a las velocidades características del prototipo es la misma:

$$V_r = \frac{V_m}{V_p} = \frac{(V_1)_m}{(V_1)_p} = \frac{(V_2)_m}{(V_2)_p} \quad (2.2)$$

3. *Similitud dinámica* o similitud de fuerzas establece como condición que la relación de fuerzas del modelo con respecto a la relación de fuerzas del prototipo son iguales:

$$F_r = \frac{F_{1m}}{F_{1p}} = \frac{F_{2m}}{F_{2p}} \quad (2.3)$$

Adicionalmente, es preciso mencionar que, otros parámetros involucrados en la similitud dinámica, constituyen el trabajo y la potencia con similar tratamiento.

2.1.1.1 Relaciones de escalas subsecuentes

De las relaciones básicas de escala, definidas en las ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.3); se puede obtener las siguientes relaciones: (Chanson, 2002)

$$\text{Masa: } M_r = \rho_r L_r^3 \quad (2.4)$$

$$\text{Tiempo: } t_r = \frac{L_r}{V_r} \quad (2.5)$$

$$\text{Caudal: } Q_r = V_r L_r^2 \quad (2.6)$$

$$\text{Presión: } P_r = \frac{F_r}{L_r^2} \quad (2.7)$$

Donde ρ es la densidad del fluido.

2.1.2 Análisis dimensional y similitud dinámica

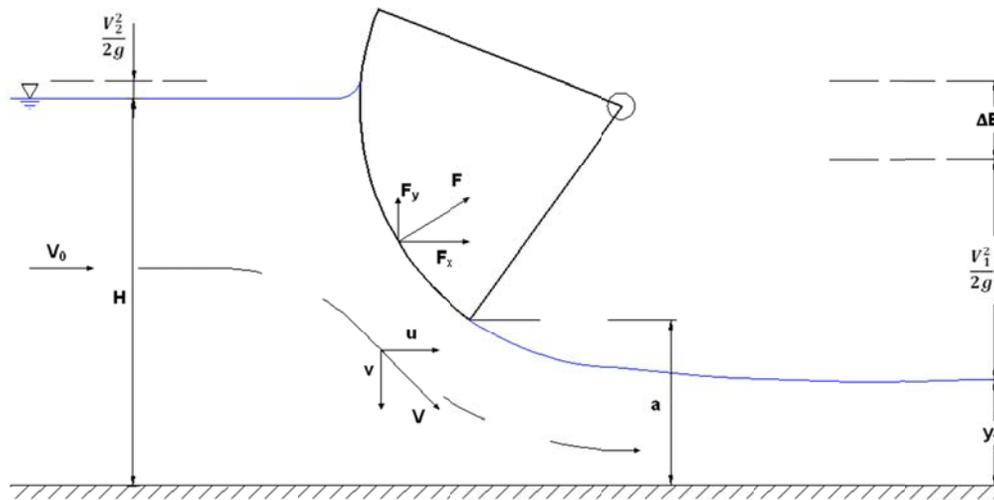
Los parámetros adimensionales permiten que limitados resultados experimentales sean aplicados a situaciones que presentan dimensiones físicas diferentes, es decir hacen posible generalizar la información experimental. Esto permite llevar a cabo menos, aunque altamente selectivos, experimentos con el fin de descubrir las variables escondidas de un problema y por lo tanto lograr importantes ahorros de tiempo y dinero. (Streeter, Wylie, & Bedford, 2000).

2.1.2.1 Parámetros básicos

Los parámetros básicos necesarios para el análisis dimensional, en el presente caso, como se muestra en la figura 2.1, pueden clasificarse en los siguientes:

- 1) Propiedades del fluido y constantes físicas compuestos por:
 - densidad del agua ρ (kg/m^3),
 - viscosidad dinámica del agua μ (Ns/m^2),
 - tensión superficial de aire y agua σ (N/m),
 - módulo de elasticidad de cuerpo del agua E_b (Pa), y,
 - aceleración de la gravedad g (m/s^2).
- 2) Geometría del canal (o del flujo):
 - Longitudes características L (m).
- 3) Propiedades del flujo:
 - Régimen hidráulico
 - Velocidades V (m/s).
 - Diferencias de presión ΔP (Pa).

Figura 2.1 Parámetros básicos del flujo bajo una compuerta radial



Adaptado de Chanson, 2002.

2.1.2.2 Análisis dimensional

Cuando se está analizando una situación compleja, en muchas de las ocasiones no es posible escribir por ejemplo la ecuación de la fuerza. Sin embargo existe un procedimiento que permite reducir el número de variables de tal situación compleja y obtener un resultado compacto representado en ecuaciones o gráficas de datos;



de tal forma que sea aplicable a otras situaciones similares. Este proceso se conoce como análisis dimensional; que para poder aplicarse pide como condición se conozcan las cantidades pertinentes que entran en un problema. El análisis dimensional se basa en agrupar las cantidades importantes, y llevar a cabo relaciones entre ellas, obteniendo parámetros adimensionales.

Para agrupar las cantidades se emplea el teorema de Π Buckingham. Este teorema prueba que en un problema físico que incluye n cantidades en las cuales hay m dimensiones, las cantidades pueden reordenarse en $n - m$ parámetros adimensionales independientes. Sean $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ las cantidades involucradas, tales como la densidad, viscosidad, velocidad, etc. Se sabe que todas las cantidades son esenciales para la solución y por consiguiente debe existir alguna relación funcional. (Streeter, Wylie, & Bedford, 2000)

$$F(A_1, A_2, A_3, \dots, A_n) = 0 \tag{2.8}$$

Si Π_1, Π_2, \dots , representan agrupaciones adimensionales de las cantidades A_1, A_2, A_3, \dots , entonces con las m dimensiones involucradas, existe una ecuación de la forma: (Streeter, Wylie, & Bedford, 2000)

$$F(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-m}) = 0 \tag{2.9}$$

El método para determinar los parámetros Π consiste en seleccionar m de las A cantidades, con diferentes dimensiones, que contengan entre ellas las m dimensiones, y utilizarlas como variables repetitivas junto con una de las otras cantidades A para cada Π . Donde además, es esencial que ninguna de las m cantidades seleccionadas para utilizarlas como variables repetitivas se puedan deducir de otras variables repetitivas.

Por ejemplo, sean las cantidades A_1, A_2, A_3 , que contienen las dimensiones de M, L y T ($M =$ masa, $L =$ longitud y $T =$ tiempo), no necesariamente cada una de ellas sino en forma colectiva. Entonces el primer parámetro Π se define como:

$$\Pi_1 = A_1^{x_1} A_2^{y_1} A_3^{z_1} A_4 \tag{2.10}$$

El segundo como:

$$\Pi_2 = A_1^{x_2} A_2^{y_2} A_3^{z_2} A_5$$

Y así sucesivamente, hasta que:

$$\Pi_{n-m} = A_1^{x_{n-m}} A_2^{y_{n-m}} A_3^{z_{n-m}} A_n$$

En estas ecuaciones se deben determinar los exponentes de tal manera que cada Π sea adimensional. Las dimensiones de las cantidades A se sustituyen y los exponentes de M, L y T se igualan a 0 respectivamente. Esto produce tres ecuaciones con tres incógnitas para cada parámetro Π , de tal manera, de tal manera que se pueden determinar los exponentes x, y, z y por consiguiente el



parámetro Π . (Streeter, Wylie, & Bedford, 2000)

Si se tienen en cuenta los parámetros básicos o cantidades que fueron mencionados en 2.1.2.1, el análisis dimensional arroja: (Chanson, 2002)

$$F(\rho, \mu, \sigma, E_b, g, L, V, \Delta P) = 0 \tag{2.11}$$

Las dimensiones de estas ocho cantidades son M, L y T ; por lo que según el teorema de Buckingham Π , las cantidades pueden agruparse en cinco ($5 = 8 - 3$) parámetros adimensionales independientes Π . (Chanson, 2002).

Seleccionando como cantidades repetitivas (A_1, A_2, A_3) las cantidades V, ρ, L ; se plantea las ecuaciones para los cinco parámetros Π , en función de los exponentes desconocidos de las tres cantidades repetitivas y de cada una de las cinco cantidades dependientes restantes. Así sustituyendo las dimensiones de las cantidades, tenemos un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas, para cada uno de los cinco parámetros adimensionales independientes, que al resolverlos obtenemos:

$$\mathcal{F}_2 \left(\frac{V}{\sqrt{gL}}; \frac{\rho V^2}{\Delta P}; \frac{\rho VL}{\mu}; \frac{V}{\sqrt{\frac{\sigma}{\rho L}}}; \frac{V}{\sqrt{\frac{E_b}{\rho}}} \right) \tag{2.12}$$
$$\mathcal{F}_2(Fr; Eu; Re; We; Ma)$$

Dónde:

Fr: número de Froude, relación de las fuerzas inerciales con respecto a las gravitacionales.

Eu: número de Euler, relación entre las fuerzas inerciales y las de presión.

Re: número de Reynolds, relación de las fuerzas inerciales con respecto a las fuerzas viscosas.

We: número de Weber, relación de las fuerzas inerciales con respecto a las de capilaridad, es decir, tensión superficial.

Ma: número de Sarrau-Mach, relación de las fuerzas inerciales con respecto a las elásticas.

2.1.2.3 Similitud dinámica

Los estudios en modelos físicos se ejecutan como una ayuda de diseño; ya que éstos permiten una observación visual del flujo y hacen posible obtener cierta información numérica, por ejemplo, calibraciones de vertederos y compuertas, profundidades de flujo, distribuciones de velocidad, fuerzas sobre las compuertas.

Para obtener información cuantitativa acertada de un estudio en modelo físico, debe existir similitud dinámica entre el modelo y el prototipo. Esta similitud



requiere cumplir con las similitudes ya mencionadas en 2.1.1, de ésta manera:

1. Similitud geométrica exacta, que se extiende hasta la similitud de la rugosidad superficial del modelo y el prototipo; por ejemplo, si $L_r = 1/16$ en cualquier dimensión lineal, la altura de las proyecciones de rugosidad deben tener ésta misma relación.
2. Similitud cinemática, es decir que las líneas de corriente deben ser geoméricamente similares.
3. Similitud dinámica, presiones dinámicas en puntos correspondientes sea una constante. Esto implicaría que cada parámetro adimensional de la ec. 2.12 (términos Π), como son los números de Froude, Euler, Reynolds, Weber y Sarrau-Mach, deberían tener el mismo valor en el modelo y en el prototipo.

En la práctica, cumplir estrictamente con éstos requerimientos, es algo imposible de alcanzar, salvo que la relación de escala sea 1:1. Por fortuna, en la mayoría de situaciones solamente dos o tres de las fuerzas tienen el mismo orden de magnitud; con dos fuerzas del mismo orden de magnitud se pueden obtener uno de los cinco parámetros adimensionales del teorema de Buckingham Π , de la ec. 2.12 (términos Π). Como se lo puede observar en el apartado 2.1.1 una de las fuerzas que siempre deberá mantener su similitud entre el modelo y el prototipo es la de inercia, la otra fuerza es el parámetro predominante de la situación en estudio. De la relación de estas fuerzas inerciales para el parámetro predominante, resultan los parámetros adimensionales independientes de la ecuación 2.12 y que se resumen a continuación:

Tabla 1.1 Parámetros adimensionales del teorema de Buckingham Π

Parámetro predominante	Parámetro adimensional independiente
Fuerzas Gravitacionales	Numero de Froude
Fuerzas de Presión	Numero de Euler
Fuerzas Viscosas	Numero de Reynolds
Fuerzas Capilares	Numero de Weber
Fuerzas Elásticas	Numero de Sarrau-Mach

Aunque se pueda pensar que tan solo con el cumpliendo con uno de éstos parámetros adimensionales la similitud entre el modelo y el prototipo no sea la adecuada; sin embargo, con ello es suficiente para describir el fenómeno en el detalle deseado. (Streeter, Wylie, & Bedford, 2000)

La mayoría de modelos hidráulicos resuelven problemas relacionados con predominancia del flujo gravitacional (Froude) y de flujo viscoso (Reynolds); y en consecuencia escalados con dichas similitudes, donde los números



adimensionales son los mismos tanto en el modelo como en el prototipo.

El número de Reynolds Re , se utiliza para escalar *flujos completamente cerrados*, como por ejemplo tuberías, donde Re es igual en prototipo como en el modelo, ya que las pérdidas de carga se encuentran básicamente relaciones con Re .

El número de Froude Fr , se utiliza en flujos con superficie libre, como son canales abiertos, ríos, estructuras hidráulicas; donde los efectos gravitacionales son importantes. Así mismo Fr es igual tanto en el modelo como en el prototipo. Partiendo de la similitud de Froude, y suponiendo que la aceleración de la gravedad es la misma en el modelo y en el prototipo, se pueden deducir algunas relaciones secundarias de escala, como son (Chanson, 2002):

$$\text{Velocidad: } V_r = \sqrt{L_r} \quad (2.13)$$

$$\text{Caudal: } Q_r = V_r L_r^2 = L_r^{5/2} \quad (2.14)$$

$$\text{Fuerza: } F_r = \frac{M_r L_r}{t_r^2} = \rho_r L_r^3 \quad (2.15)$$

$$\text{Presión: } P_r = \frac{F_r}{L_r^2} = \rho_r L_r \quad (2.16)$$

2.1.2.4 Efectos de escala

Cuando uno o más términos Π (ec. 2.12) tengan diferentes valores entre el modelo y el prototipo, se denomina efecto de escala. Esto se refiere a las distorsiones introducidas por efectos (como son la viscosidad, tensión superficial) diferentes del que predomina (por ejemplo, la gravedad).

La disponibilidad de medios para realizar la experimentación a menudo conduce al uso de modelos geoméricamente distorsionados; sin embargo en la práctica, aunque se emplee un modelo a escala de forma geométrica similar al prototipo, es inevitable que exista algún grado de distorsión del flujo y algunos efectos de escala; por ejemplo en flujos de superficie libre, el efecto dominante es la gravedad; si se está utilizando el mismo fluido tanto en el modelo como en el prototipo (por ejemplo, agua) es imposible mantener al mismo tiempo los números de Froude y de Reynolds en el modelo y en el prototipo. Esto se demuestra a continuación:

La relación entre los números de Froude del modelo y prototipo, ec. 2.12 es:

$$F_r = \frac{V_r}{\sqrt{g_r L_r}} \quad (2.17)$$



De las ecuaciones (2.1), (2.5) y (2.13); tenemos que la gravedad es igual a:

$$g_r = \frac{L_r}{t_r} = \frac{L_r}{V_r^2} = 1 \tag{2.18}$$

Por lo que la ecuación 2.17; quedaría:

$$F_r = \frac{V_r}{\sqrt{g_r L_r}} = \frac{V_r}{\sqrt{1 \times L_r}} = 1 \tag{2.19}$$

La relación entre los números de Reynolds, ec. 2.12 es:

$$Re_r = \frac{V_r L_r}{\nu_r} \tag{2.20}$$

Dado que se utiliza, mismo fluido agua en el modelo y prototipo; la relación entre las viscosidades cinemáticas es 1:

$$\nu_r = \frac{\nu_m}{\nu_p} = 1 \tag{2.21}$$

Por lo que, en base a la ec. 2.13, la relación de los números de Reynolds la ec. 2.20 sería:

$$Re_r = V_r L_r = L_r^{3/2} \tag{2.22}$$

Lo cual demuestra que no es posible mantener al mismo tiempo los números de Froude y de Reynolds en el modelo y en el prototipo, para un flujo de superficie libre.

Para evitar efectos viscosos, en flujos en canales abiertos, el número de Reynolds en el modelo debe ser mayor al valor obtenido en la ec.2.23:

$$Re_m = \frac{126R}{n\lambda^{1/2}} \tag{2.23}$$

Donde:

R = Radio hidráulico

n = rugosidad absoluta

λ = factor de fricción, $\lambda = \frac{h_f 8gR}{LV^2}$

Otra forma efectiva de comprobar que no existan efectos viscosos y de tensión superficial en la modelación de obras de captación o bocatomas, es que el número de Reynolds (Re_m) (ec 2.12) sea mayor a 30000. (Novak, Moffat, & Nalluri, 2001).

2.2 Aspectos hidráulicos relacionados al diseño de cuencos disipadores de energía

En la hidráulica es común aprovechar de las características especiales que tiene



del resalto hidráulico para disipar la energía; éste marca el cambio de un flujo supercrítico a uno subcrítico, frecuentemente originado por una barrera en un flujo que fue uniforme, en donde ocurre una considerable disipación de energía que tiene directa influencia en la pérdida de carga, aspecto de gran utilidad en general cuando se trata de resolver problemas comunes.

Entre las aplicaciones del resalto hidráulico se pueden citar las siguientes (French, 1988) (Sotelo, 2002) (Novak, Moffat, & Nalluri, 2001):

- Disipación de energía del agua que fluye sobre presas, diques y otras estructuras hidráulicas; y de esta manera prevenir la socavación aguas abajo de las estructuras.
- Incrementar la descarga por una compuerta, al rechazar el regreso del agua contra la compuerta; esto aumenta la carga efectiva y con ello la descarga.
- Recuperar la carga aguas abajo de un aforador y mantener el nivel de agua alto en canales para irrigación u otros propósitos de distribución de agua.
- Reducción de la elevada subpresión en las estructuras mediante el aumento del tirante de agua, y por lo tanto del peso, sobre el cuenco disipador.
- Identificar condiciones especiales del flujo, tales como la presencia del flujo supercrítico o la existencia de una sección de control para un aforo económico del caudal.
- Para mezclas químicas usadas para purificación del agua o el tratamiento del agua.
- Aerificación de flujos y desclorinado en el tratamiento de agua.
- Remoción de burbujas de aire atrapado en canales abiertos circulares y así prevenir bloqueos de aire.

2.2.1 Resalto hidráulico en canales horizontales rectangulares

Para un flujo supercrítico en un canal horizontal rectangular, la energía del flujo se disipa a través de la resistencia por fricción (rugosidad) a lo largo del canal, resultando una disminución en la velocidad y un aumento en la profundidad en la dirección del flujo. (Chow, 1982).

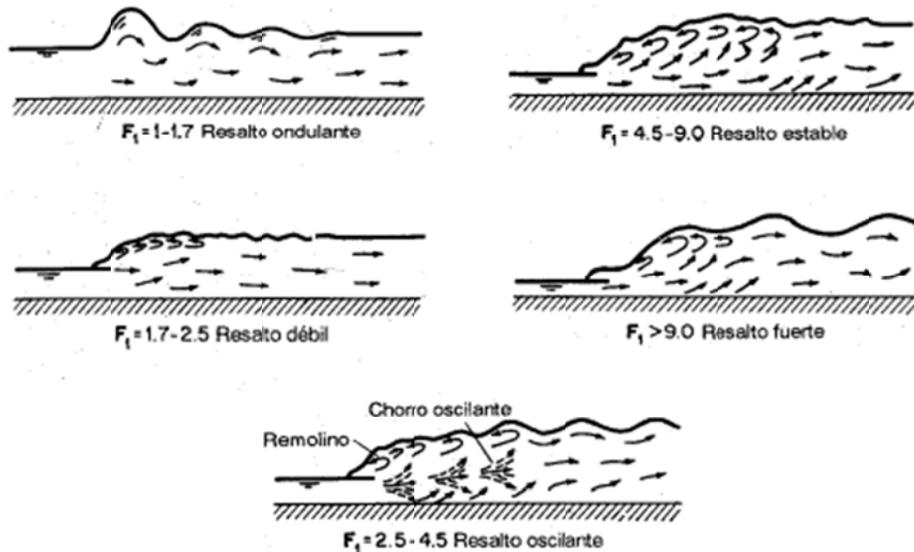
El resalto hidráulico se formará en el canal cuando se den las condiciones de cambio de régimen de flujo; es decir, si el número de Froude F_1 del flujo, la profundidad y_1 y la profundidad del flujo aguas abajo y_2 satisfacen la ecuación:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) \quad (2.24)$$

2.2.2 Tipos de resalto hidráulico

Según el número de Froude del flujo de aproximación al resalto, la U.S. Bureau Reclamation ha realizado una clasificación de los resaltos hidráulicos, que se presenta a continuación, y que se los puede observar en la figura 2.2 (Chow, 1982):

Figura 2.2 Tipos de resalto hidráulico



Adaptado de (Chow, 1982)

1. *Flujo crítico.*- $F_1 = 1$; no se forma ningún resalto.
2. *Resalto ondular.*- $F_1 = 1$ a $1,7$; la superficie libre aguas abajo del resalto presenta ondulaciones sobre distancias considerables. Pérdida de energía es mínima.
3. *Resalto débil.*- $F_1 = 1,7$ a $2,5$; se forman pequeñas protuberancias sobre la superficie del resalto, pero la superficie del agua aguas abajo permanece lisa. La velocidad a lo largo del resalto es ligeramente uniforme y la pérdida de energía es baja.
4. *Resalto oscilante.*- $F_1 = 2,5$ a $4,5$; presenta un chorro oscilante entrando al resalto del fondo a la superficie y atrás otra vez sin periodicidad. Cada oscilación produce una gran onda de período irregular la cual comúnmente en canales, puede viajar por kilómetros dañando y erosionando las orillas.
5. *Resalto estable.*- $F_1 = 4,5$ a 9 ; la disipación de energía varía desde 45 a 70% . La acción y posición de este resalto son menos sensibles a la



variación en la profundidad aguas abajo. El resalto está bien balanceado y el rendimiento es el mejor. Su diseño es más económico.

6. *Resalto fuerte.*- $F_1 \geq 9$; el chorro de alta velocidad agarra golpes intermitentes de agua rodando hacia debajo de la cara del frente del resalto, generando ondas aguas abajo, y puede prevalecer una superficie áspera. La acción del salto es áspera pero efectiva ya que la disipación de energía puede alcanzar un 85%. Los riesgos que se corren es que se puede erosionar el lecho del canal.

En la práctica se recomienda diseñar los disipadores de energía con el resalto de tipo estable.

2.2.3 Características básicas del resalto.

2.2.3.1 Altura del resalto

Es igual a la diferencia entre las alturas después y antes del resalto. $h_j = y_2 - y_1$ (Chow, 1982)

La profundidad aguas abajo (y_2), se puede calcular mediante la ecuación 2.24, que está basado en el principio del momentum como una función del número de Froude y de la profundidad aguas arriba (y_1).

2.2.3.2 Pérdida de energía.

Basándose en la ecuación de la energía, la pérdida de energía en el resalto hidráulico es igual a la diferencia de energías específicas antes y después del resalto, así: (Cadavid, 2006)

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 y_2} \quad (2.25)$$

La relación $\Delta E/E_1$ se conoce como pérdida relativa.

Así mismo, basándose en el principio de momentum y en la ecuación 2.24, la pérdida de la energía se puede expresar como función del número de Froude y de la profundidad aguas arriba (y_1). (Chanson, 2002)

$$\frac{\Delta E}{y_1} = \frac{\left(\sqrt{1+8F_1^2}-3\right)^3}{16\left(\sqrt{1+8F_1^2}-1\right)} \quad (2.26)$$

2.2.3.3 Eficiencia

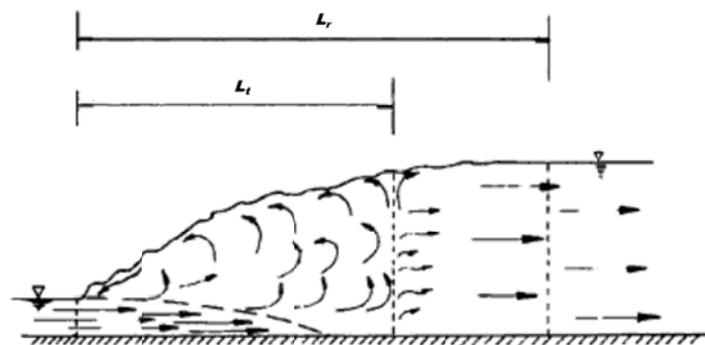
Es la relación entre la energía después del resalto y la energía antes del resalto, así: (Cadavid, 2006) (Chow, 1982)

$$\eta = 1 - \frac{E_2}{E_1} = 1 - \frac{(8F_1^2 + 1)^{3/2} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad (2.27)$$

2.2.3.4 Longitud del resalto hidráulico

Se van a definir dos longitudes que son parte del fenómeno, la longitud del remolino turbulento (L_t) y la longitud del resalto hidráulico (L_r). La longitud del remolino turbulento (L_t), es la distancia entre la cara del frontal resalto a un punto sobre la superficie inmediatamente aguas abajo que corresponde a la superficie de estancamiento; en otras palabras, observando el comportamiento del remolino turbulento, su longitud es igual a la separación del flujo entre las direcciones de avance y retroceso, como se lo puede ver en la figura 2.3. Por otro lado, la longitud del resalto hidráulico (L_r) es igual a la distancia entre la sección de su cara frontal y la sección en que se alcanza la máxima altura de la superficie de agua y se estabiliza la distribución de la velocidad. Por lo que siempre $L_t < L_r$. Figura 2.3. (Sotelo, 2002)

Figura 2.3 Esquema longitud de resalto y longitud de remolino



Adaptado de (Sotelo, 2002)

Para el diseño de cuencos disipadores es muy importante conocer la longitud en que se desarrolla el resalto hidráulico, con el objeto de prever la extensión del recubrimiento que proteja las fronteras del canal contra los efectos erosivos provocados por la turbulencia.

Acerca de este tema se han realizado muchas investigaciones las mismas que han proporcionado fórmulas empíricas y gráficas de ayuda durante años; pero estos diversos desarrollos teóricos realizados hasta la fecha, presentan un gran inconveniente, que radica en que sus resultados presentan serias contradicciones entre un método y otro; esto puede ser debido a las complicaciones prácticas derivadas de la inestabilidad de los resaltos, que dejan a un criterio subjetivo la definición de su longitud.

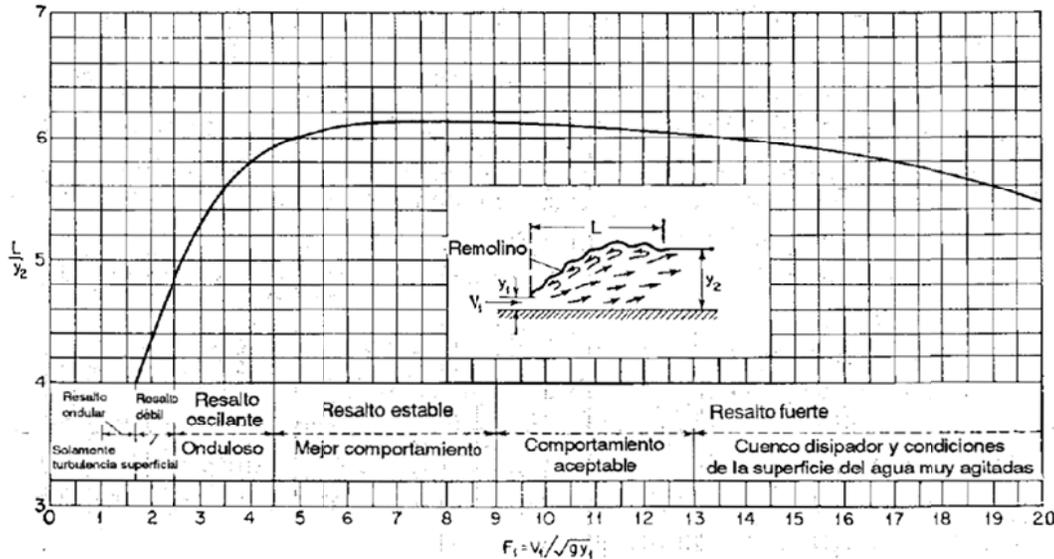
En la presente tesis se citarán dos métodos basados en grandes campañas de experimentación; una gráfica adimensional muy conocida y utilizada en todo el mundo, que gráfica del número de Froude F_1 versus la relación L_r/y_2 desarrollada por la USBR presentada en la figura 2.4; y una ecuación (ec. 2.28) desarrollada en

base a los resultados obtenidos por los investigadores Peterka y Macha; que arroja resultados muy similares a los del método de la USBR.

Ecuación de Longitud de Resalto. Peterka y Macha (Equipo Consultor, 2011):

$$\frac{L}{y_1} = \left[3 \left(\sqrt{8F_1^2 + 1} - 3 \right) + \frac{1}{20} \left(81\sqrt{8F_1^2 + 1} - 2F_1^2 - 241 \right) \right] / 2 \quad (2.28)$$

Figura 2.4 Longitud del resalto para canal horizontal. USBR



Fuente: (Chow, 1982)

2.2.4 Cuencos disipadores de energía

Los cuencos disipadores, como su nombre lo indica son cuencos que realizan la función de disipación de la energía concentrada en la obra a diseñar. Se ubican aguas abajo de una estructura, por lo general un vertedero con perfil hidrodinámico, que se diseñan con la finalidad de disminuir el exceso de energía cinética en el flujo, previo a que se reincorpore en la corriente natural; y así minimizar el tamaño y el costo de la estructura. El sistema de disipación se fundamenta en el resalto hidráulico, convirtiendo el flujo supercrítico proveniente del vertedero en subcrítico, y así no evitar daños aguas abajo en la corriente natural.

En muchos tipos de diseño de cuencos disipadores se incluye elementos (como dados de impacto, dado de chorro, escalones, enrocado a la salida) con la finalidad de incrementar la turbulencia para la disipación de energía.

El diseño está basado en las ecuaciones presentadas en las características básicas del resalto, apartado 2.2.3. Teniendo siempre presente que el cuenco disipador pueda operar en forma segura para un amplio rango de condiciones de flujo.

El principal daño que se debe evitar, es la socavación y cavitación del cuenco

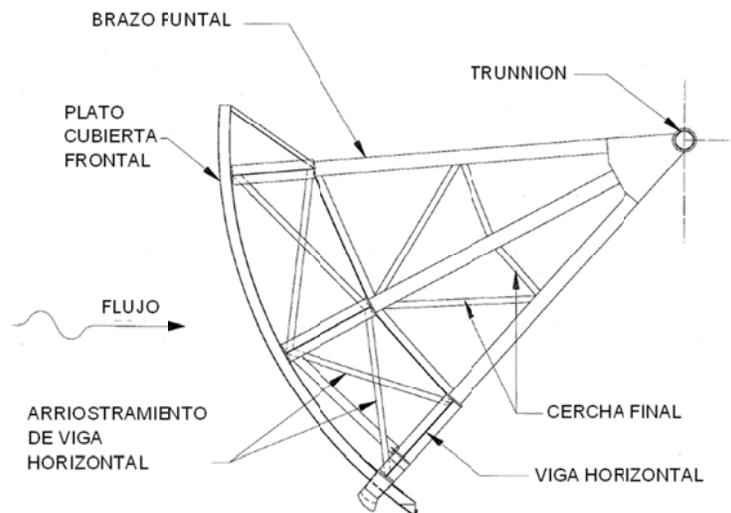
disipador y del lecho natural aguas abajo.

En la práctica existen algunos diseños estandarizados de cuencos disipadores, altamente recomendados, que fueron desarrollos entre los años 1950 y 1960, que se presentan a continuación:

- Cuenco USBR de tipo II, para estructuras grandes y $F_1 > 4.5$.
- Cuenco SAF, para pequeñas estructuras.
- Cuenco USBR de tipo IV, para condiciones de flujo de resalto oscilante. (Chanson, 2002)

2.3 Compuertas Radiales (Tainter)

Figura 2.5 Compuerta Radial



Adaptado de (U.S. Army Corps of Engineers, 2000)

Las compuertas radiales (figura 2.5) son estructuras de control del flujo, el mismo que descarga debajo de la estructura funcionando como un orificio. Al momento de diseñar una compuerta dos aspectos son los principales: la relación altura-descarga y la distribución de presión sobre las superficies de la compuerta para varias posiciones de la compuerta y varias formas de los bordes de la compuerta. Un esquema de las variables que afectan al control del flujo a través de una compuerta radial se lo puede observar en la figura 2.1. (Chow, 1982)

La ecuación de la descarga a través de una compuerta bajo el flujo, se obtiene de la ecuación de la energía, y es la siguiente:

$$Q = C B a \sqrt{2g \left(H + \alpha \frac{V_1^2}{2g} \right)} \quad (2.29)$$



Donde:

C: Coeficiente de descarga.

B: Longitud de la compuerta

a: Abertura de la compuerta

H: Altura del calado aguas arriba de la compuerta

$\alpha V_1^2/2g$: Altura de la velocidad del flujo de aproximación.

El flujo aguas abajo de la compuerta puede ser libre o sumergido, cuando sea sumergido la altura (H), debe ser reemplazada por la altura efectiva (H') que es igual a la diferencia entre las profundidades aguas arriba y aguas abajo en la sección de la compuerta.

En estudios experimentales se puede omitir el término de la altura de la velocidad de la ecuación (2.29), y su efecto se puede incluir en el coeficiente C, quedando de la siguiente forma (Chow, 1982):

$$Q = CBa\sqrt{2gH} \quad (2.30)$$

Donde C depende de la geometría de la estructura y de las profundidades aguas arriba y aguas abajo. La forma de la ecuación es la misma para flujos libres y sumergidos.

Toch realizó curvas para calcular el coeficiente de descarga para compuertas radiales, basado en el análisis de variables como la abertura de la compuerta "a", el radio de la compuerta "r", la carga de agua aguas arriba de la compuerta "H", la altura del flujo aguas abajo de la compuerta "y2", altura del muñón "L" y la condición de descarga del flujo, libre o sumergido. Estas graficas se presentan en la figura 2.7.

Las compuertas radiales presentan ciertas características diferentes a las compuertas planas, haciendo una comparación de éste tipo de compuertas tenemos las siguientes ventajas y desventajas en base a las primeramente citadas:

Ventajas:

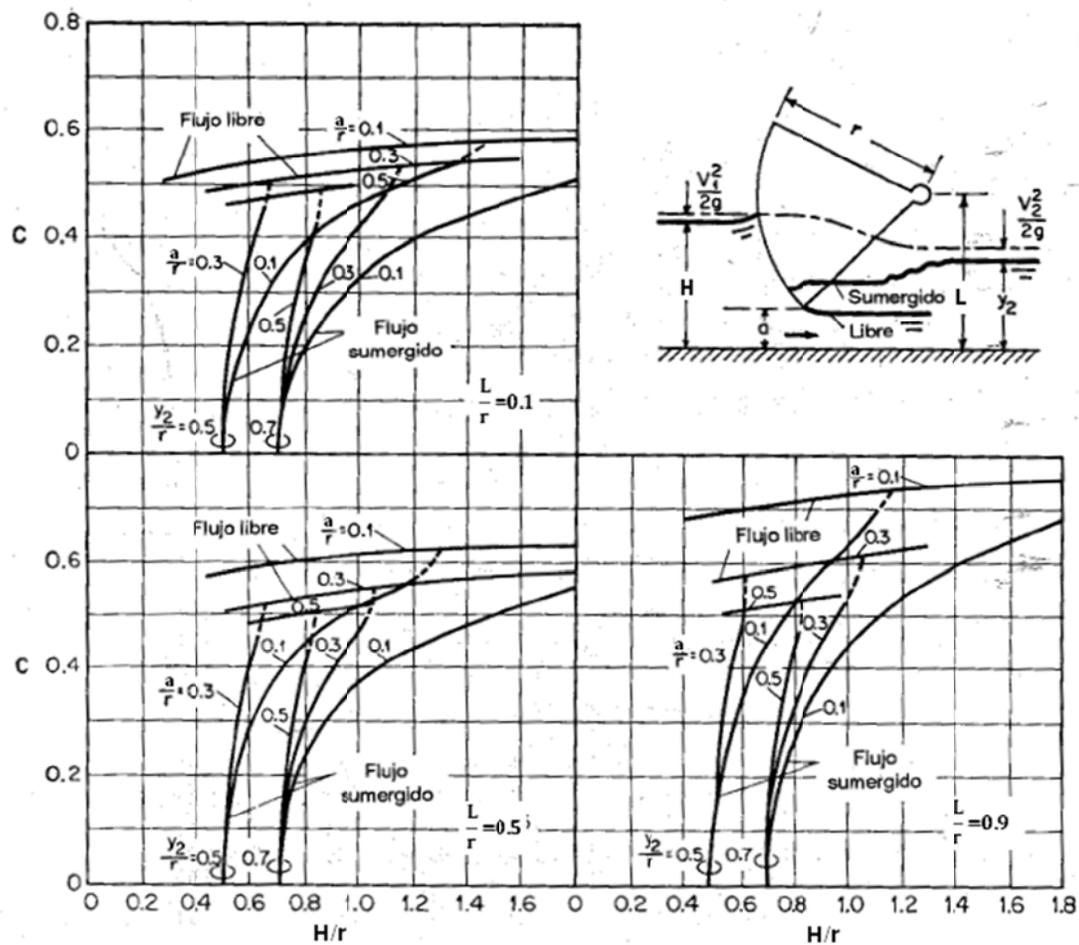
- Tiene sistemas de izamiento más pequeños,
- Mayores velocidades de subida,
- Presentan rigideces más altas,
- La construcción permite ausencia de ranuras en la compuerta,
- La automatización es más fácil y presentan un mejor desempeño en el invierno (en países con estaciones);

Desventajas:

- Las compuertas radiales requieren pilas más largas y gruesas,
- Puede existir dificultades al momento de instalar los tablonces para el mantenimiento de la compuerta.

Las compuertas radiales por lo general se elevan mediante cables fijos en cada extremo para prevenirla de torcimiento y atascamiento. Dado que los cables se conectan en la parte inferior de la compuerta, la parte superior puede elevarse por encima del nivel de izamiento.

Figura 2.7 Coeficiente de descarga para compuerta radial (Chow, 1982)





CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente capítulo describe por un lado los materiales utilizados para el desarrollo del trabajo de tesis, que comprende principalmente la documentación proporcionada por el equipo de diseño del proyecto Control de inundaciones de los ríos Bulubulu, Cañar Naranjal; información base para realizar el modelo físico. En efecto este modelo parte de los diseños propuestos por el equipo diseñador y en estos a través de su funcionamiento de establecen las necesidades de cambios o adiciones que permitan un óptimo funcionamiento, estos cambios o adiciones se establecen a través de sugerencias, siempre la última palabra la tendrá el diseñador; por otro se detallará los procesos de diseño del modelo físico y de la experimentación, estas definiciones y descripciones se realizarán por separado para cada una de ellas.

3.1 Materiales

3.1.1 Descripción del Proyecto

El Proyecto consiste en implementar un sistema integral de medidas de ingeniería para el control de inundaciones y estabilización de cauces en el sistema Bulubulu – Cañar – Naranjal, en el sector de la cuenca baja del río Guayas. Además se tiene como objetivo dotar de los mecanismos que demanda la conservación y remediación de desastres naturales que son comunes en las partes media y baja de la cuenca del río Guayas; todo esto enfocado hacia el desarrollo socio-económico de la región.

3.1.1.1 Descripción del sistema hidráulico

El proyecto está dividido en tres sistemas: Bulubulu, Cañar y Naranjal, que corresponden a cada una de las cuencas principales correspondientes. A continuación se presenta un listado de los componentes de cada sistema:

- Sistema Bulubulu:
 - Obras de protección, a través de diques, a lo largo del río Bulubulu desde Cochancay hasta Las Maravillas.
 - Derivadora Las Maravillas.
 - Embalse para laminación del pico de crecida en Las Maravillas.
 - Mejoramiento de la entrada a la derivadora existente Bulubulu
- Sistema Cañar:
 - Obras de protección, a través de diques, a lo largo del río Cañar y sus afluentes principales, como son el Patul, Piedras y Norcay.
 - Derivadora Cañar.
 - Bypass Cañar para transportar los excesos de las crecidas máximas



Universidad de Cuenca

para un período de retorno de 50 años. El bypass dispone de un sedimentador en el sector de las lagunas Lagartera y Envidia.

- Dos puentes nuevos sobre el bypass Cañar, ubicados uno en la vía La Troncal – Puerto Inca y el otro en la vía Boliche – Puerto Inca.
- Rehabilitación o reconstrucción de los puentes sobre el río Cañar y sus afluentes.

- Sistema Naranjal:

- Obras de protección, a través de diques, a lo largo del río Naranjal y sus afluentes principales, como son el Cañas, Jesús María, San Francisco, Gramalotal, Chacayacu y Bucay.
- Encauzamiento del río Naranjal en los 22 Km finales hasta su descarga en el estero Churute.
- Rehabilitación o reconstrucción de los puentes sobre el río Naranjal y sus afluentes.

La distribución hidráulica del proyecto para el control de inundaciones de los ríos Bulubulu, Cañar y Naranjal se la puede observar en el anexo 4, que consiste básicamente en la laminación del pico del río Bulubulu en 350 m³/s, en el alivio de 1100 m³/s del río Cañar, cuyo valor en la hipótesis extrema ser desviado a través del bypass Cañar y en el mejoramiento del río Naranjal hasta su desembocadura.

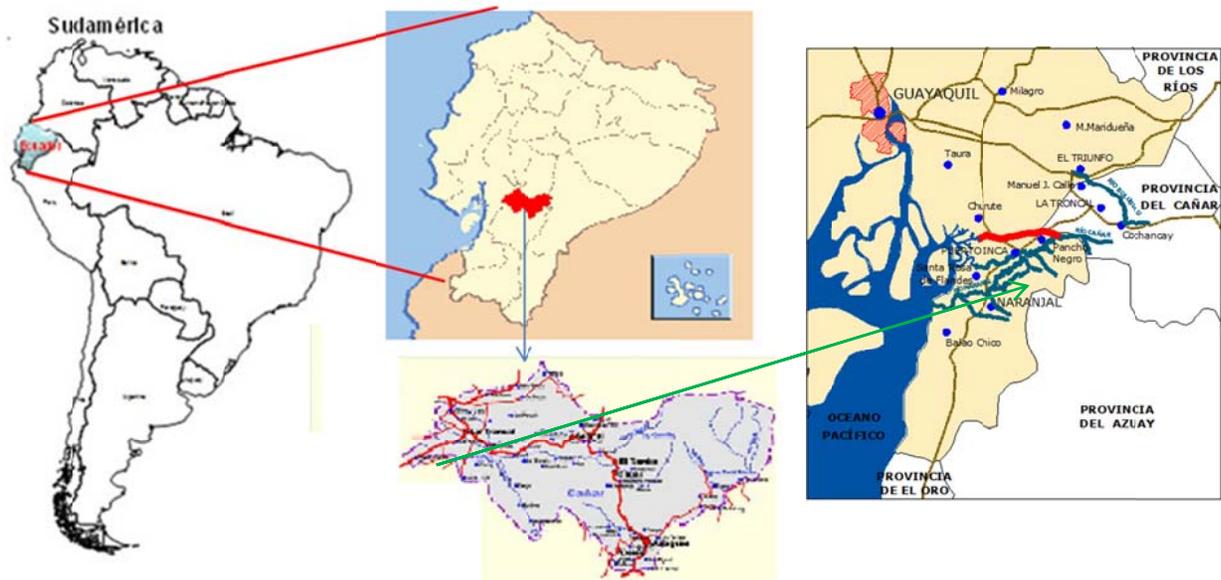
Los caudales utilizados para el diseño luego de una amplia discusión y resolución de la SENAGUA corresponden a los máximos esperados en un período de retorno de 50 años.

3.1.1.2 Sistema Cañar

3.1.1.2.1 Ubicación

Las derivadora de caudales Cañar está ubicada en el Continente Americano, en Sudamérica, en la República del Ecuador, Provincia de Cañar (en el límite con la Provincia del Guayas), Cantón La Troncal, Parroquia Pancho Negro; en el sector de la hacienda La Grecia, a unos pocos metros aguas arriba de la junta con el estero Pancho Negro. Dentro de las coordenadas UTM (672280, 9723900) y (672072, 9723400). Datum WGS84-17SUR.

Figura 3.1 Ubicación de la Derivadora Cañar.



3.1.1.2.2 Generalidades

La solución del control de inundaciones del sistema Cañar comprende la derivación del caudal en excesos a través de un bypass denominado Cañar. El sistema Cañar está concebido de forma que el caudal máximo que pueda pasar por Puerto Inca sea $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ durante una crecida máxima en un período de retorno de 50 años, es decir, disminuir el caudal esperado en este sitio de control, que de acuerdo al estudio hidrológico asciende a $2100 \text{ m}^3/\text{s}$. Para lograr este objetivo todos los caudales en exceso serán derivados al bypass Cañar y transportados hacia la descarga en el estero Soledad Grande.

El río Cañar transporta un caudal de $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ (correspondiente a una lluvia de período de retorno de 50 años) en el sitio destinado para la implantación de la Derivadora Cañar, sector Pancho Negro. Se tiene previsto desviar un caudal pico de $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ por el bypass Cañar, manteniendo de esta forma un caudal de $400 \text{ m}^3/\text{s}$ en el río Cañar, para así lograr, después de la unión con el río Norcay, un caudal máximo de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ en Puerto Inca.

Sin embargo el caudal máximo en el río Cañar después de la derivación no será necesariamente $400 \text{ m}^3/\text{s}$, sino que este dependerá del caudal aportante de la cuenca del río Norcay, es decir si el caudal en los ríos Norcay y Piedras en un instante cualquiera es pequeño o menor a su caudal de máxima crecida, entonces el caudal que pueda pasar por el río Cañar será mayor a los $400 \text{ m}^3/\text{s}$. Este sistema de regulación se logrará a través de la instalación de compuertas radiales en el cauce del río Cañar en la Derivadora y un control en tiempo real del caudal de paso en el río Norcay y Piedras, el cual a través de un sistema de radio o Scada se comunicará con los dispositivos de control de las compuertas en la derivadora. El sistema de regulación tiene como objetivo mantener en lo posible el



caudal natural del río Cañar, siempre teniendo como punto de control que en Puerto Inca debe llegar un máximo de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$.

La operación de las compuertas será automática con la implementación de sistemas de medición de niveles y caudales de los ríos Piedras y Norcay, que ordenen la operación del sistema de compuertas del río Cañar en la derivadora, y envíen hacia el bypass Cañar las cantidades que se requieran.

De todos modos y aunque se limite al mínimo posible las cantidades derivadas hacia el bypass Cañar, el caudal medio del río Cañar se verá disminuido en el tramo subsiguiente a la obra de derivación y tenderá a producirse degradaciones (aunque en menor escala) que deberán ser controladas mediante mantenimiento periódico del cauce del río.

3.1.1.2.3 Derivadora Cañar

El sistema Cañar se compone de una derivadora que extrae los excesos de crecida del río Cañar en $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ hacia un bypass que desemboca al estero Churute a través del estero Soledad Grande. Consiste de un canal con control de compuertas en el río y un vertedero de caída libre sin compuertas en el bypass.

La estructura que queda del lado del río será una estructura de hormigón de sección rectangular, dotada de ranuras para colocar tablonces de cierre (stop logs), para casos de emergencia o de requerir mantenimiento. Adicionalmente, se dispone de un sistema de compuertas radiales de fondo diseñadas para un rango de caudales que varíe el paso hacia el río Cañar entre 400 y $800 \text{ m}^3/\text{s}$.

Se tendrán 10 compuertas de tipo radial, con accionamiento mecánico a base de aire comprimido. Estarán colocadas entre dos pilas de 1.85 m de ancho y tendrán la altura indicada en los planos de diseño, que se encuentran en el anexo 6.

Se dispondrá de topes para las compuertas, de tal forma que en la condición de caudal máximo de diseño estén abiertas hasta una altura que permita circular los caudales entre 400 y $800 \text{ m}^3/\text{s}$ según sea el caso. Hacia la parte superior no existirán topes, pudiendo abrirse las compuertas hasta la capacidad máxima.

La ventaja de este sistema de compuertas de fondo, en relación a uno de vertedero con compuerta, es que los sedimentos fluyen libremente por debajo de la compuerta sin necesidad de un vertedero que se convierte en retenedor de sedimentos hacia aguas arriba, que además de deteriorar el funcionamiento hidráulico del vertedero, requiere un mantenimiento constante a través de una compuerta ubicada a nivel del río en el sitio.

Para valores mayores a los de diseño del río, las compuertas podrán ser operadas como un medio de protección del bypass Cañar. En el caso de que se haya llegado a niveles de alarma se enviará al río un caudal mayor al de diseño, en cuyo caso el cauce del río deberá soportar valores mayores dentro del borde libre planteado, o en su defecto inundando zonas susceptibles, las que deberán tener

un sistema de control de evacuación con alerta temprana.

La derivadora dispone de un cuenco amortiguador, cuyo objetivo será eliminar la energía del vertedero de caída libre, mediante un salto hidráulico confinado capaz de entregar los caudales de diseño hacia el bypass. La transición toma los caudales del cuenco amortiguador y los traslada hacia el bypass, de tal manera que su energía se vea disminuida.

Los detalles de los componentes de la Derivadora Cañar con sus dimensiones se muestran en los planos que se encuentran en el anexo 6.

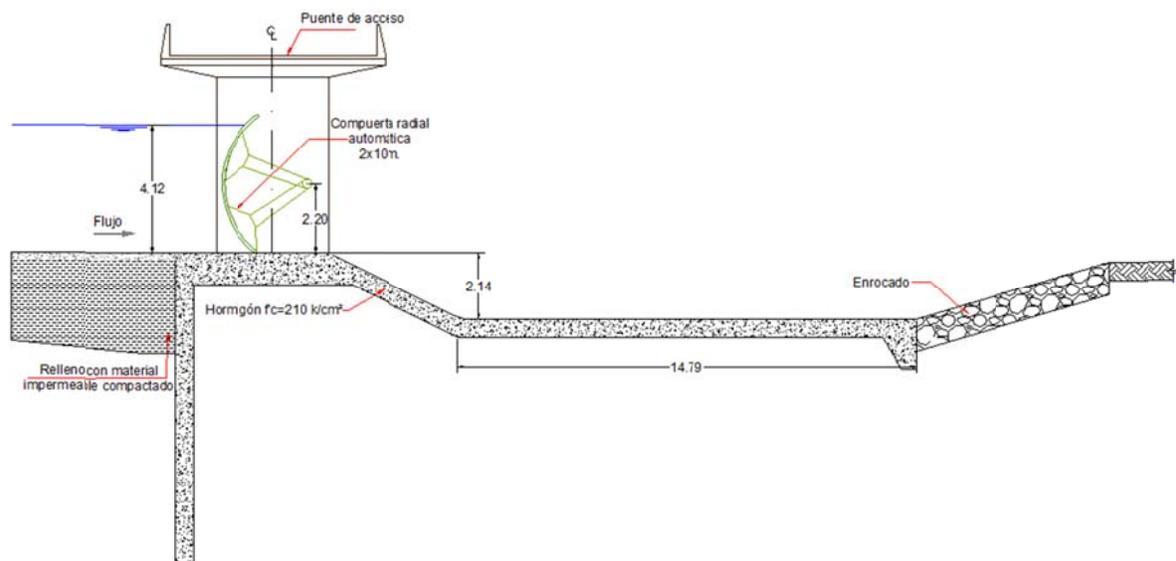
3.2 Métodos

3.2.1 Diseño y construcción del modelo físico

Previo a diseñar el modelo físico, se recopiló la información de campo, topográfica e hidrológica del proyecto, en la figura 3.2 se presenta un perfil transversal de la estructura de compuerta de la derivadora Cañar en prototipo. Al tratarse de una estructura de flujo de superficie libre el efecto predominante es la gravedad, tal como se lo explicó en apartado 2.1.2.3; con esta consideración, la modelación se realizó por la similitud de Froude:

$$Fr_p = Fr_m \quad (3.1)$$

Figura 3.2 Perfil transversal de la Estructura de Compuerta de la Derivadora Cañar, prototipo (PROMAS, 2011)



El diseño del modelo físico de la compuerta fue realizado por ancho unitario a escala no distorsionada. La selección de la escala geométrica apropiada, fue un proceso iterativo, en función de las dimensiones del canal, de la capacidad máxima de la bomba $(Q_m)_{\text{máx}}$ (datos que se encuentran en el anexo 1). Además se realizó la comprobación del cumplimiento del efecto predominante referido



anteriormente.

A continuación, se describen los cálculos realizados para definir las dimensiones del modelo físico de compuerta. Se definió una escala longitudinal (L_r) de 1:20. Se recomienda revisar la nomenclatura en la lista de símbolos.

Cálculos:

Partiendo de la ecuación (2.1) de la relación de longitudes (L_r), calculamos la variable independiente del calado de aguas arriba de la compuerta.

$$L_r = \frac{H_m}{H_p} = \frac{1}{20} \quad (3.2)$$

$$H_p = 4.12 \text{ m}$$

$$H_m = H_p \times L_r = 4.12 \times \frac{1}{20} = 0.206 \text{ m} \quad (3.3)$$

El ancho transversal (b_p) de la estructura de la compuerta es 100m.

$$b_m = b_p \times L_r = 100 \times \frac{1}{20} = 5 \text{ m} \quad (3.4)$$

Los caudales que se escalaron, son los caudales de diseño del prototipo indicados en el apartado 3.1.1.2.3., cuyos valores son: 400, 600 y 800 m³/s.

En forma general el caudal para el modelo se calcula partiendo de la ecuación 2.14, donde despejamos Q_m , y quedaría de la siguiente forma:

$$Q_m = Q_p \times L_r^{5/2} \quad (3.5)$$

Comenzamos escalando el caudal $Q_p = 400 \text{ m}^3/\text{s}$; de la ec. 3.4 tenemos:

$$Q_m = 400 \times \frac{1}{(20)^{5/2}} = 0.224 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.6)$$

De las ecuaciones 3.3 y 3.5, calculamos el caudal unitario.

$$\frac{Q_m}{b_m} = \frac{0.224 \text{ m}^3/\text{s}}{5 \text{ m}} = 0.045 \frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{m}} \quad (3.7)$$

El ancho del canal donde se realizó la experimentación es de 0.3 m (anexo 1); por lo que el caudal en el modelo para la experimentación (Q_{tm}) es:

$$Q_{tm} = 0.3 \times \frac{Q_m}{b_m} = 0.3 \times 0.045 = 0.01342 \text{ m}^3/\text{s} = 13.416 \text{ L/s} \quad (3.7)$$

Con similar procedimiento se escalaron los caudales $Q_p = 600 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_p = 800 \text{ m}^3/\text{s}$, obteniéndose los caudales en el modelo $Q_{tm} = 20.125 \text{ L/s}$ y $Q_{tm} = 26.833 \text{ L/s}$. Dado que el caudal máximo de la bomba del canal es 23.5 L/s (anexo 1); se

decidió respetar la escala geométrica y ensañar con un caudal menor al máximo $Q_p = 700 \text{ m}^3/\text{s}$, que escalándole se obtiene en el modelo $Q_{tm} = 23.479 \text{ L/s}$.

Finalmente se verificó que no existan efectos de escala en el modelo, siguiendo las recomendaciones descritas en el apartado 2.1.2.4; comprobamos si las fuerzas predominantes son las de gravedad y que no exista influencia de las fuerzas por viscosidad. Para ello se verificó que las condiciones de flujo en el modelo sean turbulentas mediante el número de Reynolds en el modelo, Re_m , para el menor caudal de la experimentación $Q_m = 13.416 \text{ L/s}$ ($Q_p = 400 \text{ m}^3/\text{s}$). Con esa finalidad es que primero se calculó la velocidad media en el modelo, para este caudal:

$$V_m = \frac{Q_m}{H_m \times b_m} = \frac{0.01342 \text{ m}^3/\text{s}}{0.206 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}} = 0.217 \text{ m/s} \quad (3.8)$$

La temperatura promedio del agua con la cual se desarrolló la experimentación es de 18°C ; para ésta temperatura la viscosidad cinemática es $1.061 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

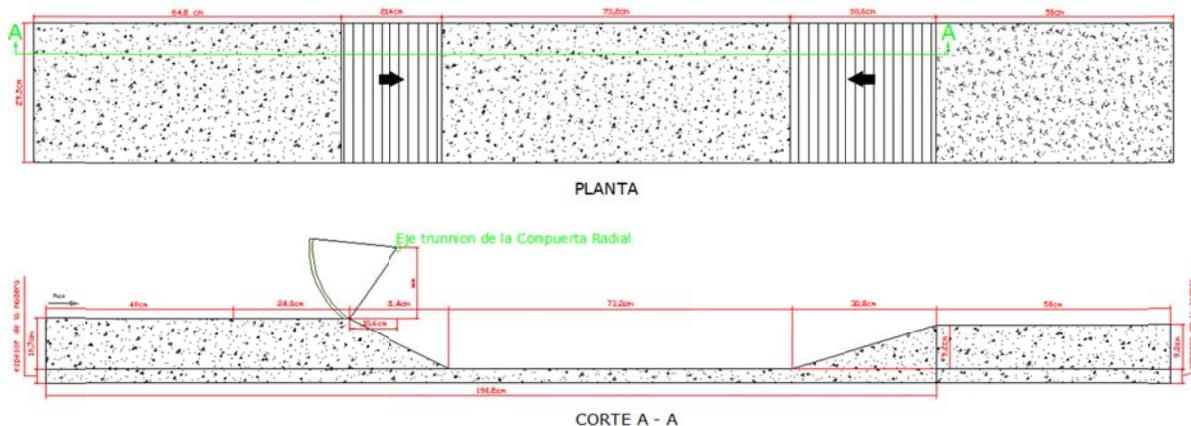
Así el número de Reynolds del modelo es:

$$R_m = \frac{V_m \times H_m}{\nu} = \frac{0.217 \text{ m/s} \times 0.206 \text{ m}}{1.061 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 42150 > 30000 \quad (3.9)$$

Éste mismo procedimiento se realizó para los caudales de $Q_m = 20.125 \text{ L/s}$ ($Q_p = 600 \text{ m}^3/\text{s}$) y $Q_m = 23.479 \text{ L/s}$ ($Q_p = 700 \text{ m}^3/\text{s}$), obteniendo los números de Reynolds R_m de 63225 y 73763, respectivamente.

Estos resultados del número del de Reynolds para el modelo, nos garantizaron que no se tendríamos efectos de escala (acción de las fuerzas de viscosidad), por lo tanto se modeló a la escala propuesta y con el mismo fluido del prototipo. En la figura 3.3 se presenta la estructura a escala de la compuerta y cuenco disipador de energía.

Figura 3.3 Estructura a escala de la compuerta y cuenco disipador de energía. Modelo físico (Equipo Consultor, 2011)



En cuanto a la construcción el material seleccionado fue madera para el cuenco disipador y para las piezas de profundización del mismo; para la compuerta se

decidió construirla con una combinación de madera y una lámina de metal en la parte frontal, que se sujetó a la madera mediante pernos. El eje del muñón de la compuerta (trunnion ver figura 2.5) consta de un brazo transversal de madera, sujeto lateralmente a pernos y tuercas, que permiten ajustar la compuerta a las paredes laterales del canal.

Fuimos muy rigurosos con respecto a respetar las dimensiones al momento de la construcción del modelo físico de la compuerta; se comprobó la horizontalidad en el borde de cierre la compuerta y que la compuerta mantenga el radio de diseño entre el borde lateral de la lámina frontal y el eje del muñón, esto se comprobó para los dos lados de la compuerta. En la figura 3.4 se presenta las piezas del modelo, previo a la colocación.

Figura 3.4 Modelo físico de Compuerta y Cuenco disipador de energía



3.2.2 Descripción de variables de estudio y diseño de la experimentación

Primeramente fue necesario identificar las variables asociadas al fenómeno a estudiarse en el modelo físico, partiendo de una hipótesis del comportamiento del dicho fenómeno en base a la conceptualización teórica que representa el proceso y a las simplificaciones que se hayan establecido; esto trabajo se realizó en conjunto con el equipo de diseño del prototipo.

Las variables que se definieron para los caudales de diseño son:

1. *Posición de la compuerta (P)*.- Definimos tres diferentes posiciones de la compuerta (*P1*, *P2* y *P3*) con respecto al cuenco disipador de energía, las mismas que se especifican en la figura 3.5, y se detallan a continuación:

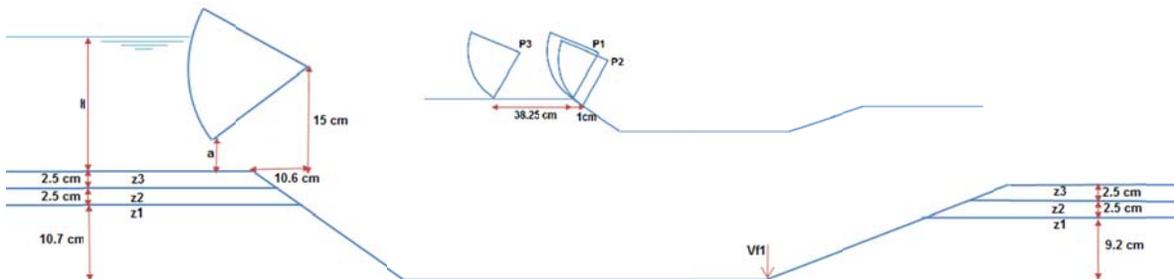
P1:El filo inferior de la compuerta coincide con el vértice superior del talud de ingreso al cuenco disipador; y el eje del muñón está ubicado con referencia a este punto a 10,64 cm horizontalmente y 15 cm verticalmente.

P2:Del vértice superior del talud de ingreso al cuenco disipador, se mide 1

cm (en el modelo) equivalente a 20 cm (en el prototipo), en dirección horizontal aguas abajo, desde ese punto se proyecta una vertical hasta que coincida con el talud de ingreso al cuenco disipador; éste es el punto de cierre de la compuerta; desde aquí se miden las distancias horizontal y vertical hasta el eje del muñón, que son las mismas que las descritas en *P1*.

P3: Del vértice superior del talud de ingreso al cuenco disipador (*P1*), se mide una distancia horizontal de 38,25 cm (en el modelo), equivalente a 7,65 m (en el prototipo), en la dirección aguas arriba, éste es el punto de cierre de la compuerta; desde aquí se miden las distancias horizontal y vertical hasta el eje del muñón, que son las mismas que las descritas en *P1*.

Figura 3.5 Variables de posición de compuerta y profundización de cuenco disipador. Dimensiones en modelo.



2. *Profundización del cuenco disipador de energía (z)*.- Los ensayos de la compuerta se realizaron en tres diferentes niveles de profundización del cuenco disipador de energía (*z1*, *z2* y *z3*), los mismos que se especifican en la figura 3.5, y cuyas profundidades son las siguientes:
 - z1*: 10.7 cm aguas arriba y 9.2 aguas abajo.
 - z2*: Se adiciona 2.5 cm a *z1* en el modelo.
 - z3*: Se adiciona 5 cm a *z1* en el modelo.
3. *Calado del flujo aguas arriba de la compuerta (H)*.- Variable medida en un punto cercano aguas arriba de la compuerta donde el flujo es estable. Esta variable es constante para todo el juego de experimentaciones, es dato de diseño que no depende de las condiciones reinantes en la obra.
4. *Caudal (Q)*.- Se realizó la experimentación para tres caudales, especificados en el apartado 3.2.1; 400 m³/s, 600 m³/s y 700 m³/s en prototipo, equivalentes a 13.416 L/s, 20.125 L/s y 23.479 L/s respectivamente en el modelo.
5. *Energía cinética (V²/2g)*.- Se midió la presión en cuatro puntos del talud de ingreso al cuenco disipador, colocados a diferentes alturas; las mediciones se realizaron mediante piezómetros descritos en el anexo 1.



6. *Velocidad (Vf1)*. - Se tomaron velocidades al final del cuenco disipador.
7. *Resalto hidráulico*. - Se midieron las alturas inicial y conjugada del resalto hidráulico, y_1 y y_2 respectivamente, y se tomaron como dato las abscisas donde se realizaron éstas mediciones, con el objeto de medir la longitud del resalto.
8. *Abertura de la compuerta (a)*. - Variable que describe la operación de la compuerta, para obtener las condiciones de diseño aguas arriba de la compuerta y analizar el comportamiento del flujo en el cuenco disipador, aguas abajo de la compuerta.

Luego se determinó la relación que existe entre las variables identificadas; es decir, que variables son dependientes e independientes, las mismas quedaron de la siguiente forma:

- Variables independientes:
 - Q: Caudal
 - z_1, z_2, z_3 : Profundidad del cuenco
 - P1, P2, P3: Posiciones de la compuerta
 - H: Altura Aguas Arriba de la Compuerta
- Variables Dependientes:
 - a: Apertura de la Compuerta
 - y_1, y_2, L_r : Variables del Resalto hidráulico
 - V_{f1}, V_{f2} : Velocidad al final y en el centro del cuenco disipador
 - $V^2/2g$: Energía energía cinética

Con base a ésta información, se diseñó el procedimiento de registro de datos y se dimensionó el número de mediciones y/o repeticiones de los mismos, quedando de la siguiente manera:

Para los tres diferentes caudales de diseño (Q), se planteó mantener la altura del calado aguas arriba de la compuerta (H) constante en 4.12 m (prototipo), 20.6 (modelo); y establecer la apertura de la compuerta (a) para la cual se cumpla la condición de Q y H simultáneamente.

Esto se comprobó en las tres posiciones de la compuerta (P1, P2 y P3) y para las tres profundidades del azud (z_1, z_2 y z_3). Es decir son 27 ensayos en éste conjunto.

En todas las posiciones se midieron las variables asociadas al control del flujo bajo la estructura de la compuerta y a través del cuenco disipador.

Los formatos para la toma de datos se ajuntan en el anexo 4.

3.2.3 Instalación, calibración y verificación del modelo físico

El modelo físico se colocó entre las abscisas 4.900 m y 7.302 m del canal del



laboratorio de Hidráulica, mediante el siguiente procedimiento:

1. Primero se colocó la base de madera de la estructura, que tiene un espesor de 1 cm. Luego colocamos las estructuras que representan la profundización del cuenco y los taludes de ingreso y salida del cuenco dissipador. Estas estructuras tienen tres niveles, los ensayos se comenzaron desde el nivel z1 (10.7 cm), en cada nivel se midió el grupo de ensayos para las tres posiciones de la compuerta.
2. Referenciamos en los vidrios laterales el lugar donde se colocará el eje del muñón según las posiciones descritas en 3.2.2; introducimos la compuerta en el canal colocando el centro de los cuadrados que equivalen al eje del muñón, en el punto referenciado. Ajustamos los cuadrados al vidrio del canal y verificamos que se cumpla el punto de cierre de la compuerta. En el anexo fotográfico se puede observar en parte, procesos durante la colocación.
3. Sellamos los espacios entre las estructuras y las paredes laterales.
4. Colocamos los tubos piezométricos en el talud de ingreso, a cuatro diferentes alturas y de tal forma que no influyan en el flujo; colocamos la tabla de medición de los piezómetros en un lugar visible, y a una altura que garantice la medición y comunicación con el inicio de cada tubo, por el método de vasos comunicantes.

Una vez implementado el modelo, fue necesario calibrarlo, con la finalidad de ajustar y validar las condiciones que rigen en el fenómeno en estudio; y así lograr una concordancia entre el modelo y el prototipo.

Primero se construyó una curva de descarga en el canal de experimentación, caudal vs. calado de agua, utilizando como estructura de control un azud, que también es parte del Proyecto de Control de Inundaciones del Río Cañar, colocado en el canal aguas arriba de la compuerta. Se decidió emplear el azud como estructura de control ya que si se construiría una curva de descarga utilizando una compuerta como estructura de control al momento variar la apertura de la compuerta perdería su aplicación.

Construcción de la curva de descarga del canal

El método empleado para la medición de caudales, fue el de velocidad media, medida al sesenta por ciento del calado desde la superficie libre y en tres puntos en el sentido horizontal de la sección transversal (extremos y centro); el equipo empleado fue el Flow Traker, descrito en el anexo 1; él mismo que además de proporcionar los datos de velocidad en el punto, arroja datos de desviación estándar de la velocidad, calidad de las condiciones de frontera de la medición; datos que son útiles al momento de decidir si aceptar o rechazar la medición; adicional a ello, el equipo Flow Traker proporciona el área de la sección aforada, la velocidad media y el caudal en esa sección, mediante el método de 0,6 H.



El procedimiento realizado para el aforo se describe a continuación:

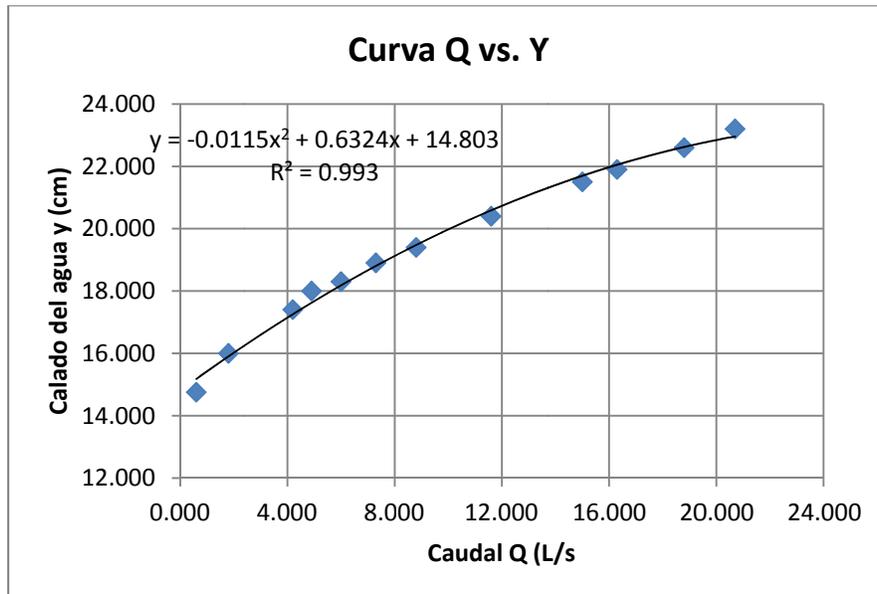
1. Se ubicó la sección de control en un punto donde el flujo era estable, por ello se decidió realizarlo aguas arriba del Perfil Creager, a una distancia mayor a cuatro veces la carga sobre el vertedero ($4H_v$).
2. Se midió el calado del flujo en la sección de control.
3. Se colocó el sensor del Flow Tracker, con su respectiva base, a la altura de 0,6 H; medido desde la superficie libre, y medimos la velocidad primero en el extremo y luego en el centro del canal.
4. Se repitieron los pasos 2 a 3, para un diferente calado. Necesitamos de aforos a varias alturas, de tal manera que obtuvimos un número suficiente de puntos para lograr un correcto ajuste de la curva.

El caudal es igual a $Q = V_m \times A$, donde V_m es la velocidad media de la sección y A es el área de la sección transversal.

A su vez $V_m = \frac{2V_1+V_2}{3}$, donde V_1 es la velocidad en los extremos y V_2 es la velocidad en el centro.

En la campaña de aforos se obtuvieron doce puntos, los mismos que se ajustaron a una curva polinómica de segundo orden, cuya gráfica se presenta en la figura 3.6, además en el anexo fotográfico se presentan algunas fotografías de la campaña de aforo.

Figura 3.6 Curva de descarga aguas arriba del azud





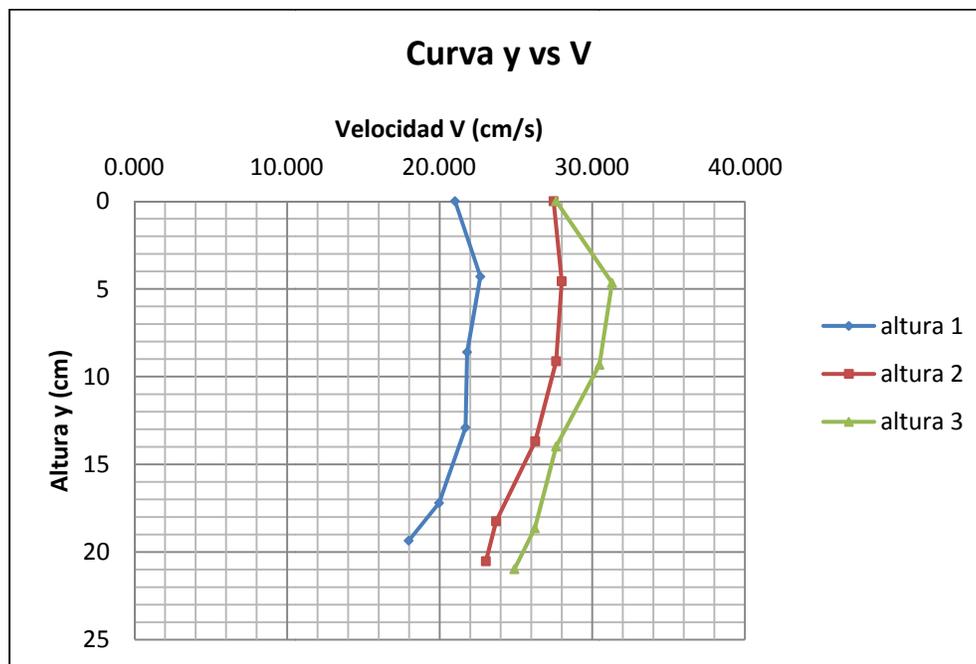
Validación de la curva de descarga

A la curva de descarga presentada es necesario validarla, para lo cual se comprobaron tres caudales (puntos) de la curva mediante el método de aforo de los 6 puntos.

En el método de los 6 puntos se aforan velocidades en: 0,9H; 0,8H; 0,6H; 0,4H; 0,2H y velocidad superficial, para determinado calado del flujo. Los aforos se realizaron en el extremo y en el centro de la sección transversal. Éste método es más exacto que el método de la velocidad promedio en un solo punto, 0,6H.

El comportamiento de las velocidades en una sección vertical, es teóricamente conocido, por lo cual existe una forma estándar del perfil de velocidades; es por ello que se graficaron los perfiles de las mediciones realizadas, siendo una herramienta para comprobar la validez de las mismas. Estos perfiles se presentan en la figura 3.7.

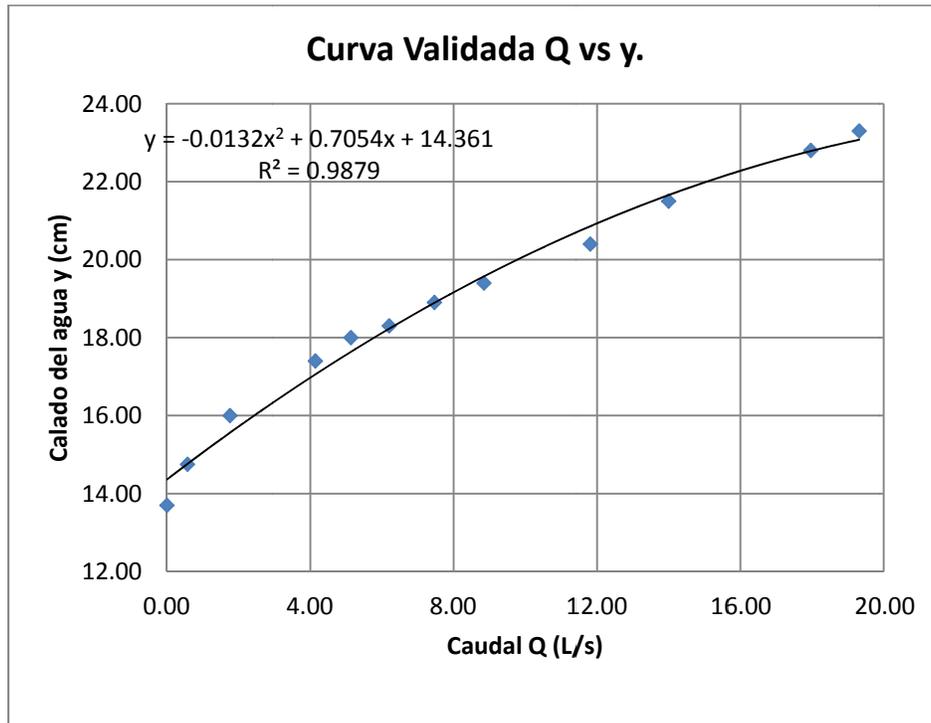
Figura 3.7 Curva altura – velocidad aguas arriba del azud



El caudal para un determinado calado es igual al promedio de las 6 velocidades, multiplicado por el área de la sección mojada. La condición que se debía cumplir para validar la curva de descarga es que la diferencia entre éstos nuevos caudales aforados y los caudales a ser comprobados de la primera medición no fuese mayor al 10%.

Ya que se cumplió ésta condición, se aceptaron los datos previamente medidos y con la finalidad de mejorar la curva de descarga presentada en la figura 3.6, se remplazaron los nuevos caudales por sus similares; quedando así la curva de descarga definitiva, la presentada en la figura 3.8.

Figura 3.8 Curva de descarga validada



Se definieron los calados de agua en la sección de aforo, correspondientes a los caudales de diseño de la experimentación, quedando de la siguiente manera: 21.3 cm, 23.45 cm y 24.40 cm para los respectivos caudales de 13.42 L/s, 20.125 L/s y 23.479 L/s.

Construcción de la curva de calibración de la compuerta

Además se construyó una curva de curva de calibración del modelo de la compuerta para los tres caudales de diseño, siguiendo el procedimiento realizado en el diseño del prototipo, donde la descarga se calcula mediante la ecuación 2.30. $Q = Cba\sqrt{2gH}$. Aquí el punto fundamental es la determinación del coeficiente de descarga C , para el cual partimos de valores empíricos tabulados obtenidos de (Schröder & Press, 1966) y se presentan en la tabla 3.1. y proporcionados por el equipo de diseño de la estructura prototipo.

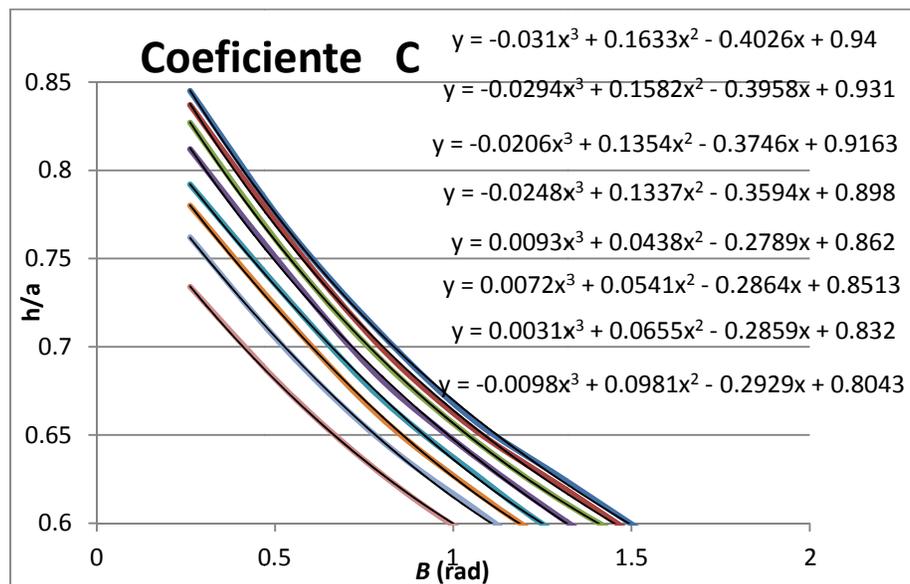
Para poder obtener los valores de C correspondientes a los ángulos B que calculemos según el procedimiento que se presenta más adelante, para nuestra curva de calibración, hemos realizado un ajuste de los valores de la tabla 3.1 para todas las relaciones h/a tabuladas; él mismo que se presenta en la figura 3.8.



Tabla 3.1 Valores de coeficiente de descarga C. (Schröder & Press, 1966)

Coeficiente de descarga C							
h/a	15	30	45	60	75	90	B (°)
	0.2618	0.5236	0.7854	1.0472	1.309	1.5708	B (rad)
8	0.845	0.77	0.71	0.66	0.625	0.59	
7	0.837	0.765	0.702	0.655	0.62	0.585	
6	0.827	0.755	0.695	0.649	0.612	0.582	
5	0.812	0.745	0.684	0.64	0.602	0.567	
4	0.792	0.73	0.673	0.63	0.592	0.568	
3.5	0.78	0.718	0.662	0.62	0.585	0.563	
3	0.762	0.7	0.649	0.61	0.575	0.557	
2.5	0.734	0.677	0.63	0.593	0.568	0.548	

Figura 3.8 Ajuste coeficiente de descarga



Como ilustración de la curva de calibración de la abertura de la compuerta, desarrollamos el cálculo para el caudal de 13.42 L/s (400 m³/s). Una tabla de cálculo con los datos para construir la curva se presenta en la tabla 3.2 y a continuación su explicación.

Tabla 3.2 Datos para la curva de calibración de compuerta para Q = 13.42 L/s

h / a	a	B	C	h	Q
8	0.0288	0.81	0.704	0.230	0.0129
7	0.0296	0.82	0.697	0.207	0.0125
6	0.0326	0.83	0.686	0.196	0.0132
5	0.0355	0.85	0.674	0.177	0.0134
4	0.0388	0.86	0.660	0.155	0.0134
3.5	0.0412	0.88	0.647	0.144	0.0134



3	0.0441	0.89	0.632	0.132	0.0134
2.5	0.0457	0.90	0.613	0.114	0.0126

Donde:

- h/a , es la relación entre el calado aguas arriba de la compuerta (h) y la abertura de la compuerta (a). Vamos a calibrar la compuerta para las relaciones de h/a presentadas en la tabla 3.1.
- $B = \cos^{-1} \frac{H-h/h/a}{R}$; sus unidades son radianes y sus términos son los siguientes
 - H es el máximo calado esperado aguas arriba de la compuerta. $H = 20.6$ cm
 - R es el radio de la compuerta y es igual a $1.25 H$, por lo tanto $R = 25.8$ cm.
- El coeficiente de descarga, C , se calcula con las ecuaciones obtenidas en la figura 3.8 para cada valor de h/a que están en función del ángulo B .
- El calado aguas arriba de la compuerta (h) es igual a $a \times h/a$.
- El ancho del canal $b = 0.30$ m y asumiendo una aceleración de la gravedad igual de $9,81 \text{ m/s}^2$; calculamos la abertura de la compuerta para cada uno de las relaciones h/a , igualando la ecuación 2.30 al caudal de diseño.

$$0.01342 \text{ m}^3/\text{s} = 0.30\text{m} \times C \times a \times \sqrt{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times h} \quad (3.10)$$

La ecuación 3.10 es una ecuación implícita de donde queremos obtener el valor de a . Para ello nos ayudamos de un comando de las herramientas de análisis del programa computacional Microsoft Excel, llamado Solver; que consta de tres algoritmos o métodos de resolución iterativos para encontrar el valor óptimo para una fórmula planteada. Para resolver la ecuación 3.10 se empleó el método Generalizado de Reducción de Gradiente No Linear (GRG) por sus siglas en inglés Generalizad Reduced Gradient; donde mediante un proceso de cálculos iterativos se encontró el valor óptimo de la celda a para que se cumpla la igualdad de la descarga (ec 3.10). Éste proceso se realizó para todas las relaciones h/a planteadas. Los resultados obtenidos se los pueden observar en la Tabla 3.2.

Para obtener la curva de calibración para este caudal, graficamos a vs. h . En la figura 3.9 se presentan las curvas obtenidas para el modelo de compuerta para los tres caudales de diseño.



Figura 3.9 Curva de calibración del modelo de compuerta



Para todos los ensayos el calado de agua aguas arriba de la compuerta es de 20.6 cm. Por lo que aplicando las curvas de ajuste, se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Ajuste de compuertas para ensayos

Q_m (L/s)	Q_p (m ³ /s)	a_m (cm)	C
13.42	400	3.2	0.70
20.12	600	5.3	0.65
23.48	700	6.3	0.62

Los valores de abertura de compuerta se tomaron como referencia, como primer valor al realizar los ensayos, para luego ir ajustando la abertura hasta obtener la



altura de agua de 20.6 cm aguas arriba de la compuerta.

3.3 Medición de variables y toma de datos

Las variables descritas en el apartado 3.2.2, se midieron según el siguiente proceso.

Caudal de diseño (Q): Primera variable que se requirió calibrar en cada experimentación, se realizó mediante la operación de la bomba hasta coincidir el calado del flujo definido en la sección de control aguas arriba del azud. Durante este proceso controlamos siempre que no existiesen estructuras que obstaculicen el paso libre del flujo aguas abajo del azud; en el caso de la estructura de compuerta colocada, se le daba una abertura tal, para que cumpla esta condición.

Abertura de compuerta (a): Se colocó la abertura de compuerta necesaria para que se cumpla la condición de diseño del calado aguas arriba H (20.6 cm). La abertura se midió con una regla con escala milimétrica.

Variables del resalto hidráulico: La medición se realizó mediante la observación del fenómeno del resalto hidráulico que ocurre en el cuenco disipador de energía, aguas abajo de la compuerta; medimos las alturas de y_1 , y_2 y la longitud del resalto hidráulico; para ello utilizamos los limnímetros descritos en el anexo 1; los cuales permiten medir la altura del agua y la abscisa exacta en la regleta del canal donde se realizó la medición, la diferencia entre las abscisas de y_2 y y_1 , permiten obtener la longitud resalto.

Energía cinética ($V^2/2g$): Ésta medición se la realizó en el talud de ingreso del cuenco disipador, en 4 puntos diferentes; para ello utilizamos los tubos piezométricos descritos en el anexo 1. La energía cinética es igual a la diferencia entre la carga durante la experimentación y la carga cuando el flujo se encuentra estático.

Velocidad al final del cuenco disipador ($Vf1$): La velocidad es igual al promedio de 3 mediciones de velocidad realizadas en el mismo punto, con el método de velocidad media 0.6 H; para ello ocupamos el equipo Flow Tracker descrito en el anexo 1; además en el anexo fotográfico se pueden observar algunas imágenes sobre la experimentación.

Previo al comienzo de cada experimentación se verificó la correcta calibración del modelo; revisando que el canal se encuentre en pendiente cero, que la compuerta al final del canal (anexo 1) permita la descarga libre, colocando el calado aguas arriba del azud correspondiente al caudal de experimentación y el calado de diseño aguas arriba de compuerta ($H = 20.6$ cm). Además, al ser la medición de las variables del resalto hidráulico un proceso subjetivo, durante este proceso se analizó el significado de los datos, con la finalidad de garantizar que la experimentación arroje información útil y confiable.



CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Procesamiento de los datos obtenidos en la experimentación.

Los resultados de la experimentación se presentan en la tabla 4.1.

En el apartado 3.2.2 se categorizaron las variables dependientes e independientes para la experimentación. Los parámetros de investigación fueron el resalto hidráulico y sus componentes (longitud del resalto y alturas conjugadas), abertura de la compuerta y velocidad final en el cuenco amortiguador. Estos parámetros se investigaron en función de las variables independientes de caudal de diseño, posición de la compuerta y profundidad del cuenco, variando respectivamente en tres alternativas indistintamente para cada variable.

La altura de carga de agua en la compuerta fue constante para todo el juego de experimentaciones, este es un dato de diseño que no depende de las condiciones reinantes en la obra; es decir la operación correcta del sistema integrado de estructura de compuerta y su posterior cuenco disipador funciona en las condiciones predichas en el diseño cuando la carga en la compuerta sea de $H_m = 20.6$ cm ($H_p = 4.12$ m), donde las curvas de calibración de la abertura de la compuerta han sido realizadas a partir de ésta condición. Por lo tanto, es un sinónimo de correcta operación en el prototipo el mantener esta carga constante en el evento de crecida esperado; y es la guía para la calibración en el modelo físico.

La energía cinética ($V^2/2g$), fue una variable empleada en la experimentación para comprobar si la lámina de agua, luego de pasar bajo la compuerta fluía pegada al talud de ingreso del cuenco disipador; para que se cumpla ésta hipótesis las presiones medidas en este punto tenían que ser negativas. El resultado obtenido en la experimentación fue contrario a la hipótesis ya que todas las presiones resultaron positivas; ésta variable no fue se incluyó en los análisis ya que su comportamiento ya fue determinado.

Tabla 4.1 Resultados de la Experimentación

VARIABLES DE DISEÑO					RESULTADOS					OBSERVACIONES
P	z	Q_p (m^3/s)	Q_m (L/s)	Hm (cm)	a_m (cm)	y1 (cm)	y2 (cm)	Lr (cm)	Vf1 _m (cm/s)	
1	1	400	13.42	20.60	3.25	1.80	17.80	58.60	53.67	Resalto hidráulico
2	1	400	13.42	20.60	3.20	2.40	17.20	60.50	53.10	Resalto hidráulico
3	1	400	13.42	20.60	3.40	0.60	16.10	37.80	34.83	Resalto hidráulico
1	2	400	13.42	20.60	3.35	1.10	18.65	48.40	25.30	Resalto hidráulico
2	2	400	13.42	20.60	3.25	1.40	18.90	32.10	38.07	Resalto hidráulico
3	2	400	13.42	20.60	3.30				4.63	Formación Hoyas
3	2	400	13.42	20.60	3.30	1.10	19.70	45.70	35.37	Resalto provocado
1	3	400	13.42	20.60	3.20	1.00	21.10	21.50	25.47	Resalto hidráulico

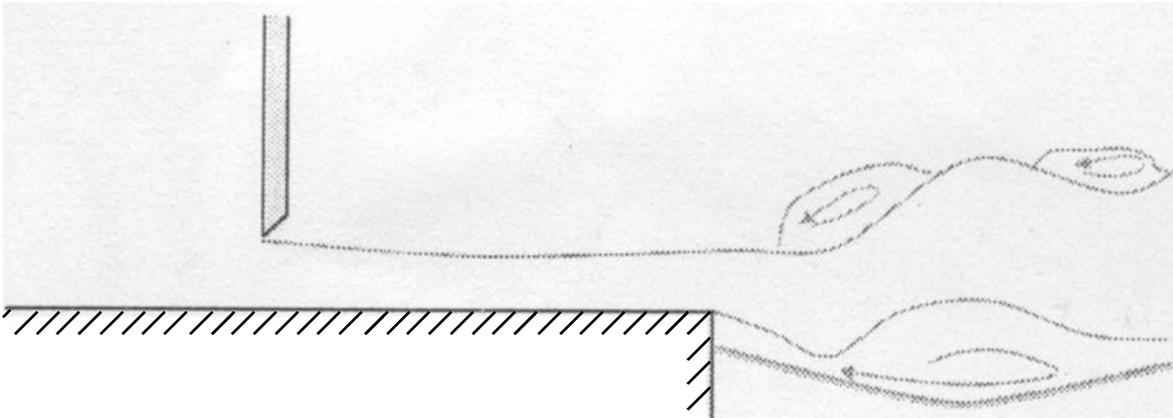


Continuación Tabla 4.1 Resultados de la Experimentación

VARIABLES DE DISEÑO					RESULTADOS					OBSERVACIONES
P	z	Q _p (m ³ /s)	Q _m (L/s)	H _m (cm)	a _m (cm)	y1 (cm)	y2 (cm)	Lr (cm)	Vf1 _m (cm/s)	
2	3	400	13.42	20.60	3.30	1.30	21.40	22.00	27.50	Resalto hidráulico
3	3	400	13.42	20.60	3.20				14.30	Formación Hoyas
1	1	600	20.12	20.60	5.20	3.20	19.90	65.60	56.43	Resalto hidráulico
2	1	600	20.12	20.60	5.20	3.50	19.10	60.80	52.67	Resalto hidráulico
3	1	600	20.12	20.60	5.75	0.70	18.35	45.70	59.00	Resalto hidráulico
1	2	600	20.12	20.60	5.40	0.70	21.90	54.50	47.93	Resalto hidráulico
1	2	600	20.12	20.60	5.40				52.50	Formación Hoyas
2	2	600	20.12	20.60	5.20				32.00	Formación Hoyas
3	2	600	20.12	20.60	5.80				-8.00	Formación Hoyas
1	3	600	20.12	20.60	4.45				30.10	Formación Hoyas
1	3	600	20.12	20.60	4.45	1.30	22.50	24.00	20.07	Resalto provocado
2	3	600	20.12	20.60	4.85				12.93	Formación Hoyas
2	3	600	20.12	20.60	4.85	1.60	23.10	31.50	37.67	Resalto hidráulico
1	1	700	23.48	20.65	6.60	4.10	21.00	69.20	53.30	Resalto hidráulico
2	1	700	23.48	20.60	6.60	3.70	21.05	57.40	56.07	Resalto hidráulico
3	1	700	23.48	20.60	7.05					Formación Hoyas
3	1	700	23.48	20.60	7.05	2.25	19.50	52.00	14.20	Resalto provocado
1	2	700	23.48	20.60	6.60	2.00	22.60	61.60	51.33	Resalto hidráulico
2	2	700	23.48	20.60	6.60				37.93	Formación Hoyas
3	2	700	23.48	20.60	6.90				8.17	Formación Hoyas
1	3	700	23.48	20.60	5.80				26.57	Formación Hoyas
1	3	700	23.48	20.60	5.80	1.50	23.70	49.00	34.33	Resalto provocado
2	3	700	23.48	20.60	5.60				29.27	Formación Hoyas
2	3	700	23.48	20.60	5.60	1.80	23.50	34.90	44.53	Resalto provocado

En muchos de los ensayos realizados, ocurrió un fenómeno no común en el cuenco disipador aguas abajo de la compuerta; se produjo una lámina ondulada negativa no es estable que se transformaba regularmente en una lámina sumergida, a éste fenómeno lo relacionamos con uno que ocurre en la socavación de lechos de ríos aguas abajo de una estructura de zampeado, conocido como formación hoyas de chorro ondulatorio negativo, y se lo puede observar en la figura 4.1.

Figura 4.1 Formación de hoyas



4.2 Análisis de resultados

Los resultados fueron sometidos a un análisis a fin de identificar el comportamiento de las variables, basándose en la conceptualización teórica, y los efectos que éstos resultados tendrán sobre el prototipo.

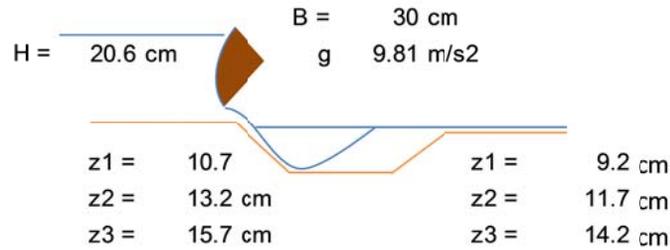
En primer lugar se realizó un cálculo teórico de las variables dependientes con la intención de poder comparar los cálculos con los resultados de las mediciones realizadas durante la experimentación; luego se analizaron estadísticamente las muestras con la finalidad de estudiar el comportamiento de las variables y de ello obtener información que nos permita sacar conclusiones que apunten hacia la definición de modificaciones de las condiciones planteadas en el prototipo o a la predicción del comportamiento del mismo en las situaciones reales planteadas. Para ello se realizaron pruebas de normalidad, de homogeneidad, y los análisis de variación de la media de un factor y comparaciones múltiples de medias pareadas.

4.2.1 Comportamiento teórico de las variables

Con la finalidad de contar con un punto de comparación para los resultados de las variables de la experimentación, se procedió a realizar un cálculo teórico de éstas variables partiendo del dato de medición de abertura de la compuerta y de la altura del calado de agua, aguas arriba de compuerta H ; se emplearon las ecuaciones 2.24, 2.28 y 2.30; así como la ecuación de la energía; los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.2. Partimos del dato de medición de la abertura de la compuerta, en vista que éste dato puede ser comparado con el teórico obtenido de la curva de calibración en el apartado 3.2.3 y además con éste dato comparamos la descarga que está fluyendo en la experimentación a través de la compuerta.



Tabla 4.2 Cálculos teóricos de variables dependientes



$$Q = C B a \sqrt{2gH}$$

$$y_0 = Cc \times a$$

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)$$

$$H = z + y + \frac{V^2}{2g}$$

$$\frac{L}{y_1} = \left[3 \left(\sqrt{8F_1^2 + 1} - 3 \right) + \frac{1}{20} \left(81 \sqrt{8F_1^2 + 1} - 2F_1^2 - 241 \right) \right] / 2$$

P	z	z (cm)	am (cm)	Cc	Qm (L/s)	Qm (L/s)	y0 (cm)	F0	y1 (cm)	V1 (cm/s)	H1 (cm)	F1	y2 (cm)	Lr (cm)
1	1	10.7	3.25	0.70	13.72	13.42	2.28	4.26	1.83	249.56	33.58	5.89	14.37	85.27
2	1	10.7	3.20	0.70	13.51	13.42	2.24	4.29	1.80	249.53	33.54	5.93	14.26	84.73
3	1	10.7	3.40	0.70	14.35	13.42	2.38	4.16	1.92	249.64	33.68	5.76	14.68	86.87
1	2	13.2	3.35	0.70	14.14	13.42	2.35	4.19	1.82	259.53	36.15	6.15	14.91	88.98
2	2	13.2	3.25	0.70	13.72	13.42	2.28	4.26	1.76	259.46	36.07	6.24	14.70	87.85
3	2	13.2	3.30	0.70	13.93	13.42	2.31	4.22	1.79	259.50	36.11	6.19	14.81	88.42
1	3	15.7	3.20	0.70	13.51	13.42	2.24	4.29	1.67	268.94	38.54	6.64	14.90	89.63
2	3	15.7	3.30	0.70	13.93	13.42	2.31	4.22	1.73	269.01	38.61	6.54	15.12	90.82
3	3	15.7	3.20	0.70	13.51	13.42	2.24	4.29	1.67	268.94	38.54	6.64	14.90	89.63
1	1	10.7	5.20	0.65	20.29	20.12	3.36	3.50	2.70	250.42	34.66	4.87	17.28	99.73
2	1	10.7	5.20	0.65	20.29	20.12	3.36	3.50	2.70	250.42	34.66	4.87	17.28	99.73
3	1	10.7	5.75	0.65	22.44	20.12	3.72	3.33	2.98	250.71	35.02	4.63	18.12	103.64
1	2	13.2	5.40	0.65	21.07	20.12	3.49	3.43	2.70	260.54	37.29	5.07	18.01	104.67
2	2	13.2	5.20	0.65	20.29	20.12	3.36	3.50	2.60	260.42	37.16	5.16	17.70	103.12
3	2	13.2	5.80	0.65	22.63	20.12	3.75	3.31	2.89	260.77	37.55	4.89	18.63	107.64
1	3	15.7	4.45	0.65	17.36	20.12	2.88	3.78	2.15	269.55	39.18	5.87	16.79	99.66
2	3	15.7	4.85	0.65	18.93	20.12	3.14	3.62	2.34	269.80	39.44	5.63	17.50	103.27
1	1	10.7	6.60	0.62	24.56	23.48	4.07	3.18	3.26	251.00	35.37	4.44	18.90	107.22
2	1	10.7	6.60	0.62	24.56	23.48	4.07	3.18	3.26	251.00	35.37	4.44	18.90	107.22
3	1	10.7	7.05	0.62	26.23	23.48	4.35	3.08	3.48	251.23	35.65	4.30	19.49	109.86
1	2	13.2	6.60	0.62	24.56	23.48	4.07	3.18	3.14	261.06	37.87	4.71	19.37	111.10
2	2	13.2	6.60	0.62	24.56	23.48	4.07	3.18	3.14	261.06	37.87	4.71	19.37	111.10
3	2	13.2	6.90	0.62	25.68	23.48	4.26	3.11	3.28	261.23	38.06	4.61	19.77	113.00
1	3	15.7	5.80	0.62	21.58	23.48	3.58	3.39	2.66	270.22	39.88	5.29	18.62	108.92
2	3	15.7	5.60	0.62	20.84	23.48	3.46	3.45	2.57	270.10	39.76	5.38	18.31	107.39

4.2.1.1 Análisis de la normalidad de la muestra

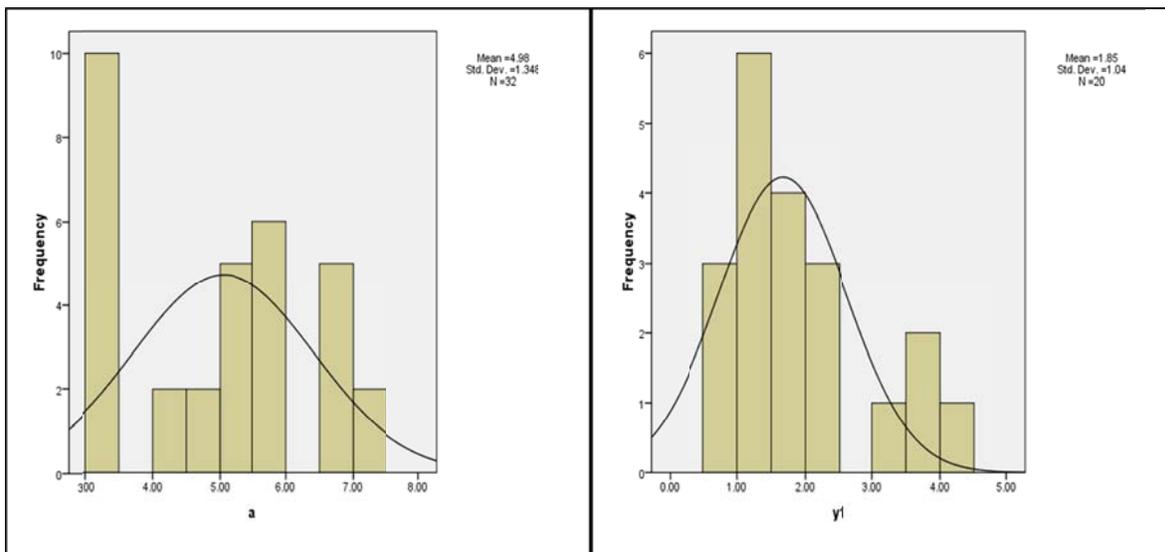
Es importante tener claro las características de la variable a ser analizada, para ello realizamos una gráfica de frecuencias donde observaremos cualitativamente si las muestras presentan normalidad y homogeneidad. En la figura 4.2 presentamos la gráfica de frecuencias de todas las variables dependientes medidas (a , y_1 , y_2 , L_r , Vf_1) para todos los tratamientos (q , P , z) que se le dio a cada una.

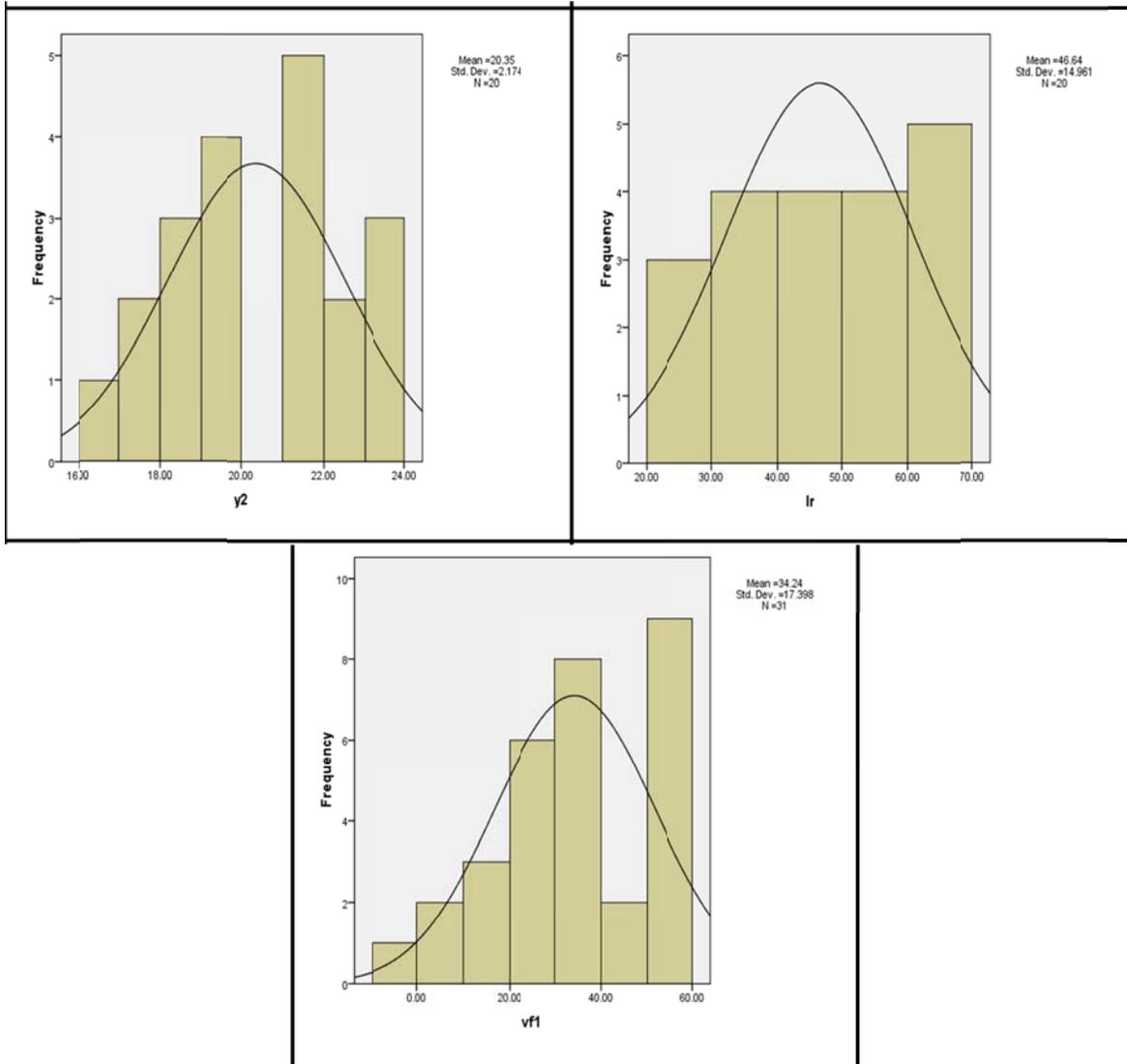
El número de observaciones difiere entre una variable y otra, teniendo una población de 32 datos para la variable a , de 31 datos para Vf_1 y de 20 datos para las variables del resalto hidráulico (Longitud y aturas conjugadas). Esto se debe al fenómeno mencionado de formación de hoyas, donde no se forma resalto hidráulico, pero si se puede realizar la medición de las variables a y Vf_1 .

Además se puede observar en la gráfica de frecuencias de la variable Vf_1 que existe un intervalo de clase menor a cero; esto también es producto del fenómeno de formación de una hoya de chorro ondulatorio negativo, como se describió en la figura 4.1, donde la lámina inferior forma un remolino con dirección a aguas arriba, y por lo tanto la velocidad es negativa.

De la figura 4.2 podemos observar que las frecuencias para todas las variables se aproximan a una distribución normal. Debido al limitado número de muestras no se puede concluir que las variables presentan ésta distribución; sin embargo, asumiremos normalidad en las muestras y lo demostraremos posteriormente con el análisis de varianzas ANOVA.

Figura 4.1 Histogramas de variables dependientes con curva normal





4.2.1.2 Análisis de variables dependientes

Realizamos un análisis exploratorio del comportamiento de las variables dependientes, en función de un factor; esto se lo hizo mediante los diagramas de caja, y mediante un análisis de varianza de las medias, conocido como ANOVA (Analysis of Variance); con la finalidad de conocer con más detalle los resultados que nos presenta el ANOVA realizamos una análisis de comparaciones múltiples entre pares de medias POST HOC, aplicando la prueba de Tukey. El nivel de significancia que asumiremos en los análisis de varianza es de 0.05; además a continuación se presentan tres valores críticos de F que se utilizaron en las tablas de ANOVA, obtenidos de (Spiegel, 1998), que son una herramienta para aceptar o rechazar la hipótesis nula H_0 de igualdad de medias.



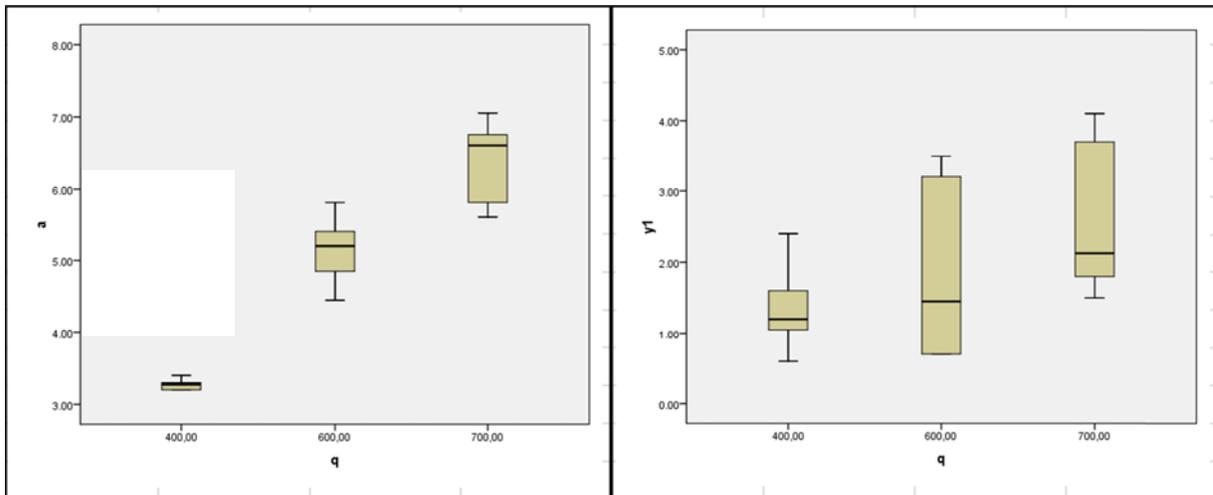
$V_2 \backslash V_1$	2
17	3.59
28	3.34
29	3.33

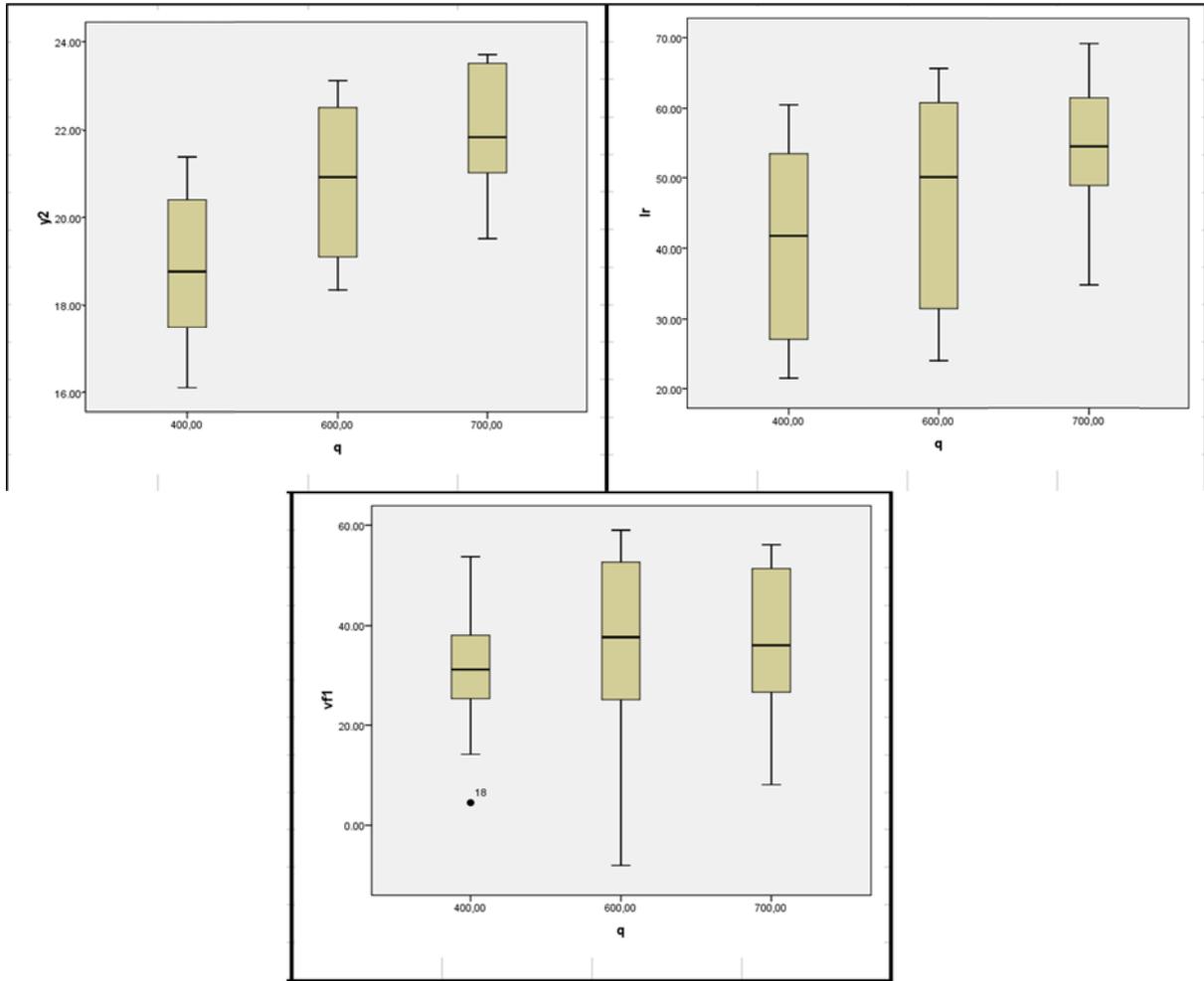
Procederemos a realizar los análisis mencionados para las variables dependientes, divididas en función de cada uno de los factores de estudio: caudal (Q), posición de la compuerta (P) y profundización del cuenco (z).

4.2.1.2.1 Análisis de variables dependientes en función del caudal (Q).

Este análisis se basa en la observación del comportamiento de las variables que nos indican los diagramas de caja presentados en la figura 4.6 y el análisis de hipótesis nula de igualdad de medias presentado en el anexo 3 y fundamentado con múltiples comparaciones entre pares de medias. El nivel de significancia asumido para los análisis es de 0.05. A continuación iremos analizando variable por variable:

Figura 4.3 Diagramas de caja de V. Dependientes en función de Q





Abertura de la compuerta, a: Observamos en el ANOVA que el estadístico F presenta un valor de 137 que es muy superior al valor crítico de 3.59, y el nivel de significancia es de 0.000. Lo cual nos dice que podemos rechazar con certeza la hipótesis nula de igualdad de medias. Esta diferencia significativa entre las medias de la abertura de la compuerta, ocurre entre todos los diferentes tratamientos de caudal analizados; como lo podemos observar en la prueba Tukey HSD, en el Anexo 3 y en los diagramas de caja en la figura 4.3; donde se observa que las medianas van aumentando en función del parámetro de caudal. Esto último, hidráulicamente es correcto, ya que para mantener las condiciones de diseño, que piden que el calado aguas arriba de la compuerta se constante en 20.6 cm, se necesita que la abertura aumente según aumenta el caudal. Observamos que para todos los caudales el intervalo de confianza de los datos ensayados oscila alrededor de los datos teóricos de la abertura de la compuerta. Presentando variaciones mayores para caudales de 20.12 L/s (600 m³/s) y 23.48 L/s (700 m³/s).

En cuanto a la *altura inicial de agua del resalto hidráulico y1*, el ANOVA nos presenta un estadístico F menor que el valor crítico con un nivel de significancia ligeramente superior a 0.05. Esto nos dice que las medias presentan cierta similitud pero no se puede concluir tal afirmación. Según lo que observamos en el



diagrama de caja y en la prueba Tukey; decimos que y_1 es significativamente igual entre los caudales (m^3/s) de: 400 y 700, 600 y 700. El comportamiento de y_1 para los caudales de 400 y 700, mantiene similitud pero no es significativa. Los datos oscilan en variaciones amplias, aunque en cierto grado difieren de los valores teóricos exactos; sin embargo mantienen el mismo comportamiento que el teórico de aumentar su magnitud con el aumento del caudal.

Al observar el ANOVA (anexo 3) para la *altura conjugada del resalto hidráulico* y_2 , vemos que el estadístico $F = 5.03 > 3.33$, ligeramente superior al valor crítico; y según el nivel de significación que nos presenta el estadístico $F (0.019)$ podemos nos da una pauta permite rechazar la hipótesis nula de igualdad de las medias. Decisión que no la podemos asegurar sin previo realizar un análisis de múltiples comparaciones entre pares de medias, donde observamos que únicamente existe diferencia de las medias de las alturas conjugadas entre los caudales de 400 y 700 m^3/s . Para el caudal 600 m^3/s las alturas del resalto hidráulico mantienen una cierta similitud con las del caudal de 400 m^3/s y una similitud significativa con las del caudal 700 m^3/s . La lógica de este análisis lo podemos aclarar observando los diagramas de caja en la figura 4.3 y los datos teóricos en la tabla 4.2 donde podemos observar que el rango de valores tanto muestreado como teórico no es amplio, existiendo una diferencia de alrededor de 5 cm aproximadamente entre el menor y el mayor valor. Aunque los valores teóricos difieren de los ensayados, podemos observar que mantienen el mismo comportamiento.

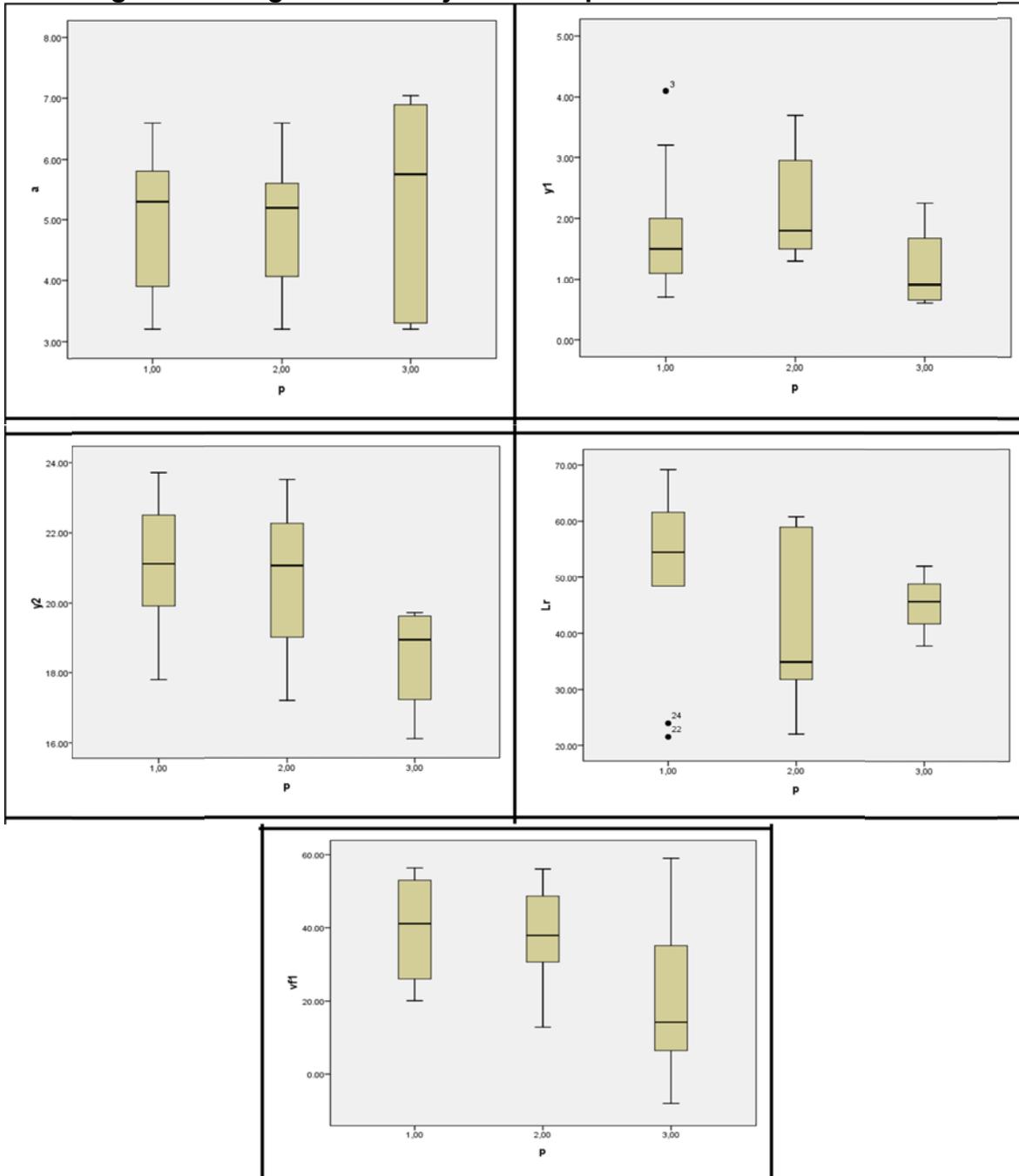
En cuanto a la *longitud del resalto* L_r , tanto el ANOVA como la prueba de Tukey entre pares de medias, nos dicen que las muestras son significativamente iguales para los diferentes caudales ensayos. Presentando una mayor similitud entre los caudales de 400 y 600, 600 y 700 m^3/s . Además podemos observar en los diagramas de caja de la figura 4.3, que la longitud de resalto correspondiente a los caudales de 400 y 600 m^3/s presenta una gran variabilidad. Los resultados de esta variable ensayados difieren en magnitud con los resultados teóricos calculados con la ecuación de diseño 2.28. Aplicando la ecuación 2.27 podemos obtenemos que las siguientes eficiencias promedio de los resaltos hidráulicos con respecto a los caudales:

$Q_m(L/s)$	$Q_p(m^3/s)$	η
13.42	400	57%
20.12	600	49%
23.48	700	47%

En cuanto a las velocidades al final del cuenco disipador Vf_1 , presentan un nivel de significancia que permite afirmar que las muestras son similares; esto lo podemos comprobar en el diagrama de caja, pero hidráulicamente no lo podemos confirmar, puede deberse a la eficiencia del cuenco disipador.

4.2.1.2.2 En función de la posición de la compuerta (P)

Figura 4.7 Diagramas de caja de V. Dependientes en función de P



Para este caso, los resultados de la gráfica de diagramas de caja nos da una idea de homogeneidad en casi todas las muestras ensayadas; analizando con más detalle en el ANOVA en el anexo 3; observamos que las variables a, y1, y2 y Lr



presentan un valor del estadístico inferior a sus respectivos valores críticos, ésta nos dice que las muestras podríamos tener una homogeneidad de medias, sin embargo el nivel de significancia es mayor a 0.05 para todas estas variables. Lo quiere decir que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los promedios. Por lo que una conclusión para su comportamiento se deja para realizarlo en términos del funcionamiento hidráulico.

En cuanto a la variable Vf1, los análisis estadísticos nos dicen que las velocidades para la posición 3 difieren significativamente de la posición 1; y con la posición 2 está en el límite para aceptar una diferencia entre sus valores. En cuanto a las velocidades entre la posición 1 y 2 son significativamente similares.

Comparando las mediciones de las aberturas de las compuertas ensayadas con los valores obtenidos mediante la curva de calibración de diseño; observamos que se ajusta correctamente para el caudal de 400 m³/s en las tres diferentes posiciones; y para los caudales de 600 y 700 m³/s en las posiciones 1 y 2. Las aberturas para las mismas condiciones de caudal y profundidad para las posiciones 1 y 2 son prácticamente iguales; la posición 3 presenta una diferencia con respecto a los valores en la abertura de las otras dos posiciones para los caudales mayores.

Las muestras presentan una gran variabilidad; sin embargo, es importante observar el comportamiento del resalto hidráulico para las tres diferentes posiciones, donde la posición 2 presenta las menores longitudes.

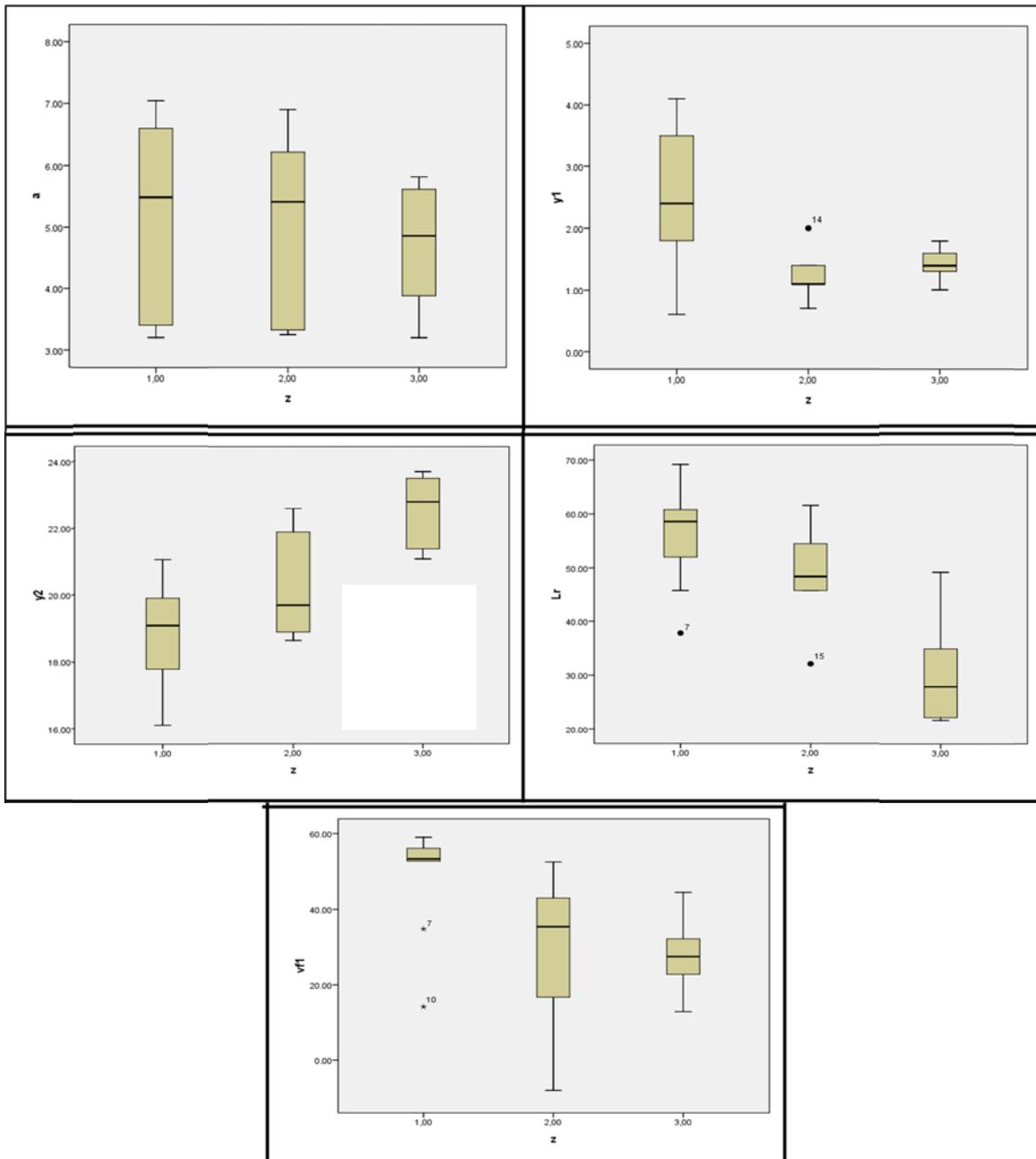
Además enfocándonos en la eficiencia del resalto hidráulico mediante la ecuación 2.27 obtenemos las siguientes eficiencias promedio con respecto a la posición de la compuerta (P):

P	η
1	52%
2	53%
3	48%

Donde observamos que la mayor disipación de energía en el resalto se da cuando P = 1 y 2.

4.2.1.2.3 En función de la profundización del cuenco disipador (z)

Figura 4.8 Diagramas de caja de V . Dependientes en función de z



Las variables dependientes mantienen entre ellas diferentes comportamientos con respecto a la profundización del cuenco disipador de energía; realizaremos un análisis independiente para cada variable.

Las medias de la *apertura de la compuerta* a , para las tres diferentes profundizaciones del cuenco disipador presentan un estadístico $F = 0.66 \ll 3.33$,



y el nivel de significancia es elevado Sig. = 0.523; lo que quiere decir que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los promedios.

Para la altura y_1 del resalto los diagramas de caja nos dan una idea de que podría existir una diferencia significativa entre las medias, el ANOVA (anexo 2) confirma ésta idea pero sin embargo nos dice que no podemos rechazar la hipótesis nula de igual de medias, ya que su nivel de significancia está en el límite, por lo que podríamos cometer un error de decisión. Adicional a ello los cálculos teóricos nos presentan que la magnitud de la altura inicial del resalto hidráulico para un mismo caudal y posición, disminuye según aumenta la profundización del cuenco. Esta lógica se cumple entre $z = 1$ y 2 ; sin embargo $z = 3$ no continua esta distribución. Esto lo confirmamos los niveles de significancia de diferencias entre pares de medias de Tukey en el anexo 2.

La altura conjugada del resalto hidráulico y_2 , según los diagramas de caja podríamos decir que la hipótesis nula de igualdad de medias debería ser rechazada. Esto lo confirma el ANOVA, y realizamos un análisis de Tukey para ver entre que pares de medias la diferencia es significativa, obteniendo esto entre $z = 1$ y 3 . Además al comparar con los resultados calculados, podemos ver que las muestras ensayadas mantienen el mismo comportamiento de los resultados teóricos presentados en la tabla 4.3.

La longitud del resalto hidráulico altura conjugada del resalto hidráulico y_2 , según los diagramas de caja podríamos decir que la hipótesis nula de igualdad de medias debería ser rechazada. En el ANOVA (anexo 2) confirmamos el rechazo de la hipótesis nula. De la prueba de Tukey observamos que los pares medias que difirieron significativamente entre ellos, son entre $z = 1$ y 3 ; 2 y 3 . Al igual que en los anteriores análisis, calcularemos la eficiencia del resalto hidráulico mediante la ecuación 2.27, donde se obtuvieron las siguientes eficiencias promedio en función del factor profundidad del cuenco disipador (z):

z	z_m (cm)	η
1	10.7	49%
2	13.2	54%
3	15.7	55%

Donde podemos observar que la mayor eficiencia se presenta en $z = 2$ y 3 .

Las velocidades al final del cuenco disipador de energía, partiendo de los análisis ANOVA y Tukey, podemos decir que las diferencias de las medias entre $z = 1$ y 2 ; 1 y 3 ; son estadísticamente significativas. Sin embargo aquí cabe mencionar un problema que se hace notorio, al analizar las variables dependientes en función de la profundización del cuenco disipador de energía; que es la formación de hoyas. En la tabla 4.3 presentamos para qué combinación de tratamientos de posición de la compuerta (P), profundización del cuenco disipador (z) y caudal (Q), se dio éste fenómeno. Donde podemos observar que cuando $z = 1$, se produce sólo una hoyo



en todo el conjunto de ensayos, esto ocurre en $P = 3$ y $Q = 700$. Mientras que para $z = 2$ y $z = 3$ se produce en muchos casos. Por lo que, para lo que corresponde a V_{f1} , el rango de valores para $z = 2$ y 3 ; es mayor que para $z = 1$; tomando velocidades bajas y hasta negativas que se deben a éste fenómeno.

Tabla 4.3 Variables en las que se forman hoyas

z	P	Q (m ³ /s)
1	3	700
2	2	600
		700
	3	400
		600
		700
3	1	600
		700
	2	600
		700
	3*	400

* No se ensayó para los caudales de 600 y 700 m³/s en esta posición, dado que la capacidad del canal no lo permitió; pero dada la tendencia se asume la formación de hoyas en estos caudales.



CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

1. Las presiones medidas con los piezómetros en el talud de ingreso al cuenco dissipador fueron todas positivas, por lo que no se cumplió la hipótesis de que la lámina de agua se pegaba al talud de ingreso.
2. Para los ensayos realizados, donde la compuerta nunca trabajó sumergida debido a la cercanía del cuenco dissipador de energía; la abertura de la compuerta (a) depende sólo y únicamente del caudal, y es independiente de la profundización del cuenco y de la posición de la compuerta.
3. La altura contraída del resalto hidráulico (y_1) presenta una gran variabilidad en cuanto a las observaciones con respecto a los tres factores (Q , P , z) ensayados; sin presentar un patrón definido de comportamiento. Esto se debe a la dificultad que presenta en identificar la magnitud exacta de este fenómeno durante la experimentación debido a la gran turbulencia que existe. Por lo que, las variables del resalto hidráulico que emplearemos para poder emitir conclusiones y/o recomendaciones son la altura conjugada (y_2), la longitud del resalto (l_r) y la eficiencia de resalto (η).
4. La altura conjugada del resalto hidráulico (y_2) está en función del caudal (Q) y de la profundización del cuenco dissipador (z); aumentando su magnitud según aumentan éstos factores. Esta variable afecta en la velocidad de reingreso del flujo al cuenco dissipador, la cual obtenida mediante cálculo se mantiene alrededor de 3 m/s; para dichos factores. Analizando ésta velocidad en función de la posición de la compuerta (P) vemos que se mantiene en este valor para $P = 1$ y 2 , y aumenta en pequeña magnitud cuando $P = 3$.
5. La longitud del resalto varía principalmente en función del caudal y de la profundización del cuenco dissipador. Con respecto a la posición de la compuerta las medias de las observaciones no presentan diferencias significativas. Sin embargo, enfocándonos en las magnitudes de las longitudes de resalto hidráulico y en la eficiencia del mismo en función de los tres factores estudiados (Q , P , z). Concluimos que a menor longitud de resalto mayor eficiencia se presenta en cuanto a la disipación de la energía.
6. Con fines del diseño del prototipo, se tiene que la mayor eficiencia del resalto se da en los casos $P = 1$ y 2 ; y , $z = 2$ y 3 . Siendo éstos, casos independientes para las todas las posibles variables. Se presentan dos situaciones óptimas tanto en función de P como de z , ya que la diferencia entre sus eficiencias respectivamente es de 1%.
7. En un promedio aproximado el cuenco dissipador disipa un 50% de la energía, por lo que existe aún un remanente importante de energía; para lo cual se recomienda incluir en el diseño del prototipo una estructura que permita una disipación adicional de energía, esta estructura es conocida como Rizberma y debe ser definida; esto evitará los efectos de socavación.



8. La profundización del cuenco disipador donde se presentaron los mejores resultados fueron en $z = 2$ y 3 ; sin embargo en éstos casos fueron donde se produjeron la mayor cantidad de hoyas. La formación de hoyas se puede controlar dando un tratamiento en el talud de ingreso al cuenco disipador, observando que éste ingreso inclinado con cambios de sección vertical bruscos afectan la formación del resalto, aumentando el número de casos en los que se producen hoyas según se aumenta la profundidad del cuenco. Por lo que se recomienda ajustar la forma geométrica del talud de ingreso a la forma del perfil de descarga del chorro.
9. Se ha observado que las posiciones 1 y 2 de la compuerta, presentan los resultados más favorables del comportamiento de las variables asociadas al control de flujo en modelo físico para los caudales de diseño y las diferentes profundizaciones en la estructura de compuerta de la derivadora Cañar. Sin embargo, las condiciones operables de la compuerta en la posición 2 son poco factibles en prototipo, dado que el borde inferior de la compuerta se asienta en el talud de ingreso al cuenco disipador, que es inclinado, esto representaría un problema al momento de abrir la compuerta pudiendo trabarse entre algún objeto y el talud. Por ello se recomienda que el borde inferior esté asentado en una superficie plana, lo cual ocurre en $P = 1$.
10. La curva de calibración de descarga de la compuerta, realizado mediante el método recomendado por el ingeniero de diseño, funcionó correctamente para los distintos caudales ensayados, obteniendo en promedio las aberturas ensayadas muy similares a las calculadas, mediante la curva de calibración.
11. Se realizaron ensayos adicionales para un caudal constante de $Q_p = 400 \text{ m}^3/\text{s}$, ($Q_m = 13.42 \text{ L/s}$) y a aberturas constantes de la compuerta $a_p = 0.5$ y 0.6 m ($a_m = 2.5$ y 3 cm); de donde observamos que la carga de agua en la compuerta puede llegar hasta 30 cm en el modelo ($H_p = 6.00 \text{ m}$).



BIBLIOGRAFÍA

- Armfield Limited. (1985). S Series: Applied hydraulics & hydrology. *Irrigation Water Management*. Ringwood, Hampshire, England.
- Cadavid, J. H. (2006). *Hidráulica de Canales. Fundamentos*. Medellín, Colombia: Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Chanson, H. (2002). *Hidráulica del flujo en canales abiertos*. (J. G. Saldarriaga, Trad.) Bogotá, Colombia: McGRAW-HILL INTERAMERICANA.
- Chow, V. T. (1982). *Hidráulica de los canales abiertos*. (J. Saldarriaga, Trad.) México D.F.: McGRAW-HILL.
- Delgado de la Torre, R. (2004). *Iniciación a la probabilidad y estadística* (Primera ed.). Barcelona, España: Universidad Autónoma de Barcelona.
- Equipo Consultor. (2011). *Prediseño de Obras Civiles, Ingeniería Hidráulica. Estudio para el control de inundaciones de los ríos Bulubulu - Cañar - Naranjal. Informe de Fase 2. Estudios de factibilidad*. Cuenca.
- French, R. (1988). *Hidráulica de Canales Abiertos*. México D.F., México: McGraw-Hill.
- Guisande González, C., Barreiro Felpeto, A., Maneiro Estraviz, I., Rivero Alarcón, I., Vergara Castaño, A. R., & Vaamonde Liste, A. (2006). *Tratamiento de Datos*. España: Díaz de Santos.
- Hydraulic Engineering Circular N° 14 (2006). *Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels*. Federal Highway Institute, U.S. Department of Transportation.
- Novak, P., Moffat, A., & Nalluri, C. (2001). *Estructuras Hidráulicas* (Segunda ed.). (G. R. Santos Granados, Trad.) Bogotá, Colombia: McGRAW-HILL INTERAMERICANA.
- PROMAS. (2011). *Informe de Avance de Estudios Hidrológicos, Climáticos y Modelos Hidráulicos; en el marco del "Proyecto de Control de Inundaciones de los Ríos Bulubulu - Cañar - Naranjal"*. Cuenca.
- PROMAS. (2011). *Informe de Avance de Estudios Hidrológicos, Climáticos y Modelos Hidráulicos; en el marco del "Proyecto de Control de Inundaciones*



de los Ríos Bulubulu - Cañar - Naranjal". Cuenca, Ecuador.

Schröder, R., & Press, H. (1966). *Hydromechanik im Wasserbau*. Alemania: Ernst in Berlin, München.

SonTek. (2006). *Flow Tracker Users Manual*. San Diego, CA, U.S.

Sotelo, G. (2002). *Hidráulica de Canales*. México D.F., México: UNAM Facultad de Ingeniería.

Spiegel, M. (1998). *Estadística* (Segunda ed.). (R. Hernández , Trad.) Colombia: McGRAW-HILL INTERAMERICANA DE ESPAÑA.

Streeter, V., Wylie, B., & Bedford, K. (2000). *Mecánica de Fluidos* (Novena ed.). Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.

U.S. Army Corps of Engineers. (2000). *Design of Spillway Tainter Gates. Engineering and Design*.

Visauta, B. (2007). *Análisis Estadístico con SPSS 14* (Tercera ed.). Madrid, España: McGraw-Hill Interamericana de España.

Wahl, T., & Clemmens, A. J. (2005). *Applying the Energy-Momentum Method to Radial Gate Discharge Calibration*. *World Water & Environmental Resources Congress*. World Water & Environmental Resources Congress, Anchorage , AK. Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers.

Walpole, R., Myers, R., & Myers, S. (1999). *Probabilidad y estadística para Ingenieros* (Sexta ed.). México: PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA. S.A.



ANEXOS

ANEXO 1

EQUIPOS Y LABORATORIO

A.1.1	CANAL:	68
A.1.2	INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.....	71
A.1.2.1	Limnímetros de punta y carro base.....	71
A.1.2.2	FLOW TRACKER:	72
A.1.2.3	Presión.....	74



EQUIPOS Y LABORATORIO

A.1.1 CANAL:

- Marca: ARMFIELD
- Modelo: S6 Tilting Flume
- Dimensiones:
 - Ancho: 0,3 m
 - Profundidad: 0,45 m
 - Longitud: 12,5 m
- Estructura de soporte: Celosía de acero laminado.
- Fondo de canal: Acero laminado.
- Paredes laterales de vidrio templado.
- Pendiente: Máxima positiva: 1/40. Máxima negativa: 1/200.
- Accesorios:
 - Compuerta a la salida una compuerta para regular el nivel según se requiera.
 - Rieles de aluminio en la parte superior para el desplazamiento de las sondas para la medición de los calados.
 - Regleta en escala métrica, colocada en toda la longitud horizontal del canal.
 - Tanques de ingreso y salida al canal de GFRP, por sus siglas en inglés (Glass-Fiber Reinforced Plastic) o Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio.
 - Cinco tanques de almacenamiento de GFRP.
 - Malla de protección en el tanque de salida, para evitar el paso de basura a la bomba.
 - Malla en la estructura de entrada del canal, para uniformizar el flujo.
 - Bomba: Marca: NECO (Normand Electrical Co. Ltd.) London and Portsmouth. Bomba centrífuga monoblock. Caudal máximo: 23.5 L/s. RPM.- 1750. Ver figura A.1.1.b
 - Simulador de olas.
 - Panel de control, para caudal y olas.



- Descripción
 - La estructura de soporte del canal consiste de una celosía construida en acero laminado y sección hueca. La base del canal también es de acero laminado está asentada sobre la celosía mediante grandes tornillos de elevación ajustables.
 - Este sistema permite que el canal sea adecuadamente y convenientemente alineado después de la instalación.
 - En el fondo del canal, se encuentran alguna tomas para medir la presión.
 - El vidrio templado de los costados laterales del canal está soportado por brazos de acero en voladizo independientemente ajustados, esto permite que se mantenga la correcta geometría de la sección transversal.
 - Para colocar la pendiente del canal, cuenta con un sistema tornillos gemelos sincronizados tipo gatos, con un indicador de la pendiente montado sobre el pórtico fundamental que garantiza la estabilidad. En un pedestal independiente está acomodado el pivote.
 - En tanque de ingreso, presenta una malla, una zona de amortiguamiento y se conecta cuidadosamente con el canal mediante una transición lisa, lo cual garantiza la estabilidad en el flujo, además en el tanque de salida existe una compuerta, que permite mantener el nivel de agua. Para la descarga existe un tubo, alargado que permite la aquietar el flujo descargado en el tanque de almacenamiento.
 - Las paredes laterales de vidrio templado, permiten la clara observación de los fenómenos que ocurren en los fluidos a través del canal.

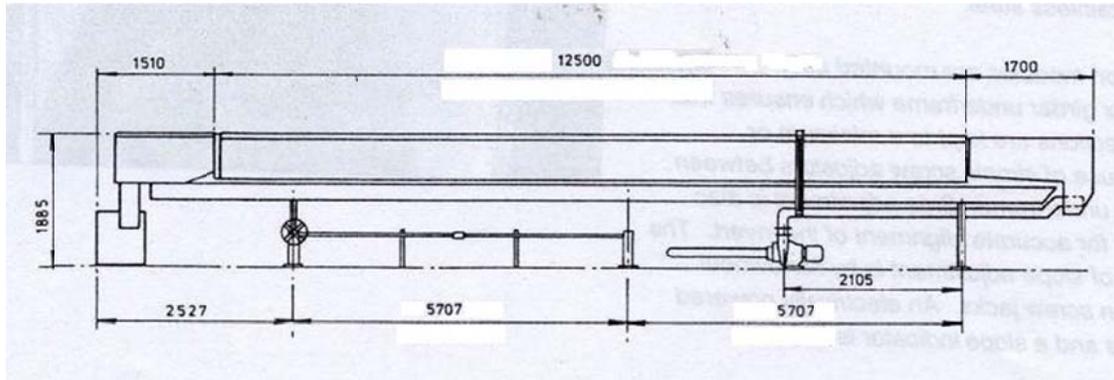
Figura A.1.1 Canal Armfield Tilting Flume S6. Laboratorio de Hidráulica. Universidad de Cuenca. Facultad de Ingeniería



a) Canal Laboratorio de Hidráulica



b) Bomba de canal



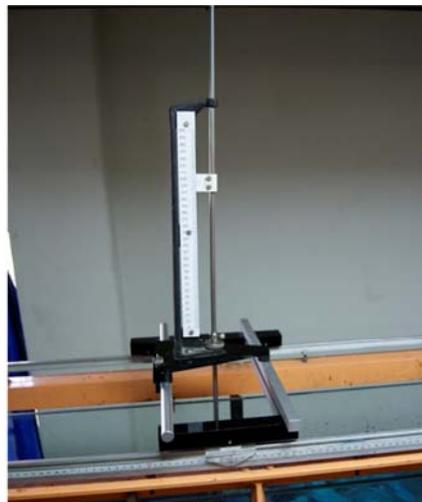
c) Esquema del canal

A.1.2 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

A.1.2.1 Limnímetros de punta y carro base

Estos instrumentos sirven para la medición del calado del fluido, constan de una aguja en la parte inferior, la misma que está sujeta a un bastidor vertical movable; además tiene una regleta vertical en escala milimétrica, 300 mm, una argolla para ajustar el bastidor y un cero movable ajustable para poder realizar las mediciones. Los limnímetros se asientan sobre un carro base, cuyas ruedas encajan en las rieles del canal, el carro base tiene una pieza de plástico transparente que encaja en la regleta, la misma que tiene una línea roja alineada con la aguja del limnómetro, esto permite conocer con exactitud la abscisa donde se mide el calado del fluido. En la figura A.1.2 se puede observar un limnómetro asentado en un carro base, el mismo que se encuentra sobre las rieles del canal.

Figura A.1.2 Limnómetro y carro base





A.1.2.2 FLOW TRACKER:

Marca: SonTek

Descripción

Instrumento empleado para medir la velocidad y el caudal del flujo en el canal del laboratorio; el Flow Tracker posee una tecnología llamada Velocímetro Acústico Doppler (ADV).

Partes:

- Varillas vadeadoras de fijación superior
- Soportes de montaje para el Flow Tracker
- Medidor de Corrientes Bi-Estático Doppler o Probe
- Controlador manual.
- Cable

Figura A.1.3 Flow Traker



PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DEL FLOW TRACKER

Funcionamiento. Efecto Doppler.

El efecto Doppler es la variación de la frecuencia aparente de una vibración cuando la fuente vibrante se desplaza en relación al observador. El ejemplo más común de este efecto es el silbato de un tren; el tono suena más alto cuando el tren se está acercando y más bajo cuando el tren se aleja. El Flow Tracker utiliza el efecto Doppler midiendo el cambio de frecuencia del sonido que es devuelto por las partículas del agua.

Medidor de Corrientes Bi-Estático Doppler

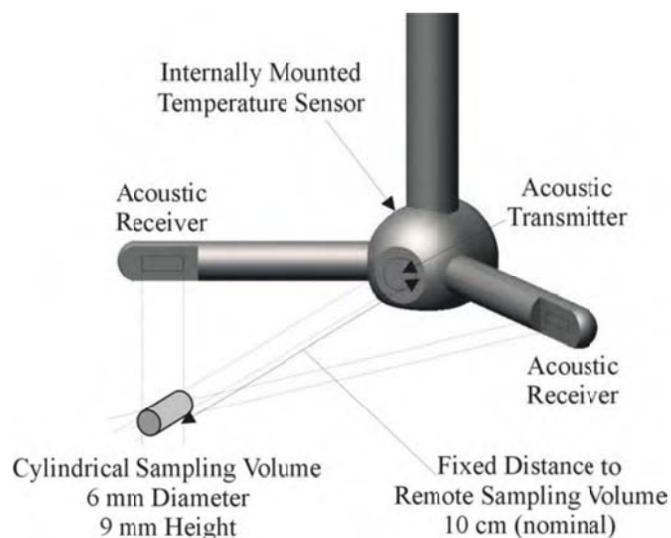
La Figura A.1.4 muestra el sensor del Flow Tracker, un medidor de corrientes bi-estático Doppler.

- Bi-estático significa que se usan transductores acústicos separados para el transmisor y el receptor.
- Los receptores están montados de tal forma que enfocan a una distancia fijada (10 cm.) desde el sensor.
- La intersección de las ondas determina la posición el volumen de muestreo.

El Flow Tracker mide la velocidad de la siguiente manera:

- El transmisor genera un pulso corto de sonido en una frecuencia conocida.
- A medida que el pulso atraviesa el volumen de muestreo, el sonido es reflejado en todas direcciones por las partículas del agua (sedimentos, pequeños organismos, burbujas).
- Los receptores acústicos reciben la señal reflejada.
- El Flow Tracker mide el cambio de frecuencia (efecto Doppler) para cada receptor.

Figura A.1.4 Vista Lateral de la Sensor y Volumen de Muestreo del Flow Tracker





Datos del Flow Tracker

El Flow Tracker proporciona varias ventajas importantes de rendimiento.

- Puede medir velocidades 0.0001 a 4.5 m/s.
- Los datos de velocidad tienen un error relativo del 1% de la velocidad medida en muestras por segundo.
- Los datos de velocidad pueden ser usados inmediatamente sin necesidad de correcciones post-proceso.
- La calibración del Flow Tracker no cambia a no ser que se dañe físicamente el sensor.

A continuación se describe la estrategia básica de muestreo del Flow Tracker.

- Cada segundo se graba una muestra de velocidad.
- Los datos de velocidad se recogen en cada posición de medida durante el tiempo especificado por el usuario. La velocidad en bruto por segundo, la velocidad promedio, y los datos de control de calidad son grabados.
- Para medidas de caudal en ríos, el Flow Tracker combina los datos de velocidad con la posición de la estación, el calado del agua, y otros datos para determinar el caudal total en tiempo real.
- El aforo de la medición de velocidad de punto se puede realizar mediante 5 diferentes métodos: 0.6D, ISO, USGS, Under Ice, Kreps, 5-puntos, y multipunto. Además puede calcular directamente la descarga, mediante el procedimiento basado en las normas ISO y U.S. Geological Survey.

Datos de Control de Calidad. Smart QC.

El Flow Tracker graba datos variados de control de calidad para cada estación de medida para evaluar de forma rápida la calidad de los datos de velocidad.

- Error Estándar de la Velocidad
- Relación Señal - Ruido (SNR)
- Filtrado de Picos
- Ángulo de la Corriente
- Ajuste de Límites

A.1.2.3 Presión

Basándose en la ecuación de la energía, las medidas de presión pueden ser



utilizadas para para determinar velocidades, ésta es la aplicación que se le dará en la experimentación y se la realizará mediante tubos piezométricos.

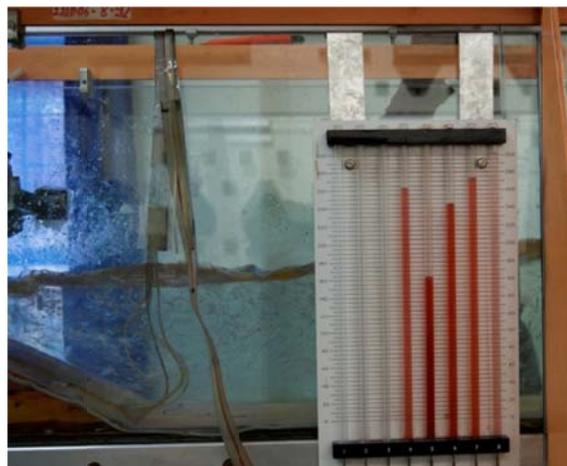
A.1.2.3.1 TUBOS PIEZOMÉTRICOS ESTÁTICOS:

El sistema está compuesto por ocho mangueras de pequeño diámetro, tablero de medición en escala milimétrica con ocho tubos y reductores donde se embonan las mangueras.

Es importante ser riguroso en la colocación de las piezas para garantizar una correcta medición, las mangueras se pegan en el lugar donde se desea medir, en dirección paralela y contraria al flujo aguas arriba de la tabla de medición, estas mangueras deben ser llevadas en ángulo recto hacia la pared lateral del canal y pegarla a la misma; de tal manera que no afecten al flujo; al salir del canal, se embona cada manguera en el reductor y éste último se embona con los tubos estáticos, en el tablero de medición. Es de suma importancia calibrar el tablero de medición, colocándolo a una altura en que sus medidas no sean muy altas ni muy bajas. En la experimentación se utilizaron sólo cuatro de las ochos mangueras. El equipo colocado y realizando una medición durante la experimentación se lo puede observar en la figura A.1.5.

Los datos que se leen son la altura inicial y final en cada tubo estático, cuya diferencia Δh es igual a $\Delta h = \frac{v^2}{2g}$. Es importante tomar con certeza la presión estática (altura inicial) para poder obtener buenos resultados en los datos, para ello se debe esperar hasta que la altura en los tubos se estabilice. Igual es el caso para la altura final, la cual seguramente en muchos casos constantes oscilaciones, en el momento en que el valor máximo y mínimo de lectura se repitan en continuas veces, es el momento en el que se tomarán los datos, anotando las dos lecturas.

Figura A.1.5 Tubos piezométricos estáticos





ANEXO 2

CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA

A.2.1	Distribución Normal	77
A.2.2	Distribución t de Student	78
A.2.3	Distribución F de Fisher-Snedecor	79
A.2.4	Métodos para determinar el tipo de distribución.....	80
A.2.4.1	Test de Kolmogorov-Smirnov	80
A.2.5	Intervalos de Confianza.....	80
A.2.6	Contraste de hipótesis y niveles de significación	81
A.2.6.1	Tipos de hipótesis estadísticas	82
A.2.6.2	Estadístico de contraste	82
A.2.6.3	Tipos de errores.....	82
A.2.7	Contraste de hipótesis en variables cuantitativas	83
A.2.8	Análisis de varianza: Un solo factor	83
A.2.9	Diagramas de caja	86



CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA

En este anexo, daremos una breve descripción de las pruebas o métodos y de las gráficas empleadas en el análisis estadístico realizado en el capítulo 4. La estadística es la ciencia que se ocupa de los métodos y procedimientos científicos para la toma, organización, recopilación, presentación y análisis de datos, siempre y cuando la variabilidad e incertidumbre sea una causa intrínseca de los mismos; así como se ocupa de realizar inferencias a partir de ellos, todo esto con la finalidad de sacar conclusiones para tomar decisiones razonables de acuerdo a tales análisis, y en su caso formular predicciones.

La estadística se clasifica en inferencial y descriptiva. La estadística inferencial efectúa estimaciones, decisiones, predicciones u otras generalizaciones sobre una población, a partir de una muestra representativa de la población y apoyándose en el cálculo de probabilidades. Por otro lado la estadística descriptiva, describe, analiza y representa un grupo de datos utilizando métodos numéricos y gráficos que resumen y presentan la información contenida en ellos; sin sacar conclusiones o inferencias de un grupo mayor.

A.2.1 Distribución Normal

Es una de las distribuciones de probabilidad de variable continua que con más frecuencia aparece en fenómenos reales, dada por la función de densidad con respecto a un determinado parámetro:

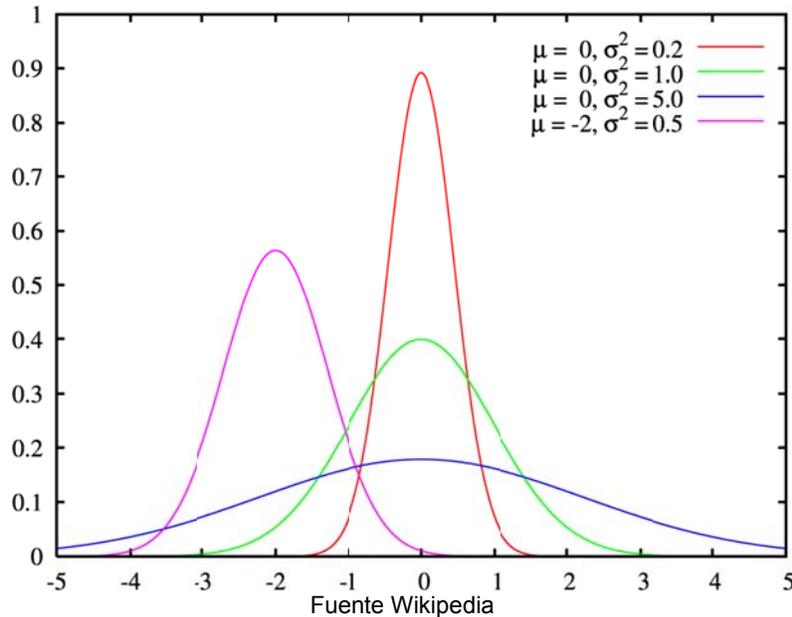
$$f(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(X-\mu)^2/\sigma^2}$$

Donde, $f(x)$ es la densidad de probabilidad del valor X , μ es la media y σ es la desviación típica.

El área total limitada por la curva (Y) y el eje X es igual a 1; de aquí que el área bajo la curva entre dos ordenadas $X = a$ y $X = b$, donde $a < b$, representa la probabilidad de que X se encuentre entre a y b y se denota por $P\{a < X < b\}$.

La forma de la distribución Normal varía en función de la media (μ) y la desviación típica (σ).

Figura A.2.1 Distribuciones normales con diferentes medias y desviaciones típicas



A.2.2 Distribución t de Student

Cuando una variable sigue una distribución Normal, la media de una muestra aleatoria de esa variable también tiene distribución Normal, y su media es la media poblacional desconocida μ . Eso puede ser utilizado para estimar μ ; sin embargo, a menudo no se conoce la desviación típica de la población σ (solo se trabaja con una muestra de individuos del total de la población) y, además, puede ocurrir que el número de observaciones de la muestra es pequeño (menor de 30).

En estos casos, se puede utilizar la cuasi desviación típica de la muestra (s) junto con la distribución t de Student:

$$t = \frac{x - \mu}{s / \sqrt{n}}$$

La función de densidad de probabilidad de la distribución t de Student puede tener diferentes formas dependiendo de los grados de libertad. La apariencia general de la distribución t es similar a la de la distribución Normal estándar. Sin embargo la distribución t tiene colas más amplias que la Normal, es decir, la probabilidad de las colas es mayor que en la distribución Normal. La distribución t se transforma en una distribución Normal cuando el número de datos tiende al infinito.

Las aplicaciones de la distribución t de Student en la inferencia estadística son:



1. Para estimar intervalos de confianza para la media poblacional.
2. Estimar y brindar hipótesis sobre una diferencia de medias.

Las hipótesis para poder aplicar la t de Student son que en cada grupo la variable estudiada siga una distribución Normal y que la dispersión en ambos grupos sea homogénea (hipótesis de homocedasticidad = igualdad de varianzas).

A.2.3 Distribución F de Fisher-Snedecor

Muchas veces se necesita la distribución de muestreo de la diferencia en varianzas ($S_1^2 - S_2^2$). Pero ésta distribución es complicada, por lo que en su lugar usamos el estadístico S_1^2/S_2^2 , ya que un cociente grande o pequeño indicará una gran diferencia, mientras un cociente cercano a 1 indica una pequeña diferencia.

Si tenemos dos muestras, 1 y 2 de tamaños N_1 y N_2 , respectivamente, tomadas de dos poblaciones normales (o casi) con varianzas σ_1^2 y σ_2^2 . Definamos el estadístico:

$$F = \frac{\hat{S}_1^2/\sigma_1^2}{\hat{S}_2^2/\sigma_2^2} = \frac{N_1 S_1^2 / (N_1 - 1) \sigma_1^2}{N_2 S_2^2 / (N_2 - 1) \sigma_2^2}$$

Donde:

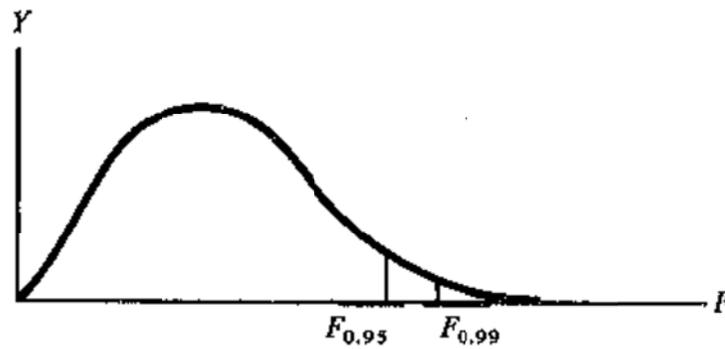
$$\hat{S}_1^2 = \frac{N_1 S_1^2}{N_1 - 1} \quad \hat{S}_2^2 = \frac{N_2 S_2^2}{N_2 - 1}$$

Esta distribución tiene $v_1 = N_1 - 1$ y $v_2 = N_2 - 1$ grados de libertad y esta viene dada por:

$$Y = \frac{CF^{(v_1/2)-1}}{(v_1 F + v_2)^{(v_1+v_2)/2}}$$

Donde C es una constante que depende de v_1 y v_2 tal que el área bajo de la curva es 1. En la figura A.2.4 se presente una curva de la distribución F, cabe tener presente que esta forma puede variar considerablemente según los valores de v_1 y v_2 .

Figura A.2.2 Distribución F



Fuente: (Spiegel, 1998)

A.2.4 Métodos para determinar el tipo de distribución

Para determinar si las variables se ajustan a alguna de las distribuciones descritas es necesario cuantificar si los resultados obtenidos se ajustan a ese modelo o las diferencias son debidas al azar. Los contrastes estadísticos utilizados con este fin se denominan pruebas de bondad de ajuste. Para el caso de las muestras no categorizadas (muestras continuas), analizaremos el Kolomogorov-Smirnov (test K-S). Utilizado para todas las distribuciones.

A.2.4.1 Test de Kolmogorov-Smirnov

Se puede usar tanto para muestras grandes como pequeñas. Es un test muy conservador que se aplica a variables continua. Se basa en la determinación de la máxima diferencia (D) entre las frecuencias acumuladas observadas (AO_i) y las frecuencias acumuladas esperadas (AE_i), partiendo de la hipótesis nula de que los datos se ajustan a una distribución determinada. La fórmula del test es:

$$D = \max|AO_i - AE_i|$$

A.2.5 Intervalos de Confianza

Un intervalo de confianza utiliza una muestra de datos para estimar un parámetro desconocido con una indicación sobre la precisión de la estimación y sobre cuál es nuestra confianza de que el resultado sea correcto.

Cualquier intervalo de confianza tiene dos partes: el intervalo calculado a partir de los datos y el nivel de confianza. Los intervalos, a menudo tienen la forma:

$$\text{Estimación} \pm \text{error de estimación}$$

EL nivel de confianza indica la probabilidad de que el método dé una respuesta correcta. Esto es, si se utilizara repetidamente los intervalos de confianza del 95%, después de muchos muestreos, un 95% de estos intervalos contendría el verdadero valor del parámetro. No se puede saber si un intervalo de confianza del



95% calculado a partir de un determinado conjunto de datos contiene el verdadero valor del parámetro.

Un intervalo de confianza de un nivel de probabilidad C para la media μ de una población normal con una desviación típica σ conocida, basado en una muestra aleatoria simple de tamaño n , viene dado por

$$\bar{x} \pm z^* \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Aquí, el valor crítico z^* se ha escogido de manera que la curva normal estandariza tenga un área C entre $-z^*$ y z^* . Debido al teorema del límite central, este intervalo es aproximadamente correcto para muestras grandes cuando la población no es normal.

Si se mantiene lo demás constante, el error de estimación de un intervalo de confianza se hace pequeño cuando:

- El nivel de confianza C disminuye.
- La desviación típica poblacional σ disminuye, y
- El tamaño de la muestra n aumenta.

El tamaño de muestra necesario para obtener un intervalo de confianza con un determinado error de estimación m para una media normal es:

$$n = \left(\frac{z^* \sigma}{m} \right)^2$$

Donde z^* es el valor crítico para el nivel de confianza deseado. Cuando se utilice ésta fórmula se deberá siempre redondea n hacia arriba.

La fórmula de un determinado intervalo de confianza es correcta sólo en unas condiciones concretas. Las condiciones más importantes hacen referencia al procedimiento utilizado para obtener datos. Otros factores tales como la forma de la distribución de la población también son muy importantes.

El intervalo de confianza de un parámetro al nivel $1 - \alpha$ es aquel que cumple la propiedad de que la probabilidad de que sus extremos tomen valores tales que el parámetro esté comprendido entre ellos es igual a $1 - \alpha$ (Viedma, 1989). Los extremos del intervalo de confianza de un parámetro se denominan límites de confianza.

A.2.6 Contraste de hipótesis y niveles de significación

Muy a menudo, en la práctica, se tienen que tomar decisiones sobre poblaciones, partiendo de la información muestral de las mismas. El contraste de hipótesis es un procedimiento para juzgar si una propiedad que se supone cumple una población estadística es compatible con lo observado en una muestra de dicha población.



A.2.6.1 Tipos de hipótesis estadísticas

Para llegar a tomar decisiones, conviene hacer determinados supuestos o conjeturas acerca de las poblaciones que se estudian. Tales supuestos que pueden ser o no ciertos se llaman *hipótesis estadísticas* y, en general, lo son sobre las distribuciones de probabilidad de las poblaciones.

En muchos casos se formular las hipótesis estáticas con el solo propósito de rechazarlas o invalidarlas. Por ejemplo, si se quiere decidir si una moneda está cargada, se formula la hipótesis de que la moneda está bien, es decir, $p = 0,5$; donde p es la probabilidad de cara. Análogamente, si se quiere decidir sobre si un procedimiento es mejor que otro, se formula la hipótesis de que *no hay diferencia* entre los procedimientos (es decir, cualquier diferencia observada se debe meramente a fluctuaciones entre los procedimientos (es decir, cualquier diferencia observada se debe a fluctuaciones en el muestreo de la *misma* población). Tales hipótesis se llaman también *hipótesis nulas* y se denotan por H_0 .

Cualquier hipótesis que difiera de una hipótesis dada se llama *hipótesis alternativa*. Por ejemplo, si una hipótesis es $p = 0.5$ hipótesis alternativas son $p = 0.7$; $p \neq 0.5$ o $p > 0.5$. Una hipótesis alternativa de la hipótesis nula se denota por H_1 .

A.2.6.2 Estadístico de contraste

Un *estadístico del contraste* es un estadístico cuyo valor se determina a partir de los datos de la muestra. Dependiendo del valor que tome este estadístico del contraste, la hipótesis será nula o rechazada.

A.2.6.3 Tipos de errores

Se comete un error al tomar una decisión equivocada, éste puede ser de dos tipos:

El error *tipo I* es el que cometemos cuando rechazamos la hipótesis nula siendo verdadera. Su probabilidad se representa generalmente por α y se conoce como el *nivel de significación*. El valor máximo que se le suele dar a α es de 0.05, lo cual significa que rechazamos un 5% de las veces la hipótesis nula siendo cierta. Se puede fijar un valor de α más bajo, como por ejemplo de 0.001 ó 0.005, pero el problema es que aumentamos la probabilidad de cometer el error tipo II.

El error *tipo II* es el que metemos cuando aceptamos la hipótesis nula siendo falsa. Su probabilidad se representa por β . Este error se tiene en cuenta determinando el tamaño de muestra necesario para garantizar el valor de β prefijado. En el supuesto de que no se tenga en cuenta el tamaño de muestra necesario y, por tanto, se omite el error de tipo II, entonces el procedimiento se suele denominar “contraste de significación”, ya que solo tiene en cuenta el error tipo I.

En síntesis si se rechaza una hipótesis cuando debería ser aceptada, se dice se dice que se comente un *error del Tipo I*; si, por el contrario, se acepta una



hipótesis que debería ser rechazada, se dice que se comete un *error del Tipo II*. En cualquiera de los dos casos se comete un error al tomar una decisión equivocada.

A.2.7 Contraste de hipótesis en variables cuantitativas

Para el contraste de hipótesis en el caso de variables cuantitativas contamos con dos tipos de análisis, los *paramétricos*, que proceden de un modelo que obliga a cumplir ciertos supuestos acerca de los parámetros y la distribución de probabilidad de la población de la que se extrajo la muestra, y los *no paramétricos*, que son menos restrictivos para poder ser aplicados. Se debe tener en cuenta que la estadística paramétrica es más precisa, pero las posibilidades de ser aplicada están limitadas.

A.2.8 Análisis de varianza: Un solo factor

El análisis de varianza (ANOVA), tiene como objetivo la hipótesis de que las de tres o más muestras medias son iguales. En un experimento de un factor, las medias (u observaciones) se obtienen para a grupos independientes de muestras, donde el número de medias de cada grupo es b . Hablamos de a tratamientos, cada uno de los cuales tiene b repeticiones o réplicas. Vamos a desarrollar como ejemplo, la experimentación que hemos realizado en el modelo de la compuerta, para el caso de la variable abertura de la compuerta con respecto al factor q . Existen tres tipos de caudales 400, 600 y 700 m³/s. Para los cuales las medias de la abertura de la compuerta, son 1.34, 1.83 y 2.55 cm; respectivamente. Queremos conocer si hay diferencia significativa entre las medias. Vamos a denominar a los datos de la siguiente forma: a al número de tratamientos (3 caudales), $a = 3$; y N el número de observaciones para cada tratamiento. Por lo cual se recomienda ordenar los datos en a filas y N columnas. Vamos a comparar la media entre los tratamientos contra la media contra cada tratamiento. Para ello tenemos que realizar algunas definiciones tales como: la *variación total*, denotada por V , es igual a la suma de los cuadrados de las desviaciones de cada medida con respecto a la media global \bar{X} .

$$\text{Variación total} = V = \sum_{j,k} (X_{jk} - \bar{X})^2$$

Donde, X_{jk} es la medida en la j -ésima fila ($j = 1, 2, \dots, a$) y en la k -ésima ($k = 1, 2, \dots, N$) columna. \bar{X} es la media global del grupo de datos.

Esto se lo puede realizar mediante una simplificación para lo cual definiremos a T , como el total de los valores X_{jk} y T_j como el total de los valores en el tratamiento j -ésimo, así:

$$T = \sum_{j,k} X_{jk} \quad T_j = \sum_k X_{jk}$$



De esta manera, la variación total sería:

$$V = \sum_{j,k} X_{jk}^2 - \frac{T^2}{N}$$

La variación entre los tratamientos es igual a los cuadrados de las desviaciones de las diversas medias de tratamientos \bar{X}_j , respecto de la media global \bar{X} ; se denota por V_B y se formula así:

$$V_B = \sum_{j,k} (X_j - \bar{X})^2$$

Al igual que en la variación total esta, variación total se la simplifica de la siguiente manera:

$$V_B = \sum_j \frac{T_j^2}{N_j} - \frac{T^2}{N}$$

Donde $\sum_{j,k}$ se denota la suma sobre k desde 1 hasta N_j y después la suma sobre j desde 1 hasta a .

Además la variación dentro de los tratamientos es igual a $V_W = V - V_B$.

Con la suma de cuadrados, podemos obtener valores esperados conocidos como cuadrado medio de error (\hat{S}^2), que nos sirven para conocer el estadístico $F = \hat{S}_B^2 / \hat{S}_W^2$ que tiene una distribución F con $a - 1$ y $N - a$ grados de libertad.

Los cuadrados medios de error entre tratamientos y dentro de los tratamientos son:

$$\hat{S}_B^2 = \frac{V_B}{a - 1} \quad \hat{S}_W^2 = \frac{V_W}{N - 1}$$

El estadístico F es una muy buena herramienta para contrastar para la hipótesis nula H_0 de igualdad de las medias. Si éste estadístico es significativamente grande, podemos concluir que hay una diferencia significativa entre las medias de los tratamientos y podemos, por tanto, rechazar H_0 ; caso contrario, podemos ya sea aceptar H_0 o reservar la decisión, pendiente de posteriores análisis adicionales.

El análisis de varianza comúnmente se realiza en una tabla de cálculo, como la que se presenta en la Tabla A.2.1.



Tabla A.2.1 Análisis de Varianza

Variación	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Entre tratamientos, $V_B = \sum_j N_j (\bar{X}_j - \bar{X})^2$	a - 1	$\hat{S}_B^2 = \frac{V_B}{a - 1}$	$\frac{\hat{S}_B^2}{\hat{S}_W^2}$ con a - 1 y N - a grados de libertad.
Dentro de los tratamientos $V_W = V - V_B$	N - a	$\hat{S}_W^2 = \frac{V_W}{N - 1}$	
Total, $V = V_B + V_W$ $V = \sum_{j,k} (\bar{X}_j - \bar{X})^2$	N - 1		

Homogeneidad de varianzas: El estadístico *F* del ANOVA de un factor se basa en el cumplimiento de dos supuestos fundamentales: *normalidad* y *homocedasticidad*.

Normalidad significa que la variable dependiente se distribuye normalmente en las *a* poblaciones muestreadas (tantas como grupos definidos por la variable independiente). No obstante si los tamaños de los grupos son grandes, el estadístico *F* se comporta razonablemente bien incluso con distribuciones poblacionales sensiblemente alejadas de la normalidad.

Homocedasticidad o igualdad de varianzas significa que las *K* poblaciones muestreadas poseen la misma varianza. Con grupos de distinto tamaño, el incumplimiento de este supuesto debe ser cuidadosamente vigilado.

Comparaciones *post hoc* o *a posteriori*

El estadístico *F* del ANOVA únicamente nos permite contrastar la hipótesis general de que los *K* promedios comparados son iguales. Al rechazar esa hipótesis, sabemos que las medias poblacionales comparadas no son iguales, pero no sabemos dónde en concreto se encuentran las diferencias: ¿son diferentes entre sí todas las medias?, ¿hay sólo una media que difiere de las demás?, etc.

Para saber cuál media difiere de otra debemos utilizar un tipo particular de contrastes denominados comparaciones múltiples *post host* o comparaciones *a posteriori*. Estas comparaciones permiten controlar la *tasa de error* al efectuar varios contrastes utilizando las mismas medias, es decir, permiten controlar la probabilidad de cometer errores tipo I al tomar varias decisiones (los errores tipo I se cometen cuando se decide rechazar una hipótesis nula que en realidad no debería rechazarse).

Asumiendo varianzas iguales, existen varios procedimientos *post host* que se puede seleccionar, aquí mencionaremos la *Prueba de Tukey*, ya que este



procedimiento es el empleado en el análisis de datos.

Prueba de Tukey Es uno de varios métodos que existen para realizar comparaciones entre pares de medias que apoyen la credibilidad de la tasa de error tipo I. Esta prueba permite la formación de intervalos de confianza de $100(1 - \alpha) \%$ simultáneos para todas las comparaciones de los pares de medias. El método se basa en la distribución del rango *studentizado*. El punto percentil apropiado es un función del nivel de significancia α , número de tratamientos K y $v =$ grados de libertad para s^2 . El método de múltiples comparaciones entre pares de medias de Tukey se sustenta en encontrar una diferencia significativa entre las medias i y j ($i \neq j$) si $(\bar{y}_i - \bar{y}_j)$ excede $q[\alpha, K, v]s\sqrt{1/n}$.

El procedimiento es el siguiente, todas las medias de cada tratamiento se ordenan según su magnitud; el grupo con la menor media se ubica primero. Las comparaciones de diferencias por pares de medias, comienza con la mayor media comparada con la menor. Este valor, q , es comparado con el valor crítico de rango studentizado. Si q es mayor que el valor crítico, la expresión entre éste grupo de pares es considerado estadísticamente diferente.

A continuación se presenta un ejemplo extraído de (Walpole, Myers, & Myers, 1999) para la mejor comprensión de ANOVA; para obtener los valores de $q[\alpha, K, v]$ se recomienda consultar la tabla A.22 del citado libro.

Considerando que se tienen seis tratamientos en un diseño de factor completamente aleatorizado con cinco observaciones por tratamiento. Suponemos que el cuadrado medio del error que se toma de la tabla de análisis de varianza es $\hat{S}_B^2 = 2.45$ (24 grados de libertad). Las medias muestrales son, en orden ascendente:

\bar{y}_2	\bar{y}_5	\bar{y}_1	\bar{y}_3	\bar{y}_6	\bar{y}_4
14.5	16.75	19.84	21.12	22.9	23.2

Con $\alpha = 0.005$, el valor de $q[0.05,6,24] = 4.37$. Por lo que todas las diferencias absolutas se comparan con:

$$4.37 \sqrt{\frac{2.45}{5}} = 3.059$$

Como resultado, las siguientes medias que se encuentran son *significativamente diferentes* con el procedimiento de Tukey:

4 y 1,	4 y 5,	4 y 2,	6 y 1,	6 y 5,
6 y 2,	3 y 5,	3 y 2,	1 y 5,	1 y 2.

A.2.9 Diagramas de caja

Los diagramas de caja son un modo de resumir la distribución de los valores de una variable, en vez de visualizar los valores individuales, donde se representan estadísticos básicos de la distribución tales como: la mediana, los percentiles 25 y

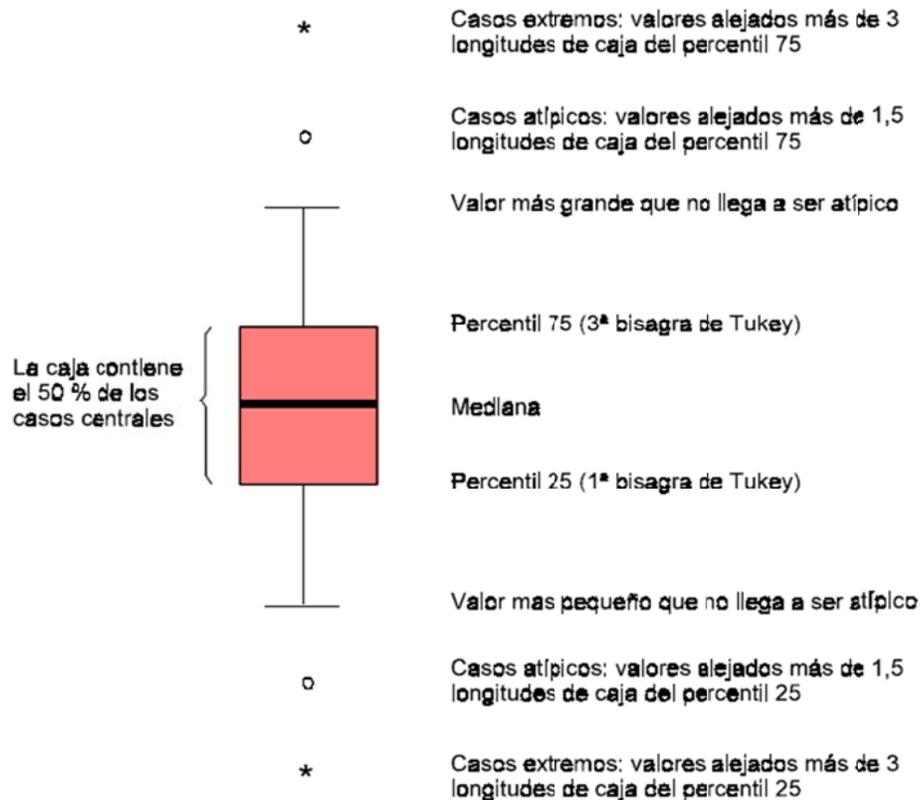


75 y una serie de valores (atípicos, extremos) que junto con la mediana y la propia caja proporcionan información bastante completa sobre: el *grado de dispersión*, y el grado de *asimetría* de la distribución. La figura 2.5 describe los detalles de un diagrama de caja.

Se consideran dos categorías de casos extremos, en función de cuanto se alejan con respecto del 50% central de la distribución. Aquellos casos con valores alejados más de 3 veces el rango intercuartil desde el extremo superior o inferior de la caja (casos más extremos representados con un “*”) y aquellos valores que están alejados entre 1,5 y 3 veces dicho rango (representados con un círculo).

Los valores más pequeño y más grande que estén dentro de los límites primer cuartil -1,5 y tercer cuartil +1,5 veces el rango intercuartil (IQR) constituyen los “wiskers” del gráfico y aparecen representados mediante las dos líneas horizontales dibujadas a ambos extremos de la caja central.

Figura A.2.4 Detalles de un Diagrama de Caja



Se consideran dos categorías de casos extremos, en función de cuanto se alejan con respecto del 50% central de la distribución. Aquellos casos con valores alejados más de 3 veces el rango intercuartil desde el extremo superior o inferior de la caja (casos más extremos representados con un “*”) y aquellos valores que están alejados entre 1,5 y 3 veces dicho rango (representados con un círculo).

Los valores más pequeño y más grande que estén dentro de los límites primer



Universidad de Cuenca

cuartil $-1,5$ y tercer cuartil $+1,5$ veces el rango intercuartil (IQR) constituyen los “whiskers” del gráfico y aparecen representados mediante las dos líneas horizontales dibujadas a ambos extremos de la caja central.

El ancho de la caja nos da una idea de la variabilidad de las observaciones. Si la mediana no está en el centro de la caja, podemos deducir que la distribución es asimétrica, en el caso que esté próxima al límite inferior de la caja, es asimétrica positiva; y si está próxima al límite superior, es asimétrica negativa.

Los diagramas de caja son especialmente útiles para comparar la distribución de los valores entre diferentes grupos.



ANEXO 3

ANOVA Y PRUEBAS POST HOC DE VARIABLES INDEPENDIENTES

En función del Caudal (Q)	90
En función de la Posición (P)	91
En función de la profundidad del cuenco disipador (z).....	93



En función del Caudal (Q)

Tabla A.3.1 Análisis ANOVA para las variables en función de Q

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
a	Between Groups	50.970	2	25.485	137.714	.000
	Within Groups	5.367	29	.185		
	Total	56.337	31			
y1	Between Groups	5.113	2	2.557	2.812	.088
	Within Groups	15.454	17	.909		
	Total	20.567	19			
y2	Between Groups	33.371	2	16.686	5.030	.019
	Within Groups	56.391	17	3.317		
	Total	89.762	19			
Lr	Between Groups	597.856	2	298.928	1.390	.276
	Within Groups	3655.072	17	215.004		
	Total	4252.928	19			
vf1	Between Groups	133.522	2	66.761	.209	.813
	Within Groups	8947.209	28	319.543		
	Total	9080.731	30			

Tabla A.3.2 Prueba Tukey, Post Hoc, Comparaciones Múltiples f(Q)

Tukey HSD

Dependent Variable	(I) q	(J) q	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
a	400.00	600.00	-1.86591*	.18796	.000	-2.3301	-1.4017
		700.00	-3.10682*	.18796	.000	-3.5710	-2.6426
	600.00	400.00	1.86591*	.18796	.000	1.4017	2.3301
		700.00	-1.24091*	.18343	.000	-1.6939	-.7879
	700.00	400.00	3.10682*	.18796	.000	2.6426	3.5710
		600.00	1.24091*	.18343	.000	.7879	1.6939
y1	400.00	600.00	-.49583	.51492	.609	-1.8168	.8251
		700.00	-1.22083	.51492	.073	-2.5418	.1001
	600.00	400.00	.49583	.51492	.609	-.8251	1.8168
		700.00	-.72500	.55048	.405	-2.1372	.6872
	700.00	400.00	1.22083	.51492	.073	-.1001	2.5418
		600.00	.72500	.55048	.405	-.6872	2.1372
y2	400.00	600.00	-1.95208	.98362	.146	-4.4754	.5712
		700.00	-3.03542*	.98362	.017	-5.5587	-.5121
	600.00	400.00	1.95208	.98362	.146	-.5712	4.4754
		700.00	-1.08333	1.05153	.569	-3.7809	1.6142
	700.00	400.00	3.03542*	.98362	.017	.5121	5.5587
		600.00	1.08333	1.05153	.569	-1.6142	3.7809



Tukey HSD

Dependent Variable	(I) g	(J) g	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Lr	400.00	600.00	-6.19167	7.91894	.719	-26.5066	14.1232
		700.00	-13.19167	7.91894	.247	-33.5066	7.1232
	600.00	400.00	6.19167	7.91894	.719	-14.1232	26.5066
		700.00	-7.00000	8.46570	.692	-28.7175	14.7175
	700.00	400.00	13.19167	7.91894	.247	-7.1232	33.5066
		600.00	7.00000	8.46570	.692	-14.7175	28.7175
vf1	400.00	600.00	-4.52455	7.81049	.832	-23.8504	14.8013
		700.00	-4.34000	7.99429	.851	-24.1207	15.4407
	600.00	400.00	4.52455	7.81049	.832	-14.8013	23.8504
		700.00	.18455	7.81049	1.000	-19.1413	19.5104
	700.00	400.00	4.34000	7.99429	.851	-15.4407	24.1207
		600.00	-.18455	7.81049	1.000	-19.5104	19.1413

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

En función de la Posición (P)

Tabla A.3.3 Análisis ANOVA para las variables en función de P

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
a	Between Groups	.127	2	.063	.033	.968
	Within Groups	56.211	29	1.938		
	Total	56.337	31			
y1	Between Groups	2.971	2	1.486	1.435	.265
	Within Groups	17.596	17	1.035		
	Total	20.567	19			
y2	Between Groups	19.478	2	9.739	2.356	.125
	Within Groups	70.284	17	4.134		
	Total	89.762	19			
Lr	Between Groups	231.871	2	115.935	.490	.621
	Within Groups	4021.057	17	236.533		
	Total	4252.928	19			
vf1	Between Groups	2101.525	2	1050.762	4.216	.025
	Within Groups	6979.206	28	249.257		
	Total	9080.731	30			



Tabla A.3.4 Prueba Tukey, Post Hoc, Comparaciones Múltiples f(P)

TukeyHSD

Dependent Variable	(I) p	(J) p	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
a	1.00	2.00	.02652	.58115	.999	-1.4087	1.4617
		3.00	-.12500	.61391	.977	-1.6412	1.3912
	2.00	1.00	-.02652	.58115	.999	-1.4617	1.4087
		3.00	-.15152	.62576	.968	-1.6969	1.3939
	3.00	1.00	.12500	.61391	.977	-1.3912	1.6412
		2.00	.15152	.62576	.968	-1.3939	1.6969
y1	1.00	2.00	-.38730	.51271	.735	-1.7026	.9280
		3.00	.69306	.61137	.507	-.8753	2.2614
	2.00	1.00	.38730	.51271	.735	-.9280	1.7026
		3.00	1.08036	.63768	.236	-.5555	2.7162
	3.00	1.00	-.69306	.61137	.507	-2.2614	.8753
		2.00	-1.08036	.63768	.236	-2.7162	.5555
y2	1.00	2.00	.40952	1.02469	.916	-2.2192	3.0382
		3.00	2.60417	1.22187	.113	-.5304	5.7387
	2.00	1.00	-.40952	1.02469	.916	-3.0382	2.2192
		3.00	2.19464	1.27445	.226	-1.0748	5.4640
	3.00	1.00	-2.60417	1.22187	.113	-5.7387	.5304
		2.00	-2.19464	1.27445	.226	-5.4640	1.0748
Lr	1.00	2.00	7.52381	7.75060	.605	-12.3592	27.4069
		3.00	4.96667	9.24200	.854	-18.7424	28.6757
	2.00	1.00	-7.52381	7.75060	.605	-27.4069	12.3592
		3.00	-2.55714	9.63969	.962	-27.2864	22.1721
	3.00	1.00	-4.96667	9.24200	.854	-28.6757	18.7424
		2.00	2.55714	9.63969	.962	-22.1721	27.2864
vf1	1.00	2.00	1.40455	6.59024	.975	-14.9020	17.7111
		3.00	19.43750*	7.20615	.030	1.6070	37.2680
	2.00	1.00	-1.40455	6.59024	.975	-17.7111	14.9020
		3.00	18.03295	7.33600	.052	-.1189	36.1848
	3.00	1.00	-19.43750*	7.20615	.030	-37.2680	-1.6070
		2.00	-18.03295	7.33600	.052	-36.1848	.1189

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.



En función de la profundidad del cuenco disipador (z)

Tabla A.3.5 Análisis ANOVA para las variables en función de z

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
a	Between Groups	2.465	2	1.232	.663	.523
	Within Groups	53.872	29	1.858		
	Total	56.337	31			
y1	Between Groups	6.351	2	3.176	3.798	.043
	Within Groups	14.216	17	.836		
	Total	20.567	19			
y2	Between Groups	48.253	2	24.127	9.881	.001
	Within Groups	41.509	17	2.442		
	Total	89.762	19			
Lr	Between Groups	2440.108	2	1220.054	11.441	.001
	Within Groups	1812.820	17	106.636		
	Total	4252.928	19			
vf1	Between Groups	2476.221	2	1238.111	5.249	.012
	Within Groups	6604.509	28	235.875		
	Total	9080.731	30			

Tabla A.3.6 Prueba Tukey, Post Hoc, Comparaciones Múltiples f(z)

TukeyHSD

Dependent Variable	(I) z	(J) z	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
a	1.00	2.00	.32091	.59552	.853	-1.1498	1.7916
		3.00	.68455	.59552	.492	-.7862	2.1553
	2.00	1.00	-.32091	.59552	.853	-1.7916	1.1498
		3.00	.36364	.58117	.807	-1.0716	1.7989
	3.00	1.00	-.68455	.59552	.492	-2.1553	.7862
		2.00	-.36364	.58117	.807	-1.7989	1.0716
y1	1.00	2.00	1.21222	.51006	.072	-.0963	2.5207
		3.00	1.05556	.48196	.102	-.1808	2.2920
	2.00	1.00	-1.21222	.51006	.072	-2.5207	.0963
		3.00	-.15667	.55373	.957	-1.5772	1.2638
	3.00	1.00	-1.05556	.48196	.102	-2.2920	.1808
		2.00	.15667	.55373	.957	-1.2638	1.5772
y2	1.00	2.00	-1.46111	.87157	.243	-3.6970	.7748
		3.00	-3.66111*	.82356	.001	-5.7738	-1.5484
	2.00	1.00	1.46111	.87157	.243	-.7748	3.6970
		3.00	-2.20000	.94620	.079	-4.6273	.2273
	3.00	1.00	3.66111*	.82356	.001	1.5484	5.7738
		2.00	2.20000	.94620	.079	-.2273	4.6273



Multiple Comparisons

TukeyHSD

Dependent Variable	(I) z	(J) z	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Lr	1.00	2.00	7.94000	5.75984	.374	-6.8361	22.7161
		3.00	25.91667*	5.44254	.001	11.9546	39.8787
	2.00	1.00	-7.94000	5.75984	.374	-22.7161	6.8361
		3.00	17.97667*	6.25300	.027	1.9355	34.0179
	3.00	1.00	-25.91667*	5.44254	.001	-39.8787	-11.9546
		2.00	-17.97667*	6.25300	.027	-34.0179	-1.9355
vf1	1.00	2.00	18.58081*	6.90301	.031	1.5003	35.6613
		3.00	20.61717*	6.90301	.016	3.5367	37.6976
	2.00	1.00	-18.58081*	6.90301	.031	-35.6613	-1.5003
		3.00	2.03636	6.54877	.948	-14.1676	18.2403
	3.00	1.00	-20.61717*	6.90301	.016	-37.6976	-3.5367
		2.00	-2.03636	6.54877	.948	-18.2403	14.1676

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.



ANEXO 4 FORMATO PARA TOMA DE DATOS

EXPERIMENTACIÓN MODELO FÍSICO ESTRUCTURA DE COMPUERTA. PROYECTO CONTROL DE INUNDACIONES DE LOS RÍOS BULUBULU Y CAÑAR.																				
VARIABLES DE DISEÑO				RESULTADOS																
P	z	Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)	H (cm)	a (cm)	y1 (cm)	y2 (cm)	Lr (cm)	Vf1 ₁ (cm/s)	σ	Vf1 ₂ (cm/s)	σ	Vf1 ₃ (cm/s)	σ	Vf2 (cm/s)	σ	ρ1 (cm)	ρ2 (cm)	ρ3 (cm)	ρ4 (cm)
1	1	400	13.42	20.60																
1	1	600	20.12	20.60																
1	1	700	23.48	20.60																
2	1	400	13.42	20.60																
2	1	600	20.12	20.60																
2	1	700	23.48	20.60																
3	1	400	13.42	20.60																
3	1	600	20.12	20.60																
3	1	700	23.48	20.60																
1	2	400	13.42	20.60																
1	2	600	20.12	20.60																
1	2	700	23.48	20.60																
2	2	400	13.42	20.60																
2	2	600	20.12	20.60																
2	2	700	23.48	20.60																
3	2	400	13.42	20.60																
3	2	600	20.12	20.60																
3	2	700	23.48	20.60																
1	3	400	13.42	20.60																
1	3	600	20.12	20.60																
1	3	700	23.48	20.60																
2	3	400	13.42	20.60																
2	3	600	20.12	20.60																
2	3	700	23.48	20.60																
3	3	400	13.42	20.60																
3	3	600	20.12	20.60																
3	3	700	23.48	20.60																



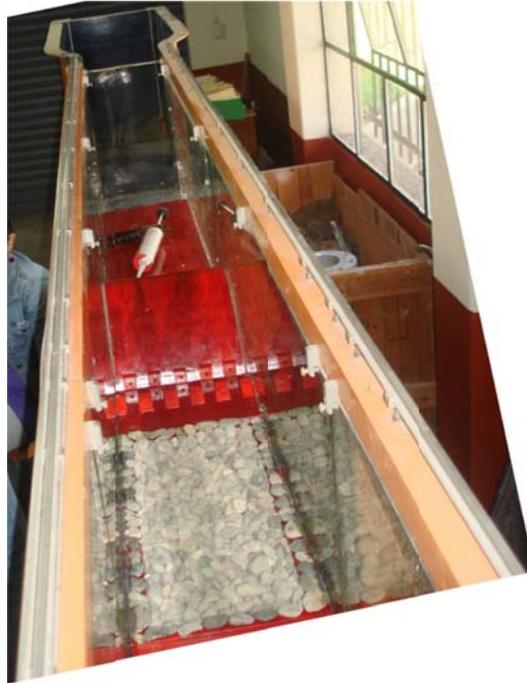
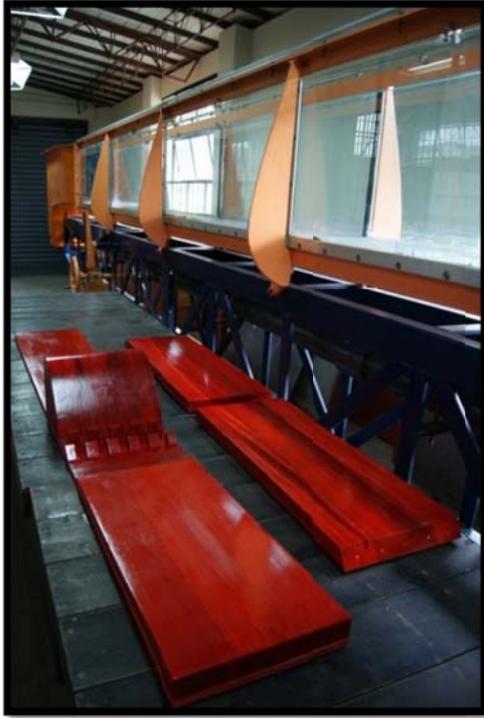
ANEXO 5

ANEXO FOTOGRAFICO

Armado del modelo físico de la derivadora Cañar, parte del Proyecto de Control de Inundaciones para los Ríos Bulubulu Cañar, y que en el desarrollo de esta tesis sirvió como estructura de control de caudales.	97
Colocación de estructura de compuerta.....	98
Ensayos de la estructura de compuerta de la derivadora Cañar.....	99



ARMADO DEL MODELO FÍSICO DE LA DERIVADORA CAÑAR, PARTE DEL PROYECTO DE CONTROL DE INUNDACIONES PARA LOS RÍOS BULUBULU CAÑAR, Y QUE EN EL DESARROLLO DE ESTA TESIS SIRVIÓ COMO ESTRUCTURA DE CONTROL DE CAUDALES.





COLOCACIÓN DE ESTRUCTURA DE COMPUERTA



ENSAYOS DE LA ESTRUCTURA DE COMPUERTA DE LA DERIVADORA CAÑAR

1. VARIACIÓN DE POSICIONES (P1, P2, P3) Y $Z = 2$, PARA LOS CAUDALES DE DISEÑO.



1.a) La compuerta se encuentra en $P = 1$, $z = 2$ y $Q = 13.42$ L/s, equivalente a 400 m³/s en prototipo. Se observa una pequeña abertura en la compuerta, $a = 0.5$ cm; por lo cual la carga de agua sobre la compuerta es elevada, mayor a

20.6 cm. La presión medida en el talud de ingreso al cuenco dissipador mediante los tubos piezométricos es elevada. Los 4 tubos piezométricos que se observan fuertemente coloreados de rojo, están colocados a diferentes alturas en el talud de ingreso; la menor medida corresponde al tubo colocado cerca de la parte superior del talud, y por ende la mayor medida corresponde al tubo colocado en la parte más baja del talud.

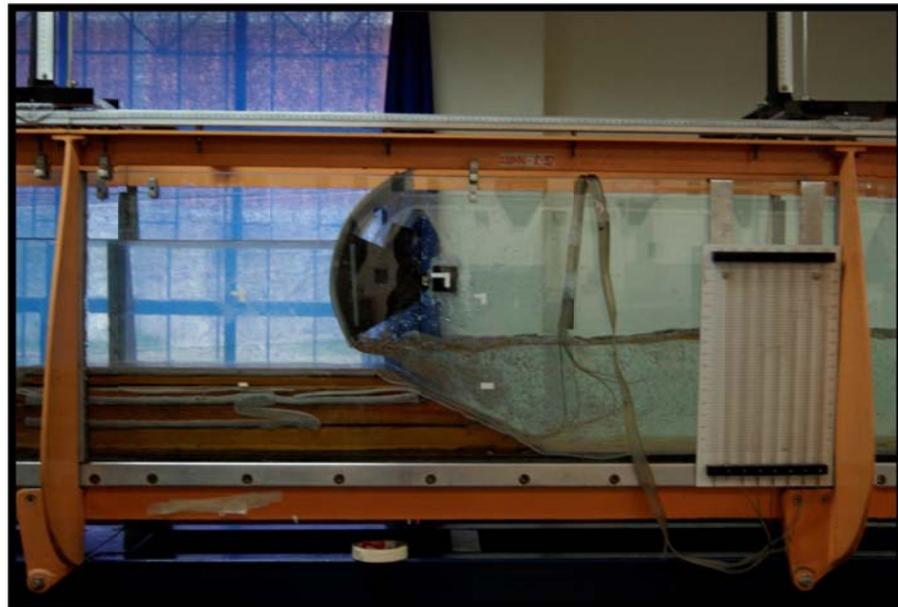
1.b) La compuerta está en $P = 2$, $z = 2$; la abertura es de 6.60 cm, $Q_m = 23.48$ L/s ($Q_p = 400$ m³/s). La carga en la compuerta es de 20.6 cm. Se observa la formación de hoyas en el cuenco dissipador.





1.c) La compuerta se encuentra en $P = 3$, $z = 2$. $H = 20.60$. $Q_m = 20.12$ L/s ($Q_p = 600 \text{ m}^3/\text{s}$). $a = 5.80$ cm. La abertura es igual a 5.80 cm. Se observa la formación de hoyas a la altura del cuenco dissipador.

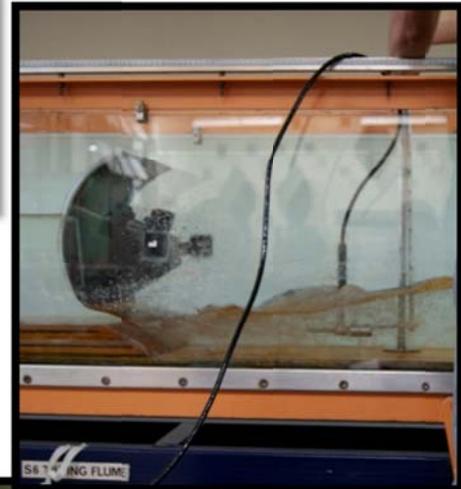
1.d) La compuerta se encuentra en $P = 1$, $z = 2$, $H = 20.6$ cm. $Q_m = 13.42$ L/s. ($Q_p = 400 \text{ m}^3/\text{s}$). La abertura $a = 3.35$ cm. Se observa el correcto funcionamiento, tanto en la carga constante aguas arriba de la compuerta, como en la disipación de la energía mediante el resalto en el cuenco.



2.VISTA FRONTAL DE LA COMPUERTA EN CUENCO DISIPADOR.



3.a



3. MEDICIÓN DE VELOCIDAD DURANTE EXPERIMENTACIÓN. Para ello se utilizó el instrumento Flow Traker tal como se lo observa en las fotografías 3.a y 3.b.



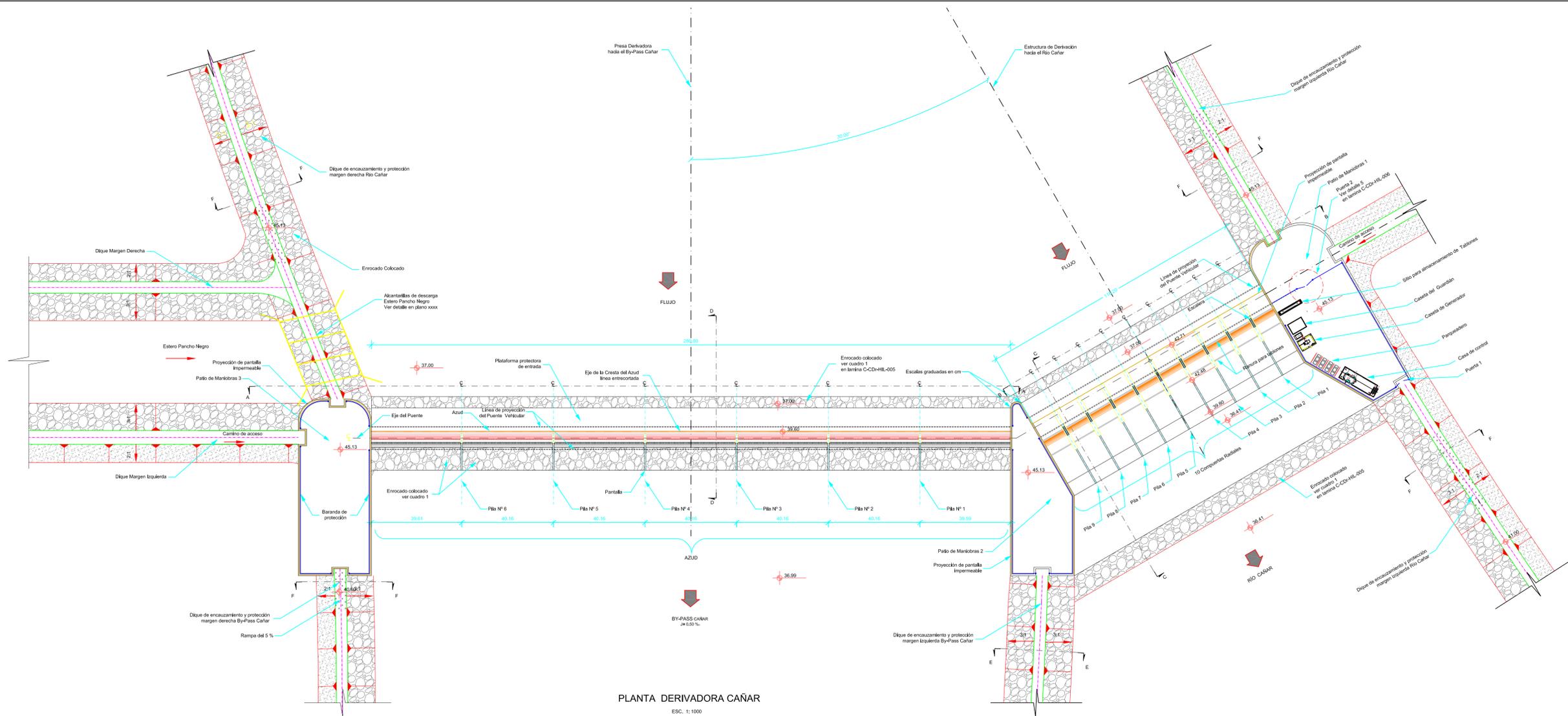
3.b



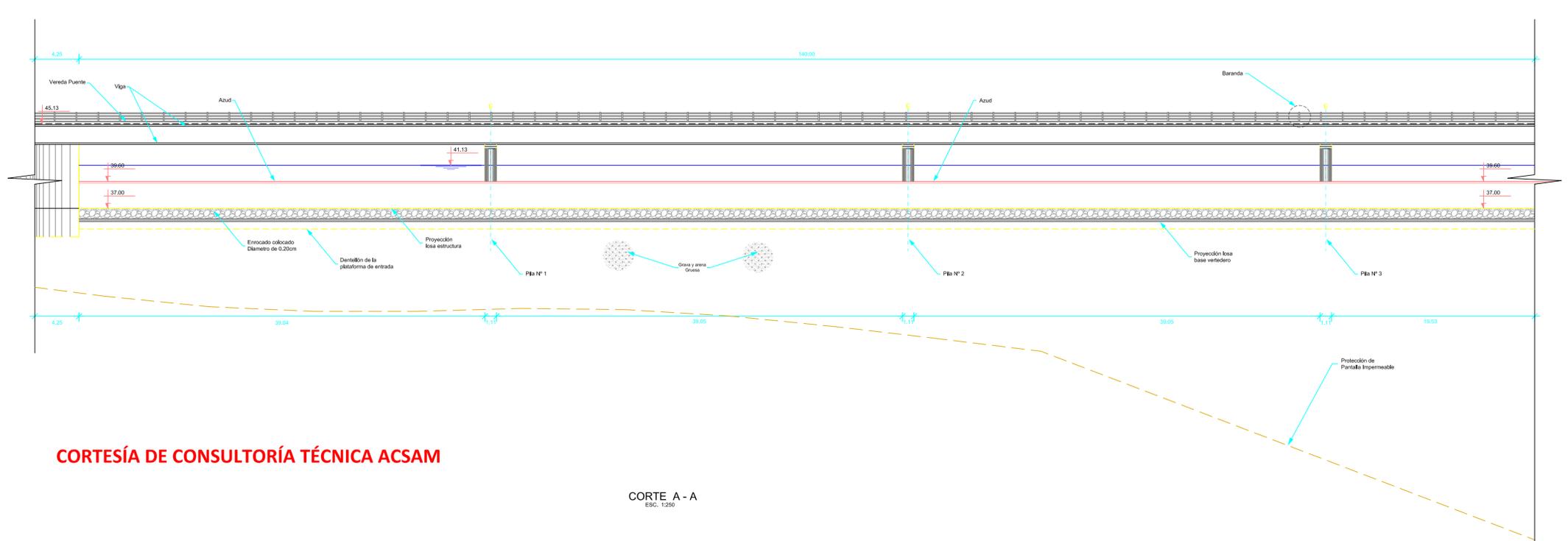
Universidad de Cuenca

ANEXO 6

ILUSTRACIONES DEL SISTEMA HIDRÁULICO DEL PROYECTO PARA EL CONTROL DE INUNDACIONES DE LOS RÍOS BULUBULU – CAÑAR - NARANJAL

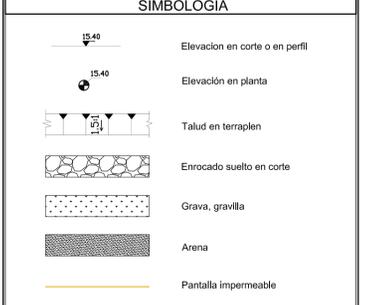
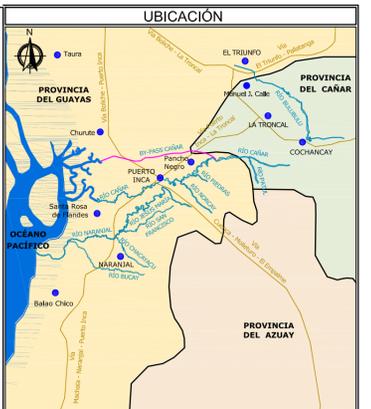


PLANTA DERIVADORA CAÑAR
ESC. 1:1000



CORTE A - A
ESC. 1:250

CUADRO 1			
Clase de roca	Tamaño (m)	Peso (kg)	% Enrocado
Revestimiento	0.40	91	100
	0.29	34	50
	0.12	2	10
Ligera	0.55	227	100
	0.40	91	50
	0.12	2	10

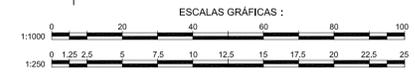


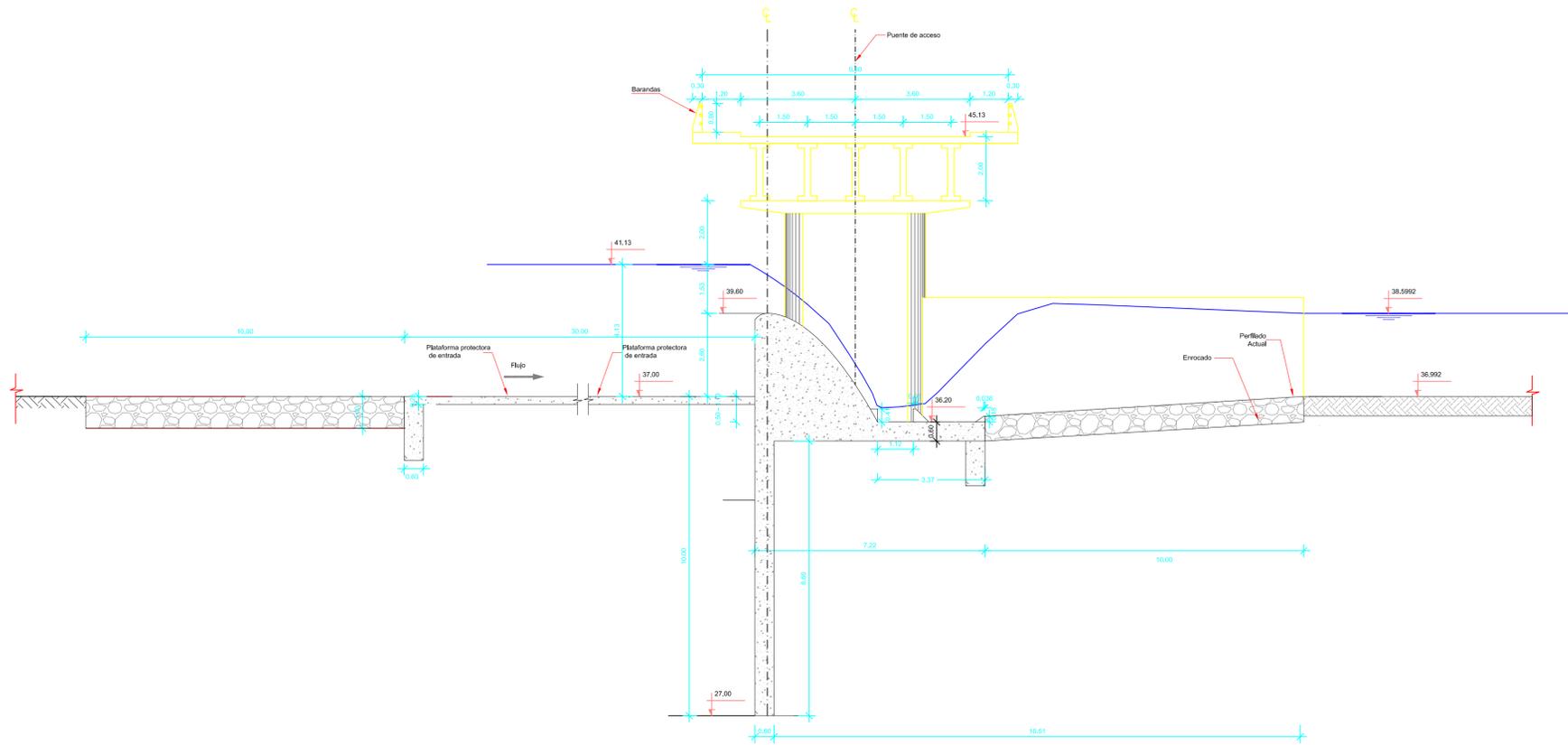
- NOTAS**
- Todas las dimensiones y elevaciones están dadas en metros excepto donde se indique de otra manera.
 - Para convenciones generales véase plano N° G-SSI-Nom-001.
 - Topografía tomada por la Asociación Consultoria Técnica ACSAM Consultores a Marzo del 2011.
 - El talud externo o talud seco de los terraplenes será protegido con grava aprobada por la Supervisión.
 - Para localización general de perfiles estratigráficos y sondeos sísmicos véase planos C-CD-GEO-001
 - Para cunetas y alcantarillas véase planos de Obras de Drenaje
 - Para estructura de entrega del estero Pancho Negro al Río Cañar véase plano C-CDq-HIL-098 y 099
 - La superficie final de todos los terraplenes deberá estar debidamente compactada al mismo grado que el resto del relleno, aunque sus dimensiones finales excedan a la requerida en estos planos.
 - Para puente vehicular ver planos estructurales.

REVISIONES					
REV. N°	FECHA	DESCRIPCION	DIS.	REV.	APRB.

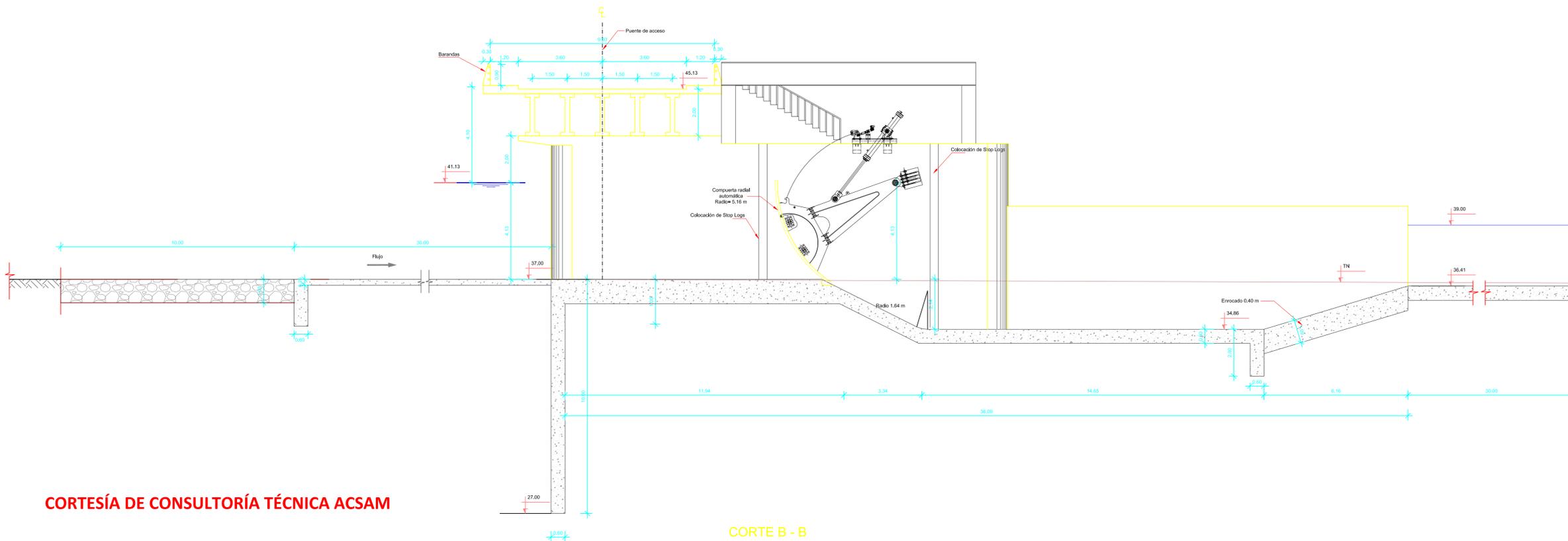
SECRETARÍA NACIONAL DE LA INGENIERÍA Y ARQUITECTURA DEL GUAYAS
 CONSULTORAS:
 SECRETARÍA NACIONAL del Agua
 CONSULTORIA TÉCNICA CA. LMA.
 PROYECTO CONTROL DE INUNDACIONES BULBULU - CAÑAR - NARANJAL FASE DISEÑO DEFINITIVO
 DERIVADORA RÍO CAÑAR
 PLANTA GENERAL CORTE A - A
 PLANOS.dwg
 C-CDq-HIL-002

CORTESÍA DE CONSULTORÍA TÉCNICA ACSAM



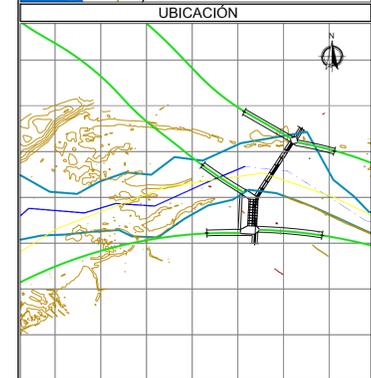


CORTE D - D
ESC. 1:100



CORTE B - B
ESC. 1:100

CORTESÍA DE CONSULTORÍA TÉCNICA ACSAM



SIMBOLOGÍA

- Elevación en corte o en perfil
- Elevación en planta
- Talud en terraplen
- Enrocado suelto en corte
- Grava, gravilla
- Arena
- Eje de simetría, línea central

NOTAS

REVISIONES

REV. N°	FECHA	DESCRIPCION	DIS.	REV.	APRB.

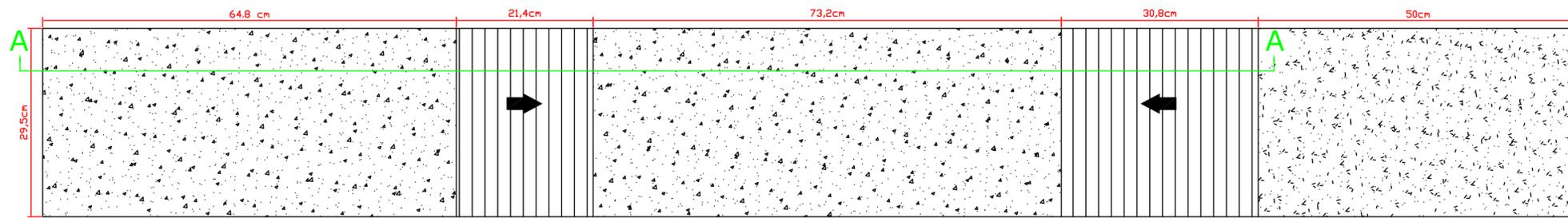
SECRETARÍA NACIONAL DEL AGUA
SECRETARÍA NACIONAL DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA DEL GUAYAS

CONSULTORAS:
TECNICA CAL, S.A.S.

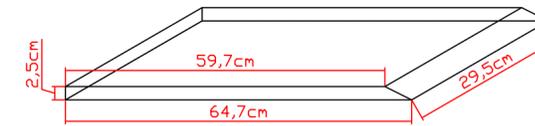
PROYECTO:
PROYECTO CONTROL DE INUNDACIONES
BULUBULU-CAÑAR - NARANJAL - FASE II -

DERIVADORA RÍO CAÑAR
PLANTA GENERAL
CORTE B-B
CORTE D-D

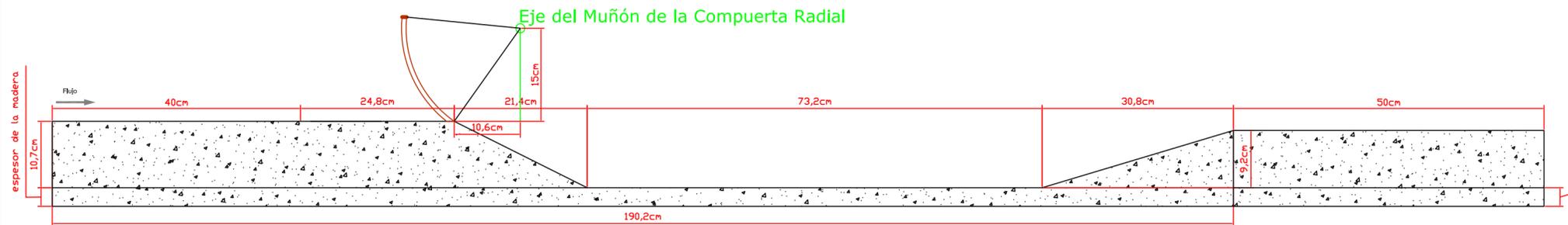
Planos.dwg



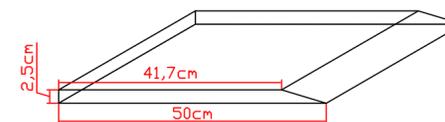
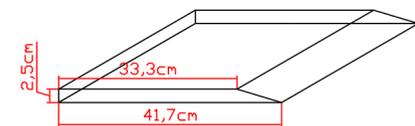
PLANTA MODELO DE COMPUERTA Y CUENCO DISIPADOR. DERIVADORA CAÑAR
ESC 1:6.25



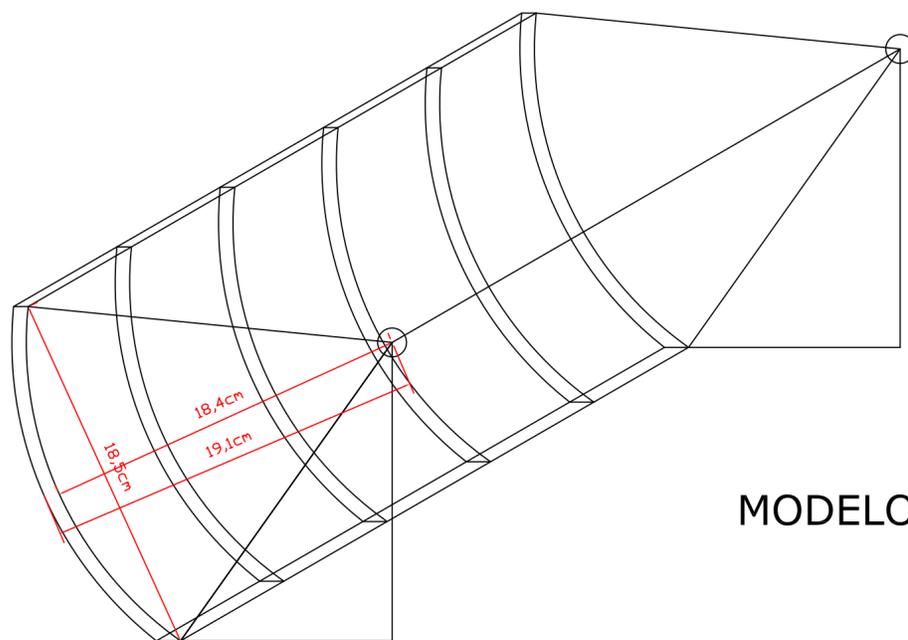
PIEZAS PARA PROFUNDIZAR
CUENCO AGUAS ARRIBA
ESC 1:10



CORTE A - A
ESC 1:6.25



PIEZAS PARA PROFUNDIZAR
CUENCO AGUAS ABAJO
ESC 1:10



MODELO COMPUERTA RADIAL
ESC 1:4

PROYECTO:		PROYECTO CONTROL DE INUNDACIONES BULUBULU-CAÑAR - NARANJAL	
DISEÑO DE MODELO FÍSICO DE COMPUERTA RADIAL Y CUENCO DISIPADOR DE ENERGÍA DE LA DERIVADORA CAÑAR		CONTENIDO: MODELO FÍSICO PLANTA GENERAL CORTE A-A MODELO COMPUERTA RADIAL PIEZAS PARA PROFUNDIZAR CUENCO DISIPADOR DE ENERGÍA	
ESCALA:	FECHA DE ELABORACION: 05/03/11	EQUIPO CONSULTOR	
INDICADAS:	DIBUJADO POR: Dep. CAD		
ARCHIVO NOMBRE: Modelo Físico Compuerta.dwg		PLANO No. 4	