



DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS VARIABLES ASOCIADAS AL CONTROL DE FLUJO A TRAVÉS DE UN MODELO FÍSICO, EN UN CUENCO DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA TIPO SAF DE LA DERIVADORA CAÑAR

RESUMEN

En el presente documento se ha estudiado comportamiento de las variables que intervienen en el proceso de disipación de energía en una obra tipo SAF para la derivadora Cañar del PROYECTO DE CONTROL DE INUNDACIONES BULUBULU-CAÑAR-NARANJAL a través de un modelo físico. Para el desarrollo del trabajo se construyó el modelo reducido de la derivadora.

Los procesos estudiados se fundamentan en las leyes fundamentales de la hidráulica y además se realiza un estudio detallado de los cuencos disipadores en especial del cuenco disipador tipo SAF.

El principal objetivo de la tesis es describir los fenómenos hidráulicos que se producen en el modelo y a partir de ellos predecir el comportamiento de las diferentes estructuras que se emplearan en las obras de derivación.

La metodología empleada para obtener los datos consiste en un conjunto de procedimientos básicos de laboratorio y un tratamiento científico de los valores arrojados por el modelo, la principal herramienta de validación de las muestras consiste en un cuidadoso análisis estadístico de las variables estudiadas mediante el software SPSS 17.0. La investigación se llevó a cabo bajo los lineamientos de investigación del PROMAS de la Universidad de Cuenca.

. **PALABRAS CLAVES:** Modelo físico reducido, Diseño hidráulico, Cuenco disipador, Modelamiento hidráulico, Análisis estadístico, Similitud y semejanza, SAF, Disipación de energía, Resalto hidráulico.

INDICE GENERAL

CAPITULO 1: INTRODUCCION.....	15
CAPITULO 2: MARCO TEORICO	18
CAPITULO 3: MATERIALES Y METODOS.....	56
CAPITULO 4: EXPERIMENTACION EN EL MODELO HIDRAULICO DE LA DERIVADORA CAÑAR.....	92
CAPITULO 5: RESULTADOS Y DISCUSION.....	112
BIBLIOGRAFIA.....	119
ANEXOS.....	120



UNIVERSIDAD DE CUENCA

UNIVERSIDAD DE CUENCA

FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

**“DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS VARIABLES ASOCIADAS
AL CONTROL DE FLUJO A TRAVÉS DE UN MODELO FÍSICO, EN UN
CUENCO DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA TIPO SAF DE LA DERIVADORA
CAÑAR”**

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR:

ING. ESTABAN PACHECO, M. Sc

TUTOR:

ING. VERONICA CARRILO

AUTORES:

EDISON FERNANDO CALLE BARAHONA
JUAN PATRICIO DOMINGUEZ QUINTEROS

CUENCA - ECUADOR

AÑO – 2011



UNIVERSIDAD DE CUENCA

AGRADECIMIENTO:

A DIOS, nuestras familias y a todas las personas que de uno u otro modo colaboraron en la realización de este trabajo, especialmente al Ing. Esteban Pacheco, Director de Tesis, por su invaluable ayuda.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

DEDICATORIA:

A nuestros padres, y familia que siempre nos brindaron su apoyo incondicional.



INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO:.....	3
DEDICATORIA:.....	4
INDICE GENERAL.....	5
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	9
LISTA DE TABLAS.....	12
SIMBOLOGIA.....	13
CAPITULO 1: INTRODUCCION.....	15
1.1 OBJETIVOS.....	15
1.1.1 OBJETIVO GENERAL.....	15
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.2 ALCANCE.....	16
1.3 ANTECEDENTES.....	16
1.4 JUSTIFICACION.....	17
CAPITULO 2: MARCO TEORICO.....	18
2.1 GENERALIDADES.....	18
2.2 MODELOS HIDRAULICO.....	18
2.2.1 PROTOTIPO:.....	18
2.2.2 MODELO:.....	19
2.2.2.1 MODELOS MATEMATICOS.....	19
2.2.2.2 MODELOS FISICOS REDUCIDOS.....	19
2.2.3 SEMEJANZA HIDRAULICA.....	21
2.2.3.1 SEMEJANZA GEOMETRICA:.....	21
2.2.3.2 SEMEJANZA CINEMATICA:.....	22
2.2.3.3 SEMEJANZA DINAMICA:.....	24
2.2.4 LEYES DE SEMEJANZA DINAMICA.....	26



UNIVERSIDAD DE CUENCA

2.2.4.1	RELACION DE REYNOLDS	26
2.2.4.2	RELACION DE FROUDE.....	27
2.2.5	CONSIDERACIONES DE LA ESCALA EN LOS MODELOS	31
2.2.5.1	EFFECTOS DE ESCALA	31
2.3	ASPECTOS HIDRÁULICOS RELACIONADOS AL DISEÑO DE UNA OBRA DE DISIPACIÓN.....	32
2.3.1	RESALTO HIDRÁULICO	32
2.3.1.1	TIPOS DE RESALTOS.....	34
2.3.1.2	PÉRDIDA DE ENERGÍA.	36
2.3.1.3	EFICIENCIA	36
2.3.1.4	LONGITUD DEL RESALTO	37
2.3.1.5	RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE.....	39
2.3.1.6	RESALTO HIDRÁULICO COMO DISIPADOR DE ENERGÍA.....	40
2.3.2	DISIPACIÓN DE LA ENERGÍA EN UNA OBRA HIDRÁULICA.	42
2.3.2.1	CUENCO DE DISIPACION.	43
2.3.2.2	TIPOS DE CUENCO DE DISIPACION	44
2.3.3	MODELO DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA SAF.....	47
CAPITULO 3: MATERIALES Y METODOS		56
3.1	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO BULUBULU-CAÑAR-NARANJAL Y DE LOS COMPONENTES HIDRÁULICOS DE LA ESTRUCTURA DE DERIVACIÓN.....	56
3.2	EQUIPAMIENTO Y LABORATORIOS.....	59
3.3	METODOLOGÍA.....	62
3.3.1	IDENTIFICACIÓN DE LOS PROCESOS HIDRÁULICOS Y DE VARIABLES RELACIONADAS AL ESTUDIO.....	63
3.3.2	ANÁLISIS DE SIMILITUD Y SEMEJANZA.	64
	DISEÑO DEL MODELO DEL AZUD Y CUENCO DISIPADOR DE ENERGÍA.....	68
3.3.3	CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO.	73



3.3.4	DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN PARA EL RANGO DE CAUDALES EN EL MODELO.....	77
3.3.5	VALIDACIÓN DE LA CURVA DE DESCARGA	79
3.3.6	DISEÑO EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DEL MODELO FÍSICO Y TOMA DE DATOS.	81
3.3.6.1	DESCRIPCIÓN DE VARIABLES DE ESTUDIO	81
3.3.6.2	TOMA DE DATOS.....	87
CAPITULO 4: EXPERIMENTACION EN EL MODELO HIDRAULICO DE LA DERIVADOA CAÑAR		
92		
4.1	RECOPIACIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LA EXPERIMENTACIÓN.....	92
4.1.1	ANÁLISIS DE LA NORMALIDAD DE LAS MUESTRAS.....	99
4.1.1.1	GRÁFICOS CUANTIL-CUANTIL (Q-Q PLOTS)	99
4.1.2	ANÁLISIS DE VARIABLES DEPENDIENTES	100
4.1.2.1	EN FUNCIÓN DEL CAUDAL:	102
4.1.2.1.1	DIAGRAMAS DE CAJA:.....	102
4.1.2.1.2	ANOVA Q:	103
4.1.2.1.3	PRUEBA DE TUKEY:.....	103
4.1.2.2	EN FUNCIÓN DE P (PARAMENTO DEL AZUD)	104
4.1.2.2.1	DIAGRAMAS DE CAJA:.....	104
4.1.2.2.2	ANOVA P:.....	104
4.1.2.3	EN FUNCIÓN DE H (ALTURA AGUAS ARRIBA DEL AZUD).....	105
4.1.2.3.1	DIAGRAMAS DE CAJA:.....	105
4.1.2.3.2	ANOVA H:	106
4.1.2.3.3	PRUEBA DE TUKEY.....	106
4.1.2.4	EN FUNCIÓN DE Y3 (ALTURA AGUAS ABAJO)	107
4.1.2.4.1	DIAGRAMAS DE CAJA.....	107



UNIVERSIDAD DE CUENCA

4.1.2.4.2	ANOVA Y3.....	108
4.1.2.5	EN FUNCIÓN DE D (DIÁMETRO DE LAS PARTÍCULAS DEL ZAMPEADO)	108
4.1.2.5.1	DIAGRAMAS DE CAJA.....	108
4.1.2.5.2	ANOVA D	109
4.1.2.6	EN FUNCIÓN DE Z (PROFUNDIDAD DEL CUENCO)	110
4.1.2.6.1	DIAGRAMAS DE CAJA.....	110
4.1.2.6.2	ANOVA Z.....	110
4.1.2.6.3	PRUEBA DE TUKEY.....	111
CAPITULO 5: RESULTADOS Y DISCUSION		112
5.1	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.	112
5.2	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	114
BIBLIOGRAFIA		119
ANEXOS		120
	ANEXO 1: PLANOS DE LA DERIVADORA CAÑAR I y II.	121
	ANEXO 2: FORMATO PARA TOMA DE DATOS	122



ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRAFICO 2-1: SIMILITUD GEOMETRICA.....	22
GRAFICO 2-2: SIMILITUD CINEMATICA	23
GRAFICO 2-3: SIMILITUD DINAMICA	25
GRAFICO 2-4 ETAPAS DE LA DISIPACION DE ENERGIA.....	32
Grafico 2-5 RESALTO HIDRAULICO	33
GRAFICO 2-6 TIPOS DE RESALTO	35
GRAFICO 2-7 LONGITUD DEL REMOLINO TURBULENTO Y LONGITUD DEL SALTO	37
GRAFICO 2-8 LONGITUD EN TERMINOS DE LA PROFUNDIDA y_2 DE RESALTOS EN CANALES HORIZONTALES.....	38
GRAFICO 2-9 TIPOS DE RESALTO EN CANALES CON PENDIENTE	40
GRAFICO 2-10 EFECTO DE LA PROFUNDIDA DE SALIDA EN LA FORMACION DEL RESALTO AGUAS ABAJO DE UN VERTEDERO O POR DE BAJO DE UNA COMPUERTA DESLIZANTE .	41
GRAFICO 2-11 TIPOS DE DISIPADORES	43
GRAFICO 2-12 ESQUEMA DE PISCINAS UBSR.....	46
GRAFICO 2-13: ESQUEMA DE UN CUENCO DISIPADOR.....	47
GRAFICO 2-14: VARIABLES Y_1 Y Y_2 EN EL CUENCO S.A.F	49
GRAFICO 2-15: LONGITUD DEL CUENCO	50
GRAFICO 2-16: VISTA LATERAL DE BLOQUES DE FONDO Y DE RAPIDA.....	51
GRAFICO 2-17: VISTA EN PLANTA DE LOS BLOQUES DE RAPIDA Y DE FONDO	53
GRAFICO 2-18: ALTURA DEL UMBRAL DE SALIDA h_4	54
GRAFICO 3-1: UBICACION GENERAL DEL PROYECTO	58
GRAFICO 3-2: CANAL ARMFIELD.....	59
GRAFICO 3-3: BOMBA NECO	60
GRAFICO 3-4: MEDIDOR DE NIVEL	60
GRAFICO 3-5: MICROMOLINETE	61



GRAFICO 3-6: MOLINETE	61
GRAFICO 3-7: FLOW TRACKER	61
GRAFICO 3-8: VARIABLES ASOCIADAS.....	64
GRAFICO 3-9: VARIABLES PARA EL DIMENSIONAMIENTO (CORTE Y PLANTA).....	65
GRAFICO 3-10: MODELO ESCALADO	70
GRAFICO 3-11: COORDENADAS AZUD PROTOTIPO	73
GRAFICO 3-12: COORDENADAS AZUD MODELO.....	73
GRAFICO 3-13: MODELO DEL AZUD	73
GRAFICO 3-14: ESQUEMA PROFUNDIZACION DEL CUENCO EN TRES NIVELES	74
GRAFICO 3-15: ZAMPEADO E IMPLEMENTACION DE ESTRUCTURAS	75
GRAFICO 3-16: CURVA Q VS Y	79
Grafico 3-17: PERFILES DE VELOCIDAD	80
GRAFICO 3-18: CURVA DE DESCARGA VALIDADADA.....	81
GRAFICO 3-19: VARIABLES DE DISEÑO.....	82
GRAFICO 3-20. CUENCO DISIPADOR SAF, POSICIÓN 1	82
.GRAFICO 3-21. CUENCO DISIPADOR SAF, POSICIÓN 2	83
GRAFICO 3-22. CUENCO DISIPADOR SAF, POSICIÓN 3	83
GRAFICO 3-23: VARIACIONES DE Z.....	85
GRAFICO 3-24: VARIACION DE P.....	86
GRAFICO 3-25: ESQUEMA DE ENSAYOS POSICION Z1	86
GRAFICO 3-26: CONDICIONES DE FLUJO PARA UN CALADO AGUAS ABAJO DE 3,50 M (PROTOTIPO).....	88
GRAFICO 3-27: ENSAYO PARA: $h = 0$; $P = 13,7$ cm; $D = 50 - 20$ cm; $Q = 19$ l/s, VALORES DEL CALADO AGUAS ABAJO DE (a) 2,60 (b) 2,50 (c) 2,40.....	88
GRAFICO 3-28: ALTURA CRÍTICA EN EL AZUD.....	90
GRAFICO 4-1: ENSAYO CONDICIONES DE DISEÑO PARA: (a) $P = 13.7$ cm, (b) $P = 6.8$ cm (c) P $= 0.00$ cm.....	93



GRAFICO 4-2: DISTRIBUCION MUESTRAL PARA Y1	99
GRAFICO 4-3: DISTRIBUCION DE MUESTRAS PARA LONGITUD DE RESALTO	100
GRAFICO 4-4: DIAGRAMAS DE CAJA PARA Y1 Y LONGITUD DE RESALTO EN FUNCIÓN DEL CAUDAL	102
GRAFICO 4-5: DIAGRAMAS DE CAJA PARA Y1 Y LONGITUD DE RESALTO EN FUNCIÓN DEL PARAMENTO DEL AZUD	104
GRAFICO 4-6:DIAGRAMAS DE CAJA PARA Y1 Y LONGITUD DE RESALTO EN FUNCIÓN DE LA ALTURA AGUAS ARRIBA DEL AZUD H.....	105
GRAFICO 4-7: DIAGRAMAS DE CAJA PARA Y1 Y LONGITUD DE RESALTO EN FUNCIÓN DE LA ALTURA AGUAS ABAJO DEL AZUD Y3	107
GRAFICO 4-8: DIAGRAMAS DE CAJA PARA Y1 Y LONGITUD DE RESALTO EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO DE LAS PARTÍCULAS DEL ZAMPEADO D.....	109
GRAFICO 4-9: DIAGRAMAS DE CAJA PARA Y1 Y LONGITUD DE RESALTO EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL CUENCO Z	110
GRAFICO 5-1 CALADO CONTRAIDO Y1 PARA POSICION 1	115
GRAFICO 5-2 CALADO CONTRAIDO Y1 PARA POSICION 3	117



LISTA DE TABLAS

TABLA 2-1 CLASIFICACION DE LOS RESALTOS HIDRAULICOS EN CANALES RECTANGULARES HORIZONTALES.....	35
TABLA 2-2 TIPOS ESTANDAR DE DISIPADORES DE ENERGIA	45
TABLA 3-1: DIMENSIONES DEL PROTOTIPO Y DEL MODELO ESCALADO	68
TABLA 3-2: COORDENADAS DEL AZUD PARA EL PROTOTIPO Y MODELO	72
TABLA 3-3: AFOROS DE VELOCIDAD MEDIA	78
TABLA 3-4: ALTURA AGUAS ABAJO DEL CUENCO (CALADO DE AGUA EN EL CANAL BYPASS)	89
TABLA 4-1 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DEL AZUD Y CUENCO DISIPADOR DE LA DERIVADORA CAÑAR	97
TABLA 4-2: Análisis ANOVA para Y1 y Longitud del Resalto en Función del Caudal	103
TABLA 4-3: PRUEBA DE TUKEY PARA Y1 Y LONGITUD DEL RESALTO EN FUNCIÓN DEL CAUDAL	103
TABLA 4-4: ANÁLISIS ANOVA PARA Y1 Y LONGITUD DEL RESALTO EN FUNCIÓN DE P ...	104
TABLA 4-5: ANÁLISIS ANOVA PARA Y1 Y LONGITUD DEL RESALTO EN FUNCIÓN DE H ...	106
TABLA 4-6: PRUEBA DE TUKEY PARA Y1 Y LONGITUD DEL RESALTO EN FUNCIÓN DE H	106
TABLA 4-8: ANÁLISIS ANOVA PARA Y1 Y LONGITUD DEL RESALTO EN FUNCIÓN DE Y3 .	108
TABLA 4-9: ANÁLISIS ANOVA PARA Y1 Y LONGITUD DEL RESALTO EN FUNCIÓN DE Y3 .	109
TABLA 4-10: ANÁLISIS ANOVA PARA Y1 Y LONGITUD DEL RESALTO EN FUNCIÓN DE Z..	110
TABLA 4-11: PRUEBA DE TUKEY PARA Y1 Y LONGITUD DEL RESALTO EN FUNCIÓN DE Z111	



SIMBOLOGIA

λL :	Escala de longitudes.
L_{modelo} :	Longitud del modelo
$L_{\text{prototipo}}$:	Longitud del prototipo
V_{modelo} :	Velocidad en el modelo.
$V_{\text{prototipo}}$:	Velocidad en el prototipo
λV :	Escala de velocidades.
t_{modelo} :	Tiempo en el modelo.
$t_{\text{prototipo}}$:	Tiempo en el prototipo.
λt :	Escala de tiempos.
$F_m; F_p$:	Fuerzas en el modelo/prototipo.
$M_m; M_p$:	Masas en el modelo/prototipo.
$a_m; a_p$:	Aceleración en el modelo/prototipo.
R :	Numero de Reynolds.
V :	Velocidad media.
ρ :	Densidad.
L :	Longitud característica.
μ :	Viscosidad dinámica.
ν :	Viscosidad cinemática.
γ_1 :	Calado contraído.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

y_2 :	Calado conjugado de y_1 .
y_3 :	Calado aguas abajo del cuenco.
P :	Altura del paramento.
z :	Desnivel del cuenco.
D :	Diámetro de la partícula del enrocado.
H_0 :	Carga sobre al azud.
L_B :	Longitud del cuenco.
y_c :	Calado crítico.
$h_1; h_2$:	Altura de bloques.
N_C :	Número de bloques de rápida.
W_B :	Ancho del pie del vertedero.
N_B :	Número de bloques de fondo.
W_{B2} :	Ancho del cuenco dissipador.
h_4 :	Umbral de salida.
L_r :	Longitud del resalto.



DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS VARIABLES ASOCIADAS AL CONTROL DE FLUJO A TRAVÉS DE UN MODELO FÍSICO, EN UN CUENCO DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA TIPO SAF DE LA DERIVADORA CAÑAR

CAPITULO 1: INTRODUCCION

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

- El objetivo general es estudiar el comportamiento de las variables que intervienen en el proceso de disipación de energía en una obra tipo SAF para la derivadora Cañar a través de un modelo físico.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar experimental de los parámetros asociadas a los fenómenos de flujo en un cuenco disipador
- Conocer y verificar el comportamiento del flujo en el azud y cuenco disipador para la derivadora Cañar.
- Verificar las características de funcionamiento hidráulico de las estructuras para caudales de interés del proyecto y bajo diferentes condiciones de cuenco disipador.



1.2 ALCANCE

En el presente trabajo se ha realizado e investigado la determinación experimental de las variables asociadas al control de flujo a través de un modelo físico, en un cuenco de disipación de energía tipo SAF de la derivadora Cañar, habiéndose obtenido los siguientes puntos concretos:

1. Un modelo físico construido para el azud y el cuenco disipador tipo SAF para la obra de derivación del PROYECTO DE CONTROL DE INUNDACIONES BULUBULU-CAÑAR-NARANJAL ubicada en el Río Cañar.
2. Un manuscrito que sistematice la experimentación realizada para la determinación cuantitativa de las variables del proceso estudiado y que se convierta en un complemento de posteriores estudios para el desarrollo de una publicación científica dentro del programa de fortalecimiento de los Laboratorios de Hidráulica del Programa para el Manejo del Agua y del Suelo de la Facultad de Ingeniería y de la Universidad de Cuenca.

1.3 ANTECEDENTES

Uno de los principales problemas que adolece la zona baja de las cuencas hidrográficas de los ríos Bulubulu, Cañar, Naranjal entre otros, está relacionado a los fenómenos hidrológicos y de flujo en cauces que se traducen en eventos de inundación. En este sentido la Comisión de Estudios para el Desarrollo de la Cuenca del Río Guayas y La Península de Santa Elena (CEDEGE) ha financiado un estudio para control de inundaciones a ser ejecutado por la Asociación de Compañías Consultoras, CONSULTORÍA TÉCNICA ACSAM, en convenio con el Programa para el Manejo del Agua y del Suelo PROMAS de la Universidad de Cuenca para el desarrollo y estudio de modelos físicos. De esta manera se ha llevado a cabo la modelización hidráulica en modelo físico a escala reducida para un cuenco de disipación de energía tipo SAF (Saint Anthony Falls) para las obras de derivación de caudales en el Río Cañar, en el sector de la junta con el estero de Pancho Negro.



1.4 JUSTIFICACION

A diferencia de otros campos del trabajo científico, la ingeniería hidráulica moderna ha estado y sigue estando basada en gran medida en la experimentación, muchos de los fenómenos que ocurren en la naturaleza son tan complejos que no se pueden tratar simplemente con métodos matemáticos, por lo que es necesario emplear técnicas experimentales como herramientas en la obtención de soluciones prácticas aplicadas a problemas de ingeniería. Frecuentemente el estudio en modelos hidráulicos se emplea como ayudas en el diseño, al permitir la visualización del flujo (en tres dimensiones) y posibilitar la obtención de cierta información numérica.

Para el análisis de obras hidráulicas es indispensable predecir en forma adecuada el comportamiento de las estructuras hidráulicas, las condiciones de operación y situaciones de emergencia; por lo que durante las etapas de proyecto se necesita de una herramienta de predicción confiable, teniendo presente que muchos de los problemas de la hidráulica, no pueden resolverse mediante el empleo de técnicas analíticas exclusivamente.

EL PROYECTO DE CONTROL DE INUNDACIONES BULUBULU-CAÑAR-NARANJAL, constituye una obra de gran envergadura debido a su magnitud y a los caudales que esta manejará, por lo que se consideró necesario realizar modelos físicos a escala con la finalidad de estudiar de una manera directa los fenómenos que el flujo producirá en las estructuras, especialmente en el cuenco disipador SAF.



CAPITULO 2: MARCO TEORICO

2.1 GENERALIDADES

Los modelos físicos son objetos escalados que representan estructuras de tamaño real. Constituyen la principal herramienta dentro de la investigación, su principal ventaja está en permitir a los investigadores hidráulicos representar fenómenos que a simple vista en la estructura real, serían muy difíciles de apreciar debido a factores como accesibilidad y tamaño de las estructuras. Los modelos permiten así abstraer los fenómenos que en el prototipo juegan roles importantes de esta manera obtener parámetros de diseño más exactos y representativos de la naturaleza del flujo

Para que un modelo hidráulico sea representativo de un fenómeno específico, debe existir una estrecha correlación entre modelo y prototipo, esta correlación se denomina semejanza.

La semejanza hace relación a magnitudes que se pueden reproducir a escalas apropiadas tales como:

- a. Geométricas: Longitudes, Áreas y Volúmenes con sus formas.
- b. Cinemáticas: tiempos, velocidades, aceleraciones, caudales.
- c. Dinámicas: Masas, Fuerzas, presiones, pesos específicos, cantidades de movimiento, energías, tensiones superficiales, densidades, viscosidades

2.2 MODELOS HIDRAULICO

2.2.1 PROTOTIPO:

La palabra prototipo hace referencia a la estructura hidráulica de interés, es decir a la obra física, real o proyectada sobre la cual se va a investigar y a modelar con el fin de verificar o constatar las diferentes variables que intervienen en su funcionamiento.



2.2.2 MODELO:

Los modelos hidráulicos se dividen en dos grandes grupos:

2.2.2.1 MODELOS MATEMATICOS

El conjunto de hipótesis y relaciones de las variables que describen un fenómeno hidráulico, constituyen un modelo matemático (ecuaciones), y este a su vez conduce a un problema matemático, el mismo que se debe resolver mediante técnicas apropiadas.¹

En los modelos matemáticos deben tomarse en cuenta los siguientes factores:

- Exactitud de los datos iniciales
- Tipo de fenómeno a estudiar
- Exactitud de las ecuaciones que rigen el fenómeno
- Forma de aproximar las ecuaciones y evolución del modelo.

2.2.2.2 MODELOS FISICOS REDUCIDOS

Un modelo físico es una representación que se hace del prototipo con el propósito de estudiar detalladamente el comportamiento de la estructura, o parte de ella, bajo ciertas circunstancias preestablecidas de flujo.

Usualmente, y de forma particular en la hidráulica, el modelo físico es más pequeño, en tamaño, que el prototipo que representa, pero existe correspondencia entre uno y otro de manera inequívoca.

De acuerdo a la escala los modelos reducidos pueden ser:

¹http://fluidos.eia.edu.co/obrashidraulicas/articulos/modelacionhidraulica/modelacion_hidraulica.html



- a. **Modelos verdaderos:** Tienen todas las características significativas del prototipo reproducidas a escala, que es lo que se conoce como semejanza geométrica y además satisfacen todas las restricciones del diseño, semejanza cinemática y dinámica.
- b. **Modelos distorsionados:** Cuando las escalas estimadas como adecuadas suponen unas dimensiones que desbordan las posibilidades del correspondiente laboratorio, o cuando la necesidad de modelar otros efectos que requieren de dimensiones grandes en los modelos se vuelven un problema, una vía de salida a estas dificultades es la distorsión de escalas, lo cual consiste en relativizar la semejanza geométrica. Normalmente se realiza en flujos en régimen libre, pues en flujo cerrado suele no ser necesarios, la distorsión consiste en utilizar distinta escala para las magnitudes geométricas horizontales y las verticales, lo cual invariablemente se hace magnificando las magnitudes verticales respecto de las horizontales. De aquí que según el estudio que se pretenda hacer dentro de un modelo se debe tomar en cuenta los denominados **efectos de escala** y las distorsiones introducidas por fuerzas que no son la fuerza dominante en la que se basa el modelo.

Se pueden además clasificar a los modelos reducidos según las condiciones del lecho en los mismos de la siguiente manera:

- a. **Modelos de fondo fijo:** En estos modelos no existe modificación en su contorno debido al flujo de agua. Estos se utilizan en modelos en los que no es importante el movimiento del fondo. Los modelos no distorsionados de fondo fijo representan adecuadamente flujos supercríticos, transiciones, patrones de onda, o perfiles de superficie de agua. Para la representación de la capacidad de un canal o su capacidad de almacenamiento es recomendable usar un modelo distorsionado de fondo fijo.
- b. **Modelos de fondo móvil:** Este tipo de modelos se construyen cuando se desea representar arrastre de los materiales que componen los taludes y el fondo de un canal. Con estos modelos se pueden estudiar los siguientes problemas:
 - Morfología de ríos.
 - Encausamiento de ríos.
 - Desarrollo de llanuras de inundación.
 - Ubicación y diseño de pilas de puentes.



- Erosión debajo de cortinas.
- Cruces de tuberías, entre otros.

La operación de estos modelos en comparación de los modelos de fondo fijo suele ser más compleja debido a dos características, principalmente:

1. La rugosidad de frontera del modelo no está controlada por el diseño sino por el movimiento del sedimento y su efecto en la forma del fondo.
2. La dificultad de simulación del movimiento del agua y principalmente del sedimento del prototipo.

2.2.3 SEMEJANZA HIDRAULICA

Al emplear modelos hidráulicos reducidos, se debe tener en cuenta que deben satisfacerse ciertas condiciones que relacionan magnitudes físicas homólogas definidas entre modelo y prototipo, es decir la semejanza entre los dos sistemas.

La semejanza hidráulica se obtiene según la magnitud que se analice, se tiene entonces:

2.2.3.1 SEMEJANZA GEOMETRICA:

Entre modelo y prototipo existe semejanza geométrica cuando todas las relaciones de las dimensiones homólogas en cualquier dirección son iguales, es decir:

Ecuación 2-1

$$\frac{L_{\text{modelo}}}{L_{\text{prototipo}}} = \lambda L$$

Dónde:

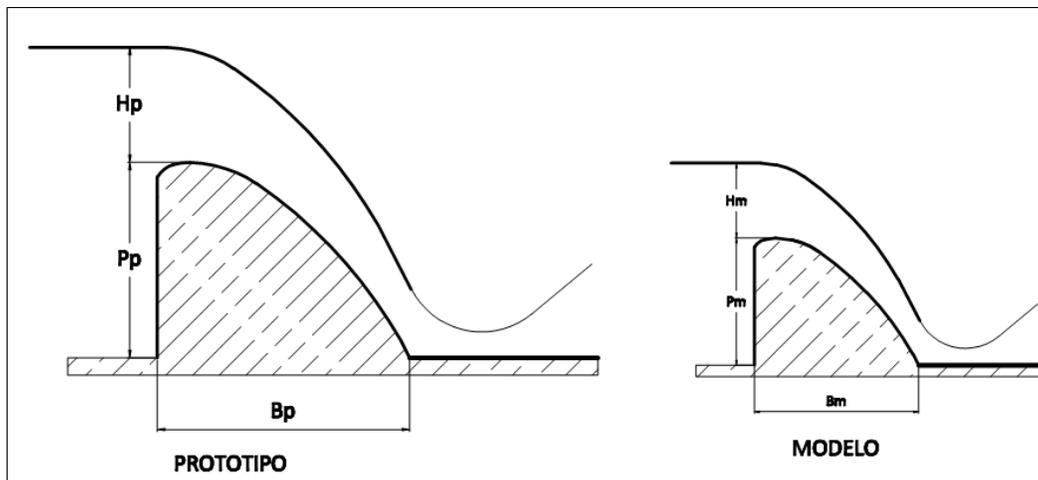
L_{modelo} : Longitud del modelo

$L_{\text{prototipo}}$: Longitud del prototipo



λL : Escala de longitudes.

GRAFICO 2-1: SIMILITUD GEOMETRICA



2.2.3.2 SEMEJANZA CINEMATICA:

Cuando la comparación entre el prototipo y modelo es con respecto a un movimiento, se establece entonces la similitud cinemática. El principio se basa en que dentro del modelamiento, partículas homólogas llegan a puntos homólogos en tiempos homólogos.

La semejanza cinemática se cumple bajo dos condiciones:

1. Cuando las trayectorias de las partículas móviles homólogas son geoméricamente semejantes.
2. Cuando la relación entre las velocidades de las partículas homólogas son iguales

Teniendo así las siguientes relaciones:



$$\frac{V_{\text{modelo}}}{V_{\text{prototipo}}} = \lambda V$$

$$\frac{t_{\text{modelo}}}{t_{\text{prototipo}}} = \lambda t$$

Dónde:

V_{modelo} : Velocidad en el modelo.

$V_{\text{prototipo}}$: Velocidad en el prototipo

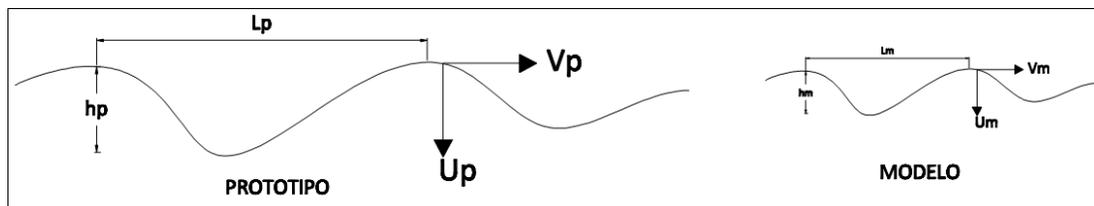
λV : Escala de velocidades.

t_{modelo} : Tiempo en el modelo.

$t_{\text{prototipo}}$: Tiempo en el prototipo.

λt : Escala de tiempos.

GRAFICO 2-2: SIMILITUD CINEMATICA



El cumplimiento de este tipo de semejanza obliga a que haya similitud geométrica; cuando ambas se cumplen, las direcciones del flujo en puntos homólogos del prototipo y modelo son semejantes, es decir, la forma de las líneas de corriente es la misma en modelo y prototipo.



En el GRAFICO 2-2 se representa un ejemplo de similitud cinemática teniendo así el cumplimiento de las siguientes relaciones:

Escala de velocidad eje x:

$$\frac{V_m}{V_p} = \lambda V$$

Escala de velocidad eje y:

$$\frac{U_m}{U_p} = \lambda U$$

Escala de amplitudes:

$$\frac{h_m}{h_p} = \lambda h$$

Escala de longitudes:

$$\frac{L}{L_p} = \lambda L$$

2.2.3.3 SEMEJANZA DINAMICA:

Cuando dos sistemas son semejantes geométrica y cinemáticamente, existe semejanza dinámica si las relaciones entre las fuerzas homólogas en modelo y prototipo son las mismas.

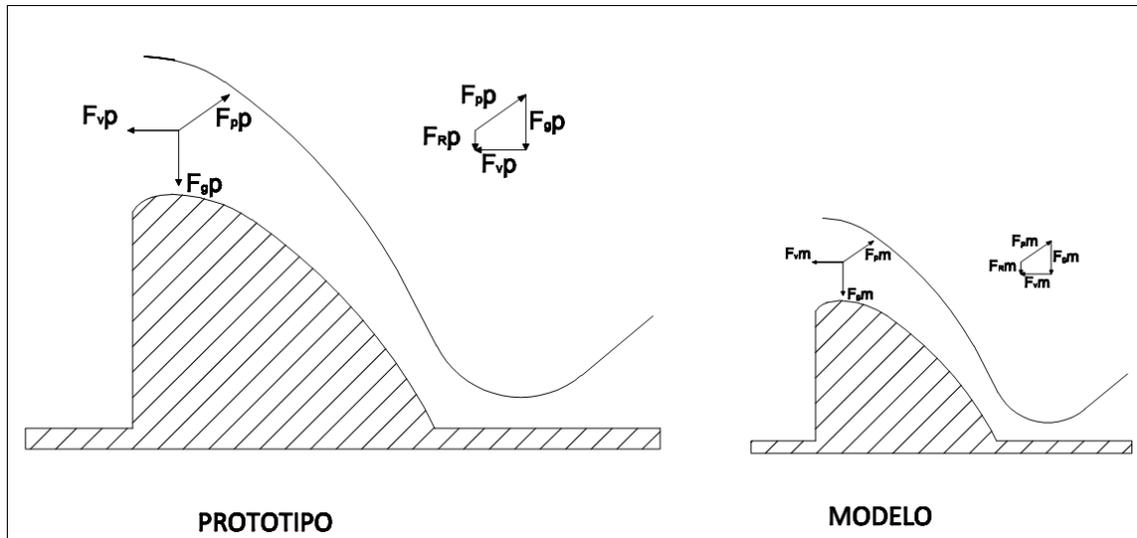
Las condiciones que determinan la semejanza dinámica están dadas por la segunda ley del movimiento de Newton:

Ecuación 2-4

$$\sum F = M \cdot a$$



GRAFICO 2-3: SIMILITUD DINAMICA



Las fuerzas que intervienen pueden ser: viscosas, presión, gravitatorias, tensión superficial, elásticas. La relación entre modelo y prototipo está dada por:

Ecuación 2-5

$$\frac{\sum F_m}{\sum F_p} = \frac{M_m * a_m}{M_p * a_p}$$

Dónde:

F_m, F_p : Fuerzas en el modelo/prototipo.

M_m, M_p : Masas en el modelo/prototipo.

a_m, a_p : Aceleración en el modelo/prototipo.

Estas relaciones entre Fuerzas, definen los siguientes parámetros adimensionales:



2.2.4 LEYES DE SEMEJANZA DINAMICA

En la semejanza dinámica se establece que las fuerzas homólogas entre modelo y prototipo en direcciones iguales guardan la misma proporción.

Dentro del escurrimiento y dependiendo de la naturaleza del mismo puede haber predominio de ciertas fuerzas sobre las demás pudiendo considerar a estas últimas despreciables. Partiendo de estas consideraciones se puede hacer cumplir ciertas relaciones entre las escalas de modelo y prototipo si existen fuerzas claramente predominantes en el flujo, alcanzando de esta manera alta precisión dinámica.

Entre las principales relaciones se tiene:

2.2.4.1 RELACION DE REYNOLDS

Cuando las fuerzas viscosas en la escorrentía son más representativas que las fuerzas de inercia se establece este tipo de semejanza, cuando la relación entre el número de Reynolds en el modelo y el prototipo es uno:

Ecuación 2-6

$$\frac{R_m}{R_p} = 1$$

Dónde:

R_m : Número de Reynolds en el modelo.

R_p : Número de Reynolds en el prototipo.

Como:

$$R = \frac{V \cdot L}{\nu}$$

Entonces:



$$\frac{V_m \cdot L_m}{\frac{u_m}{\frac{V_p \cdot L_p}{u_p}}} = 1$$

$$\frac{V_m \cdot L_m}{u_m} = \frac{V_p \cdot L_p}{u_p}$$

$$\frac{V_m}{V_p} = \frac{u_m}{u_p} \cdot \frac{L_p}{L_m}$$

Ecuación 2-7

$$\lambda V = \frac{\lambda v}{\lambda L}$$

Entonces con este tipo de relación es posible modelar con dos diferentes fluidos y obtener las dimensiones y velocidades tanto para el modelo como para el prototipo.

2.2.4.2 RELACION DE FROUDE

Cuando las fuerzas predominantes en el flujo son las fuerzas debidas a la gravedad sobre las fuerzas viscosas se establece la siguiente relación:

Ecuación 2-8

$$\frac{F_m}{F_p} = 1$$

Dónde:

F_m : Número de Froude en el modelo.

F_p : Número de Froude en el prototipo.

Como:



$$F = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}}$$

Entonces:

$$\frac{\frac{V_m}{\sqrt{g_m \cdot L_m}}}{\frac{V_p}{\sqrt{g_p \cdot L_p}}} = 1$$

$$\frac{V_m}{\sqrt{g_m \cdot L_m}} = \frac{V_p}{\sqrt{g_p \cdot L_p}}$$

$$\frac{V_m}{V_p} = \frac{\sqrt{g_m \cdot L_m}}{\sqrt{g_p \cdot L_p}}$$

Al ser la gravedad constante e invariable para este tipo de modelos se tiene:

$$\frac{\sqrt{g_m}}{\sqrt{g_p}} = 1$$

$$\frac{V_m}{V_p} = \frac{\sqrt{L_m}}{\sqrt{L_p}}$$

Definiendo:

La escala de velocidades:

$$\lambda V = \frac{V_m}{V_p}$$

La escala de longitudes:



$$\lambda L = \frac{L_m}{L_p}$$

Se tiene entonces:

$$\lambda V = \sqrt{\lambda L} = \lambda L^{1/2}$$

De la ecuación de continuidad se tiene que:

$$Q = V \cdot A$$

Dónde:

Q : Caudal.

V : Velocidad.

A : Sección del flujo.

La escala de áreas corresponde a:

$$\lambda A = \lambda L^2$$

Por tanto la escala de caudales queda definida por:

$$\lambda Q = \lambda L^{1/2} \cdot \lambda L^2$$

$$\lambda Q = \lambda L^{5/2}$$

Sabiendo que:

$$\lambda Q = \frac{Q_m}{Q_p}$$



Entonces es posible determinar la relación de los caudales para el modelo a partir del prototipo una vez que se ha elegido la escala de longitud para el modelo.

Los tiempos correspondientes para los eventos en prototipo y modelo están relacionados de la siguiente manera:

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

Si:

$$\lambda t = \frac{t_m}{t_p}$$

Entonces:

$$\lambda t = \frac{\frac{L_m}{V_m}}{\frac{L_p}{V_p}}$$

$$\lambda t = \frac{L_m \cdot V_p}{L_p \cdot V_m}$$

$$\lambda t = \frac{\lambda L}{\lambda V}$$

Reemplazando λV :

$$\lambda t = \frac{\lambda L}{\lambda L^{1/2}}$$

Por lo tanto:



$$\lambda t = \lambda L^{1/2}$$

Con esta relación se pueden determinar los tiempos tanto para el prototipo como para el modelo en función de la escala de longitud.

2.2.5 CONSIDERACIONES DE LA ESCALA EN LOS MODELOS

La escala es la relación de las longitudes entre el modelo y el prototipo. La escala en la modelación hidráulica debe ser escogida de acuerdo a varios factores los mismos que deben ser tomados en cuenta para el correcto modelamiento, estos son:

- Espacio en el laboratorio.
- Facilidad de construcción.
- Disponibilidad de materiales.
- Disponibilidad de agua.
- Capacidad de bombeo.
- Precisión instrumental.
- Tiempo.
- Recursos económicos.

Usualmente para canales con superficie relativamente suave se emplean escalas 1/15 a 1/50.

2.2.5.1 EFECTOS DE ESCALA

Los efectos de escala pueden ser definidos como distorsiones introducidas por otras fuerzas que se consideran no predominantes para un determinado modelo. Estos ocurren cuando uno o más parámetros adimensionales son diferentes en el modelo y en el prototipo.

Los efectos de escala pueden ser pequeños pero no siempre despreciables por lo que se debe tener especial cuidado para evitarlos y así lograr modelos más representativos de un evento.

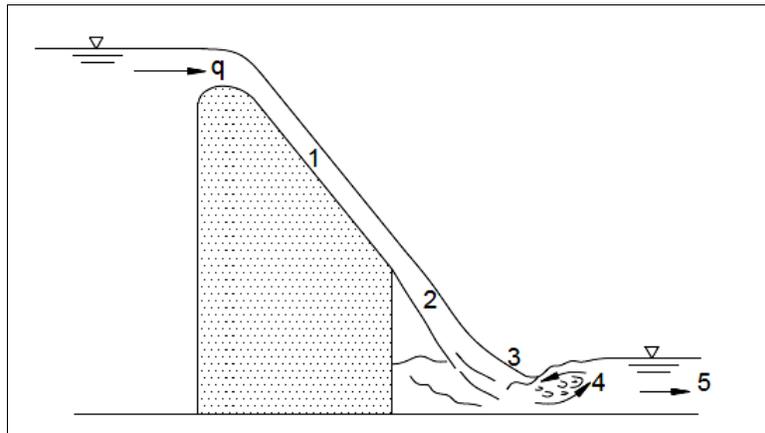


2.3 ASPECTOS HIDRÁULICOS RELACIONADOS AL DISEÑO DE UNA OBRA DE DISIPACIÓN.

El paso del agua desde el embalse hasta el tramo aguas abajo involucra varios fenómenos hidráulicos, se puede considerar cinco etapas en el proceso de disipación de energía, algunas de las cuales pueden estar combinadas o ausentes:

1. Sobre la superficie del vertedero
2. En el chorro de caída libre
3. En el Impacto en el pozo aguas abajo
4. En el resalto hidráulico
5. En el afluente del río

GRAFICO 2-4 ETAPAS DE LA DISIPACION DE ENERGIA



2.3.1 RESALTO HIDRÁULICO

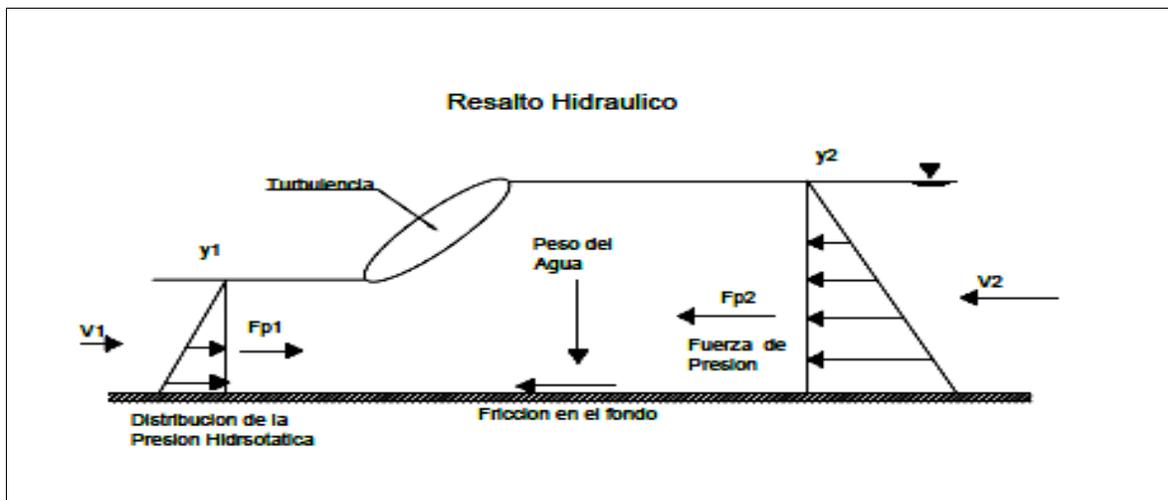
“En principio, la teoría del resalto corresponde a canales horizontales ligeramente inclinados en los que el peso del agua dentro del resalto tiene muy poco efecto sobre su comportamiento y, por consiguiente, no se considera en el análisis”. (Chow, 1994). La teoría antes señalada no servirá para los casos en que la pendiente del canal sea pronunciada (pendientes mayores al



10 por ciento (U. S. Department of Transportation, 2006)) ya que el peso del agua influirá en el resalto y por lo tanto se deberá incluir en el análisis.

El resalto hidráulico (GRÁFICO 2-5) es el cambio de flujo de un estado supercrítico a subcrítico, lo que produce turbulencia, aumento en el calado y una disminución en la velocidad, generando una pérdida de energía, y un cambio drástico en la sección transversal del flujo.

Grafico 2-5 RESALTO HIDRAULICO



ADAPTADO DE: (CHANSON, 2004)

Las relaciones entre las variables para el resalto hidráulico de un canal rectangular se obtienen mediante las siguientes ecuaciones:

Ecuación de la Continuidad:

$$V_1 \cdot y_1 = V_2 \cdot y_2$$

Ecuación de Momentum:



$$\frac{\gamma \cdot y_1^2}{2} - \frac{\gamma \cdot y_2^2}{2} = \rho \cdot V_2 \cdot (V_2 \cdot y_2) + \rho \cdot V_1 (-V_1 \cdot y_1)$$

Ecuación de la Energía:

$$\frac{V_1^2}{2g} + y_1 = \frac{V_2^2}{2g} + y_2 + h_f$$

Dónde:

V_1, V_2 : Velocidad de entrada y de salida del resalto respectivamente.

y_1, y_2 : Calado a la entrada y salida del resalto respectivamente.

g : Gravedad.

γ : Peso específico del agua

ρ : Densidad del agua.

h_f : Altura de pérdida de energía.

La resolución analítica de las ecuaciones de Momentum, Continuidad y Energía antes descritas conducen a:

Ecuación 2-9

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

2.3.1.1 TIPOS DE RESALTOS

Los resaltos hidráulicos en fondos horizontales pueden exhibir patrones de flujo diferentes dependiendo de las condiciones de flujo aguas arriba, los estudios del U.S Bureau of



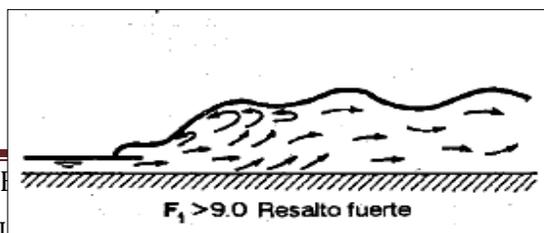
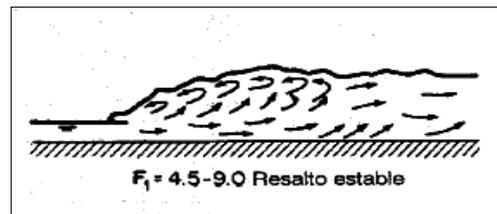
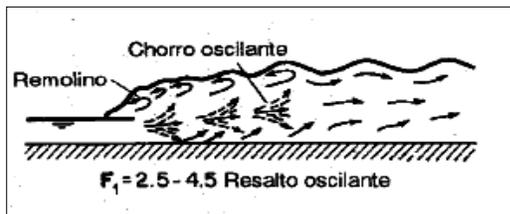
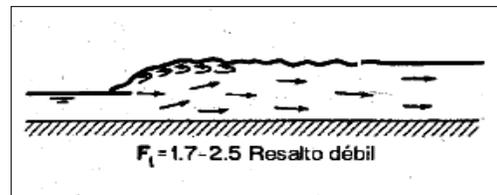
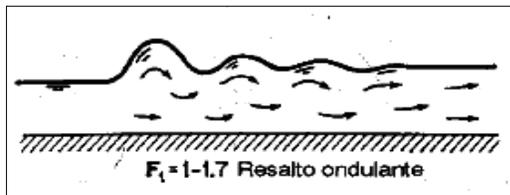
Reclamation (Tabla 1.1) los clasifican según el número de Froude (GRAFICA 2.6) del flujo en la sección contraída.

TABLA 2-1 CLASIFICACION DE LOS RESALTOS HIDRAULICOS EN CANALES RECTANGULARES HORIZONTALES

Fr (1)	Definición (2)	Comentarios (3)
1	Flujo crítico	No resalto hidráulico
1 a 1.7	Resalto ondular (resalto Fawer)	Ondulaciones de superficie libre se desarrollan aguas abajo del resalto sobre distancias considerables. Pérdidas de energía mínimas.
1.7 a 2.5	Resalto débil	Pérdidas bajas de energía.
2.5 a 4.5	Resalto oscilante	Superficie libre ondulante. Producción de grandes olas de periodo irregular. Resalto oscilante inestable. Cada oscilación irregular produce una ola grande que puede viajar lejos aguas abajo, dañando y erosionando las orillas. Es posible evitarlas.
4.5 a 9	Resalto estable	40 a 50% de disipación de energía. Resalto estable. Insensible a condiciones aguas abajo (es decir, profundidad de flujo de salida) Diseño más económico.
> 9	Resalto fuerte	Resalto brusco. Hasta 35% de disipación de energía. Riesgo de erosión del lecho de canal. Debe evitarse.

FUENTE: (Chow, 1994)

GRAFICO 2-6 TIPOS DE RESALTO





FUENTE (Chow, 1994)

2.3.1.2 PÉRDIDA DE ENERGÍA.

“En el resalto la pérdida de energía es igual a la diferencia de las energías antes y después del resalto” (Chow, 1994).

Ecuación 2-10

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

2.3.1.3 EFICIENCIA

La relación entre la energía específica antes y después del resalto se define como la eficiencia del resalto. Se puede mostrar que la eficiencia es:

Ecuación 2-11

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

La fórmula para la eficiencia del resalto es adimensional y está en función del número de Froude.



2.3.1.4 LONGITUD DEL RESALTO

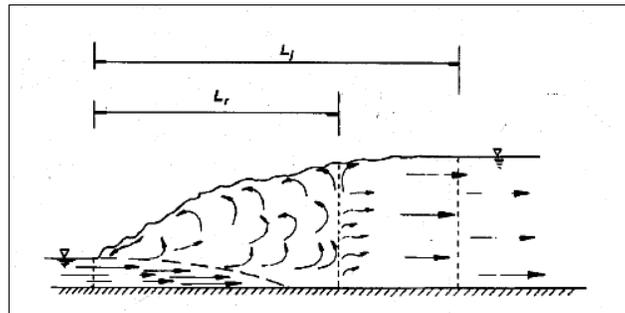
Para la determinar la longitud del resalto se han realizado varias investigaciones², pero hasta el momento no se dispone de un procedimiento teórico enteramente satisfactorio para su cálculo. En los resultados experimentales se notó serias contradicciones, por la confusión en la definición de la longitud del resalto y por las complicaciones mismas de la inestabilidad del fenómeno. Sin embargo se ha definido de una forma general como “la *distancia medida desde la cara frontal del resalto hasta un punto en la superficie inmediata aguas abajo del remolino (L_r)*” (Chow, 1994).

Por motivo de diseño fue necesario conocer la longitud que se desarrolló para así prever la extensión del recubrimiento que podría estar afectada por socavación o efectos erosivos.

En el resalto se pueden diferenciar dos longitudes; la primera es la longitud L_r , del remolino turbulento característico del salto y que termina en la parte de separación del flujo en las direcciones de avance y retroceso. Como se observa en el GRAFICO 2.7, el final del remolino se extiende sobre el total de la sección. Y por otra parte tenemos la longitud L_j , que empieza igualmente en la cara frontal del resalto y termina en la máxima altura de la superficie del agua y que además se estabiliza la distribución de la velocidad. En general se tiene que $L_r < L_j$ (SOTELO Avila, 2002).

GRAFICO 2-7 LONGITUD DEL REMOLINO TURBULENTO Y LONGITUD DEL SALTO

² (Matzake, Bakhmeteff, Columbia University.) (U.S Bureau of Reclamation)



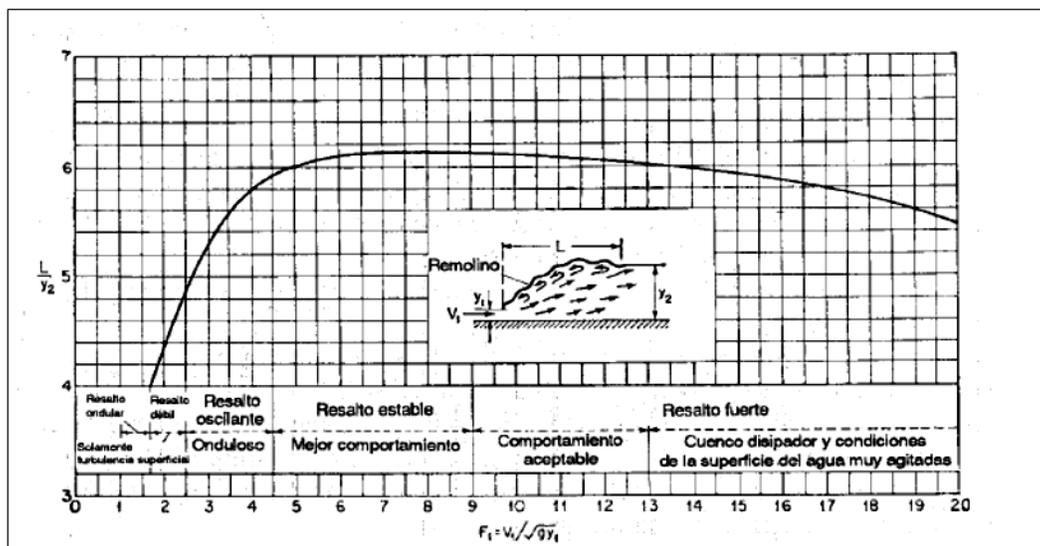
FUENTE: (SOTELO Avila, 2002)

En la GRAFICA 2.8 se presenta la curva mas utilizada y practica para determinar L_r . Sin embargo para los cálculos se resolvió estimar de la siguiente manera (Hager *et al.* 1990):

Ecuación 2-12

$$\frac{L_r}{y_1} = 160 \cdot \tanh \frac{F}{20} - 12 \quad 2 < F < 16$$

GRAFICO 2-8 LONGITUD EN TERMINOS DE LA PROFUNDIDA y_2 DE RESALTOS EN CANALES HORIZONTALES



FUENTE: (Chow, 1994)



2.3.1.5 RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON PENDIENTE

La ecuación de momento utilizada para los canales horizontales no se puede aplicar directamente a los resaltos hidráulicos en canales de pendiente pronunciada ya que el peso del agua en el resalto debe ser considerado. La dificultad encontrada está en la definición del perfil superficial del agua para determinar el volumen dentro de los resaltos en canales con varias pendientes. Este volumen puede no ser tomado en cuenta para pendientes menores al 10 por ciento y por lo tanto el resalto será analizado como en un canal horizontal (U. S. Department of Transportation, 2006) Así la nueva ecuación que se deduce de la Ecuación del Momentum es:

Ecuación 2-13

$$\frac{Q \cdot (V_1 - V_2)}{g} = 0.5 \cdot B \cdot (y_1^2 - y_2^2) \cdot \cos\theta + \frac{\gamma \cdot (\sin\theta)}{\rho}$$

Dónde:

: Caudal.

Q

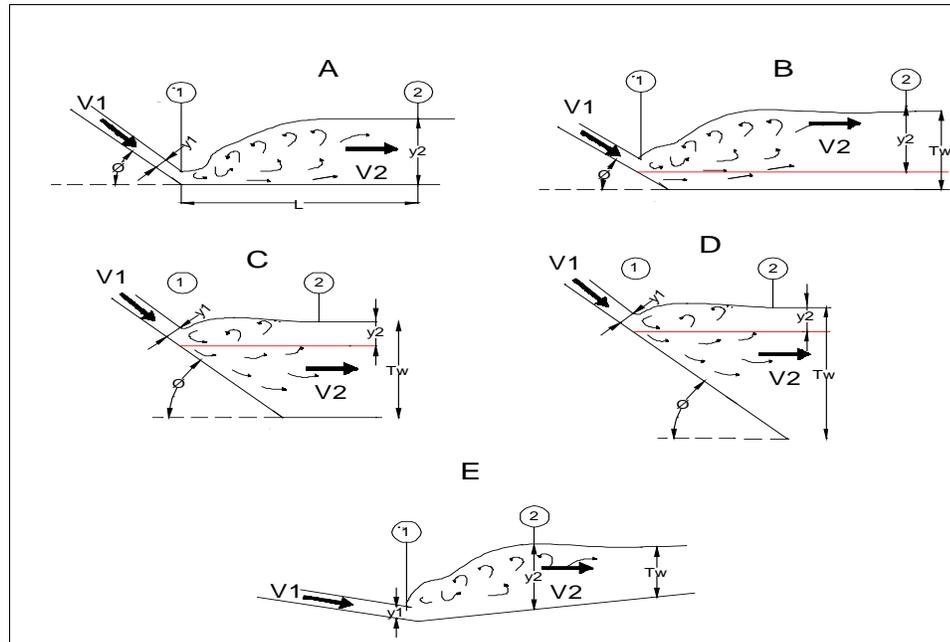
: Angulo de la pendiente del canal.

θ

Para los canales con pendiente positiva tenemos 4 tipos de resalto (A, B, C, D) que en este caso varían según el lugar de formación del mismo (GRAFICO 2-9). La pendiente puede también ser negativa o adverso (GRAFICO 2-9 (E)) pero para este caso en particular el cual no es muy frecuente no se dispone de datos experimentales adecuados y por lo tanto tampoco se tiene una fórmula confiable.



GRAFICO 2-9 TIPOS DE RESALTO EN CANALES CON PENDIENTE



ADAPTADO DE : (Bradley, 1961) , (Chow, 1994)

2.3.1.6 RESALTO HIDRÁULICO COMO DISIPADOR DE ENERGÍA

El resalto es aplicado para casos prácticos en las estructuras hidráulicas, como por ejemplo disipando la energía del agua que fluye sobre presas, vertederos y otras estructuras hidráulicas, y que por lo tanto previene de esta manera la socavación aguas abajo de las estructuras.

En la práctica, el cuenco disipador rara vez se diseña para confinar toda la longitud de un resalto hidráulico libre sobre la zona revestida, debido a que sería muy costoso. En consecuencia, a menudo se instalan accesorios para controlar el resalto dentro del cuenco. El principal propósito de este control es acortar el rango dentro del cual el resalto ocurrirá y por consiguiente reducir el tamaño y el costo del cuenco. El control tiene ventajas adicionales, debido a que mejora la función de disipación del cuenco, estabiliza la acción del resalto y, en algunos casos, incrementa el factor de seguridad (Chow, 1994) .Para el diseño del cuenco se debe tomar la siguiente consideración:



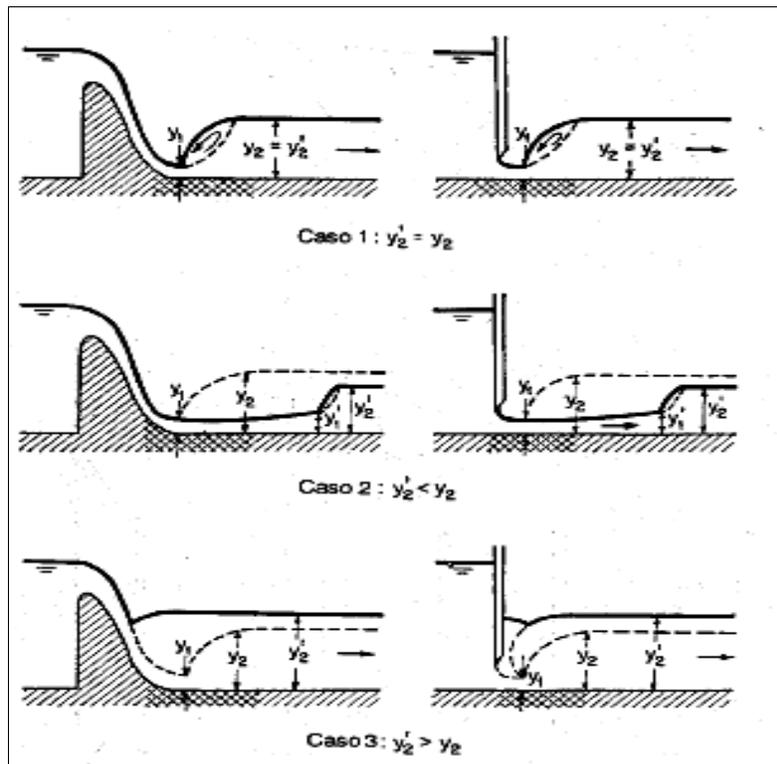
Posición del resalto: Existen tres modelos alternativos (GRAFICO 2.10) que permiten que un resalto se forme aguas abajo de un vertedero. La posición del resalto depende del calado aguas abajo y_2' y de la profundidad y_2 secuenta a y_1 .

Para el caso 1, $y_2' = y_2$ el resalto se forma inmediatamente luego de y_1 y se cumple la ecuación 2-1.

Para el caso $y_2' < y_2$ el resalto se desplaza aguas abajo hasta un punto donde se satisface nuevamente la ecuación 2-1.

Para el caso en que $y_2' > y_2$ el resalto se sumerge y este se forma hacia aguas arriba.

GRAFICO 2-10 EFECTO DE LA PROFUNDIDA DE SALIDA EN LA FORMACION DEL RESALTO AGUAS ABAJO DE UN VERTEDERO O POR DE BAJO DE UNA COMPUERTA DESLIZANTE



FUENTE (Chow, 1994)



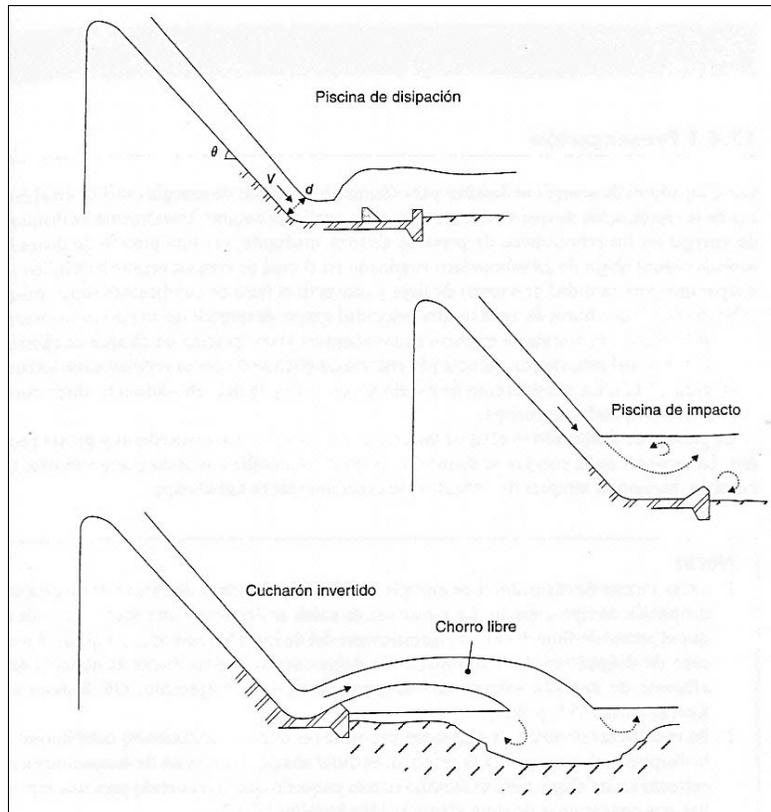
2.3.2 DISIPACIÓN DE LA ENERGÍA EN UNA OBRA HIDRÁULICA.

Debido al exceso de energía cinética en el extremo de la rápida los disipadores cumplen la función de disminuir considerablemente este exceso, con la finalidad de que el flujo aguas abajo no produzca socavación por las altas velocidades. Generalmente, para la disipación de energía en los vertederos o presas se diseña un **cuenco de disipación estándar**, aguas abajo de un rebosadero que produzca resalto hidráulico y que disipe la energía cambiando el flujo de supercrítico a subcrítico. Existen también otras estructuras como el cuenco de impacto y el chorro libre (GRAFICO 2-11) al igual que la construcción de escalones en la rápida del rebosadero también puede ayudar a la disipación de energía.

Los cuencos de disipación es el tipo más común de disipador para vertederos y presas pequeñas. Una importante parte de la energía se disipa en un resalto hidráulico asistido por accesorios (por ejemplo, escalones, bloques de impacto) para incrementar la turbulencia.



GRAFICO 2-11 TIPOS DE DISIPADORES



FUENTE (CHANSON, 2004)

2.3.2.1 CUENCO DE DISIPACION.

Los cuencos amortiguadores deben asegurar una disipación segura de la energía cinética del flujo, con el fin de aumentar la eficiencia en la disipación de energía y minimizar el tamaño (y costo) de la estructura. Comúnmente en las obras para disminuir la longitud del cuenco amortiguador se emplean elementos (por ejemplo, bloques de impacto, portal de salida) localizados en el colchón o en el pie de vertederos. Para los cuencos de disipación estándar los bloques de impacto, o umbrales dentados, pueden localizarse en una o varias filas³. Los

³ El arreglo de fila única es comparativamente más eficiente que la geometría de filas múltiples.



bloques fuerzan el flujo por encima de ellos y entre ellos. Los bloques de impacto deben diseñarse con formas estándar. No se recomiendan cuando la velocidad afluyente supera valores entre 20 y 30 m/s debido a los riesgos de daño por cavitación (CHANSON, 2004).

2.3.2.2 TIPOS DE CUENCO DE DISIPACION

En los años 1950 y 1960 se desarrollaron algunos diseños estandarizados de los cuencos de disipación (Tabla 2-2) (GRAFICO 2-12). Estos cuencos fueron probados en modelos y prototipos para un rango considerable de condiciones de flujo de operación. Los comportamientos de prototipo son bien conocidos y pueden seleccionarse y diseñarse sin estudios adicionales en modelos.



TABLA 2-2 TIPOS ESTANDAR DE DISIPADORES DE ENERGIA

Tipos estándar de disipadores de energía por resalto hidráulico

Nombre	Aplicación	Condiciones de flujo	Profundidad de salida	Comentarios
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
USBR de tipo II	Estructuras grandes	$Fr > 4.5$ $q > 46.5 \text{ m}^2/\text{s}$ $H_1 < 61 \text{ m}$ Longitud de la piscina $\approx 4.4 \text{ dconj}$	1.05 d conj	Dos filas de bloques. La ultima fila se combina con un umbral de salida inclinado (o dentado). Altura de bloque = d
USBR de tipo III	Estructuras pequeñas	$Fr > 4.5$ $q < 18.6 \text{ m}^2$ $V < 15 \text{ a } 18$ Longitud de la piscina $\approx 2.8 \text{ dconj}$	1.0 d conj	Dos filas de bloques y un umbral de salida. Altura del bloque = d
USBR de tipo IV	Para resaltos oscilantes	$2.5 < Fr < 4.5$ Longitud de la piscina $\approx 6 \text{ dconj}$	1.1 d conj	Una fila de bloques y un umbral de salida. Altura de bloque = 2d. Se puede añadir supresores de ondas en el extremo de aguas abajo
SAF	Estructuras pequeñas	$1.7 < Fr < 17$ Longitud de la piscina $\approx 4.5 \text{ dconj}$	1.0 d conj	Dos filas de bloques de impacto y un umbral de salida. Altura del bloque = d
USACE		Longitud de la piscina $\approx > 4 \text{ dconj}$	1.0 d conj	Dos filas de bloque de impacto y un umbral de salida.

Referencias: Chow(1973), Hager(1992b), Handerson(1966), US Bureau of Reclamation (US Dept. of thr Interior 1987)

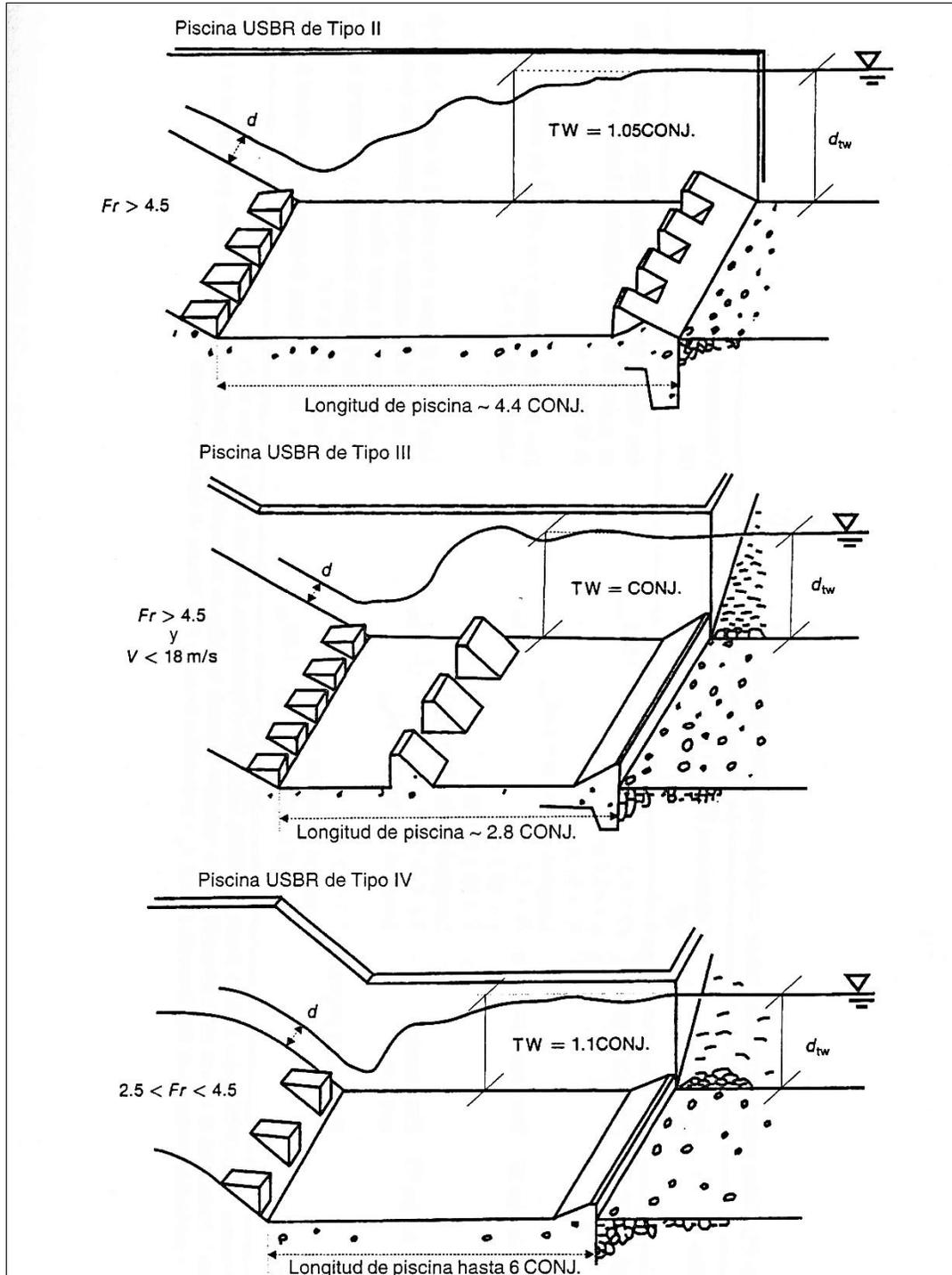
Notas: Profundidad de agua de salida recomendada para operación óptima de la piscina de disipación; d= profundidad el flujo aguas arriba (profundidad afluente)

dconj= profundidad conjugada del flujo; dtw=prundidad de salida; Fr= Numero de Froude de afluente

FUENTE: (CHANSON, 2004)



GRAFICO 2-12 ESQUEMA DE PISCINAS USBR





2. Determinar la velocidad al final del cuenco con la ecuación de Manning (V_m) y altura (T_{w2}) aguas abajo en el canal de salida.
3. Determinar la altura conjugada de y_0 .

$$y_2 = \frac{C y_0}{2} * (\sqrt{(1 + 8Fr)} - 1)$$

C= coeficiente que depende del tipo de cuenco a diseñar.

Entonces si $y_2 > T_w$ es necesario usar elementos o accesorios ya que el resalto no se forma dentro del cuenco previamente establecido, caso contrario en el caso que $y_2 < T_w$ el resalto se forma dentro del cuenco y por lo tanto es suficiente

4. En el caso que $y_2 > T_w$ es necesario determinar nuevas cotas (z_0 y z_1) para que y_2 del resalto no sobre pase T_w .

- $z_1 = z_0 - (y_2 - T_w)$

Acabado este análisis se determinara el uso del modelo S.A.F como alternativa para controlar que el resalto hidráulico se forme en el espacio dado, mediante la disminución de su longitud con los accesorios en la base del cuenco y así también ganar mayor pérdida de energía.

El cuenco disipador SAF (GRAFICO 2-13) proviene del inglés *San Anthony Falls*, (Cataratas de San Antonio) se desarrolló en el Laboratorio de Hidráulica San Anthony Falls, en la Universidad

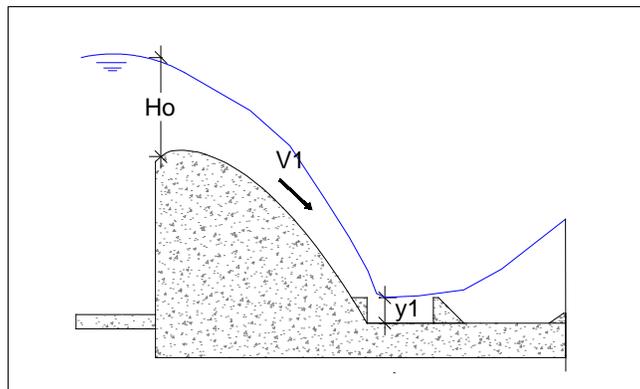


de Minnesota, para ser utilizado en pequeñas estructuras como vertederos, obras de toma y canales, con un número de Froude de 1 a 17. Está conformado por bloques de rápida, bloques de fondo y bloques de salida o umbrales, que permiten que la longitud del cuenco sea más corta que con un resalto hidráulico libre. La reducción de la longitud del cuenco es de un 80 por ciento de la longitud del resalto libre con estos accesorios. El modelo SAF permite disipar la energía con un método más económico y previene la erosión del lecho aguas abajo.

Las reglas de diseño resumidas por el investigador Blaisdell⁴ son las siguientes:

Primero se determina la velocidad V_1 ($V_1 = \sqrt{2gH_0}$) al final del vertedero, con este dato se determina y_1 y finalmente determinamos el número de Froude Fr_1 .

GRAFICO 2-14: VARIABLES Y1 Y V1 EN EL CUENCO S.A.F



Luego determinamos la longitud del cuenco que está en función de y_2 , C y Fr_1 . El valor de y_2 se determina con la fórmula del resalto hidráulico (Ecuación 2-11).

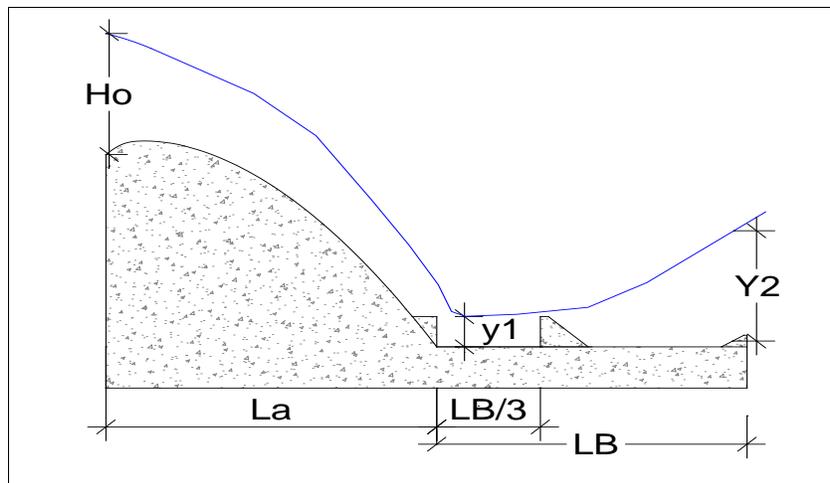
⁴ Fred W. Blaisdell, "The SAF stilling basin", U.S. Soil Conservation Service, Report SCS-TP-79, mayo 1949.



L_B = Longitud del lecho amortiguador para $F_1 = 1.7$ y $F_1 = 17$.

$$L_B = \frac{4.5y_2}{CF_1^{0.76}}$$

GRAFICO 2-15: LONGITUD DEL CUENCO





Dónde:

$$C = 1.1 - \frac{Fr_1^2}{120} \quad \text{Cuando } 1.1 < Fr_1 < 5.5$$

$$C = 0.85 \quad \text{Cuando } 5.5 < Fr_1 < 11$$

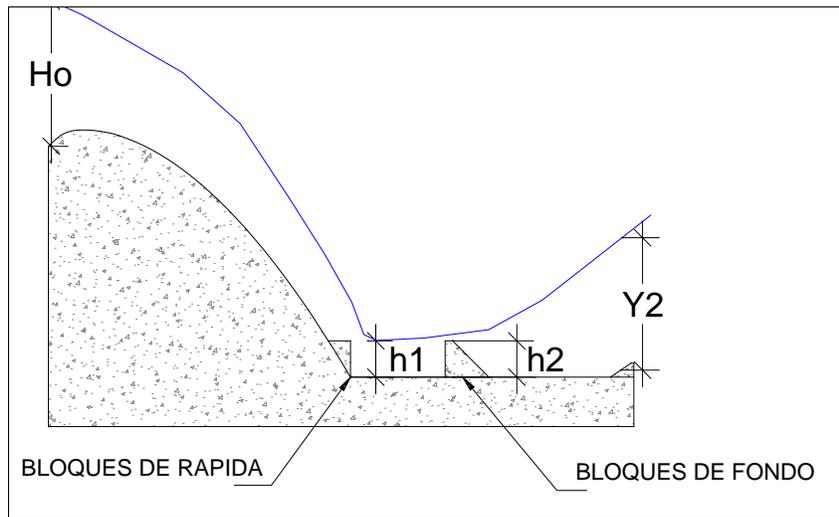
$$C = 1.0 - \frac{Fr_1^2}{800} \quad \text{Cuando } 11 < Fr_1 < 17$$

La distancia desde el extremo de aguas arriba del cuenco disipador hasta los bloques de

impacto es: $\frac{L_E}{3}$

La altura de los bloques de rápida h_1 y los bloques de piso h_2 son igual a y_1 .

GRAFICO 2-16: VISTA LATERAL DE BLOQUES DE FONDO Y DE RAPIDA



El número de los bloques de rápida está dado por:

$$N_c = \frac{W_B}{1.5 y_1}$$

Dónde:

N_c = el número de bloques de rápida.

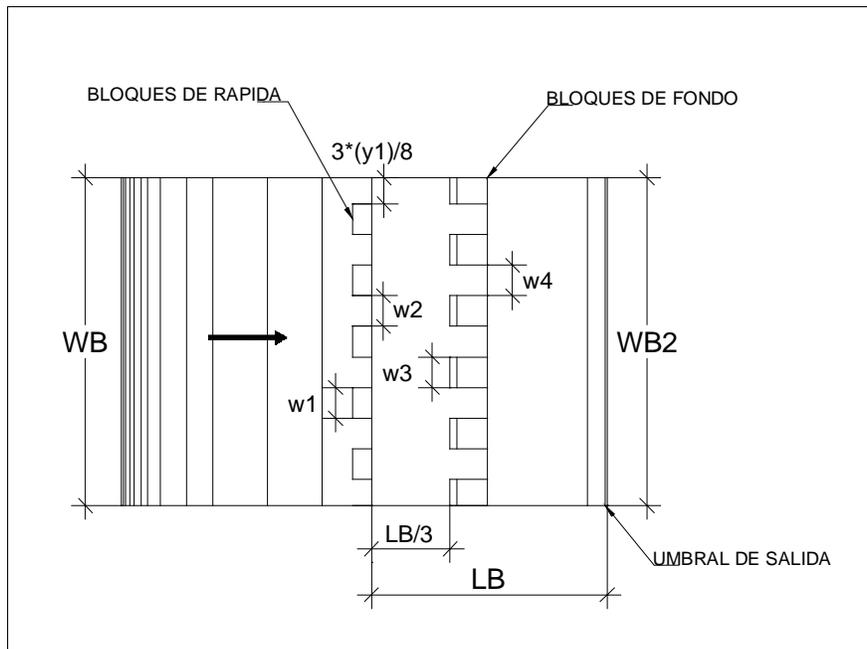
W_B = ancho del pie del vertedero.

El ancho de los bloques y su espaciamiento está dado por:

$$W_1 = W_2 = \frac{W_B}{2N_c}$$



GRAFICO 2-17: VISTA EN PLANTA DE LOS BLOQUES DE RAPIDA Y DE FONDO



El número de los bloques de fondo está dado por:

$$N_B = \frac{W_{B2}}{1.5y1}$$

Dónde:

N_B = el número de bloques de fondo.

W_{B2} = ancho del cuenco disipador.

El ancho de los bloques y su espaciamiento está dado por:



$$W_3 = W_4 = \frac{W_{B2}}{2N_B}$$

No deben localizarse los bloques de piso más cerca de las paredes que: $\frac{3y_1}{8}$

Los bloques de piso deben ocupar entre un 40% a 55% del ancho del cuenco.

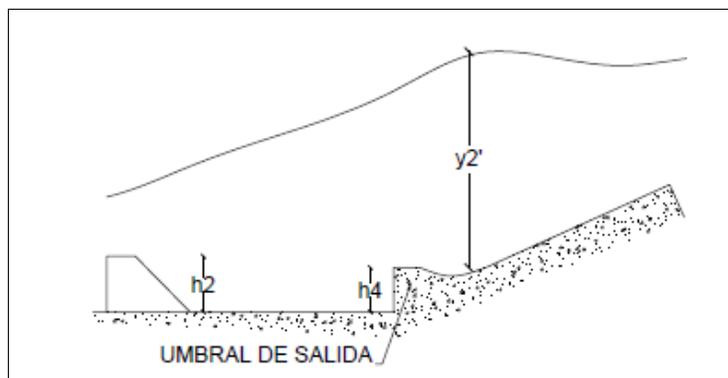
Los bloques de piso deben localizarse aguas abajo enfrentados a la abertura de los bloques de rápida.

Se debe tomar en cuenta que $W_{B2} = W_B$ ya que el ancho permanece constante tanto del vertedero como del cuenco, pero no es este el caso general.

La altura del umbral de salida está dada por:

$$h_4 = \frac{0.072y_2}{C}$$

GRAFICO 2-18: ALTURA DEL UMBRAL DE SALIDA h_4



La profundidad de salida de aguas abajo por encima del piso del cuenco disipador está dado por:



$$y_2' = \left(1.1 - \frac{Fr_1^2}{120}\right)y_2 \quad Fr_1 = 1.7 \text{ a } 17$$

$$y_2' = 0.85 \quad Fr_1 = 5.5 \text{ a } 11$$

$$y_2' = \left(1.0 - \frac{Fr_1^2}{800}\right)y_2 \quad Fr_1 = 11 \text{ a } 17$$



CAPITULO 3: MATERIALES Y METODOS

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO BULUBULU-CAÑAR-NARANJAL Y DE LOS COMPONENTES HIDRÁULICOS DE LA ESTRUCTURA DE DERIVACIÓN.

La cuenca baja de los ríos Bulubulu, Cañar y Naranjal es una zona de planicie costera y por tanto está expuesta a graves problemas de inundaciones periódicas que dificultan las diferentes actividades del sector. Por ello, la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA) ha decidido implementar obras de control de inundaciones en las cuencas de los ríos antes mencionados con la finalidad de disminuir los efectos negativos que trae consigo este tipo de fenómenos.

El objetivo principal del proyecto es 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. Asimismo, otro objetivo del proyecto es lograr el desarrollo socio-económico de la región, así como dotar de los mecanismos que demanda la conservación y remediación ambiental por los conflictos o riesgos de desastres naturales que son comunes en las partes media y baja de la cuenca del río Guayas.

El proyecto en general ha sido dividido en tres sistemas: Bulubulu, Cañar y Naranjal, que corresponden a cada una de las cuencas hidrográficas 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:**

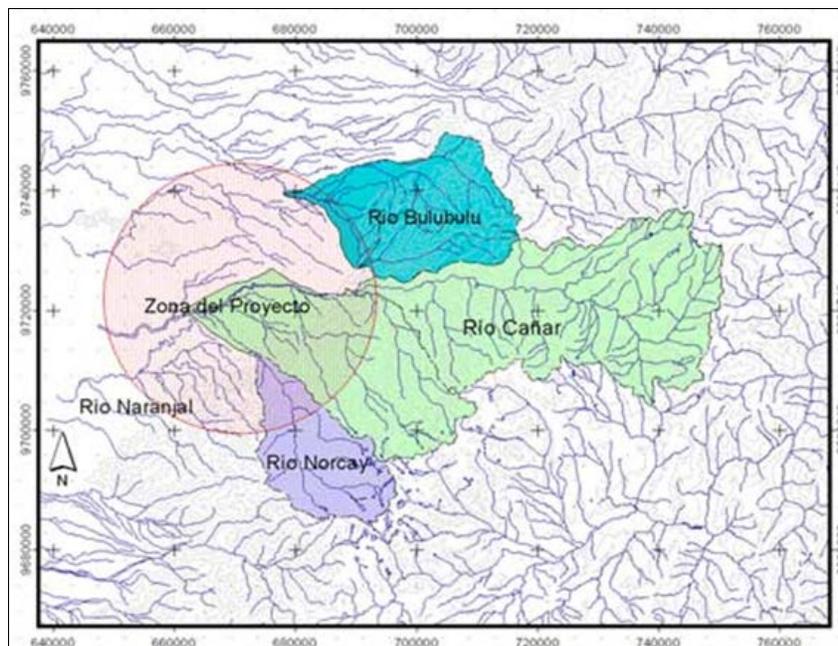
- Obras de protección, a través de diques, a lo largo del río Cañar y sus afluentes principales, como son el Patul, Piedras y Norcay.
- Derivadora Cañar.
- By-pass Cañar para transportar los excesos de las crecidas máximas para un período de retorno de 50 años correspondiente a un caudal de $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ y adicionalmente controlar el caudal extremo proyectado para un periodo de retorno de 100 años y un caudal de $1400 \text{ m}^3/\text{s}$. El by-pass dispone de un sedimentador en el sector de las lagunas Lagartera y Envidia.
- Dos puentes nuevos sobre el by-pass 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.



GRAFICO 3-19: UBICACION GENERAL DEL PROYECTO



FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011

El Sistema Cañar se encuentra ubicado en el sector Pancho Negro, en las coordenadas E 672100; N 9723600, (Datum WGS 84-17 SUR) está compuesto por una Derivadora cuya función es extraer 1100 m³/s excedentes del Río Cañar hacia un by-pass el mismo que llega al estero de nombre Churute. Además tiene un canal con control de compuertas de fondo en el río y un vertedero de caída libre sin compuertas en el by-pass.

Las compuertas de fondo están diseñadas para un rango de caudales que varíe el paso hacia el río Cañar entre 400 y 800 m³/s.



La derivadora está formada por un azud tipo Creager, y un cuenco disipador de energía tipo SAF (Saint Anthony Falls). Las estructuras correspondientes a la derivadora Cañar están expuestas en el ANEXO 1 y ANEXO 2.

3.2 EQUIPAMIENTO Y LABORATORIOS.

Para la realización de los ensayos en el modelo físico de la derivadora Cañar, se ha utilizado el laboratorio de hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca, además los aparatos de medición y monitoreo del PROMAS, entre los principales equipos utilizados están:

- Canal marca ARMFIELD S6 Titilg Flume, cuyas dimensiones son :
B=30cm, h=45cm, L=12.5 m. La pendiente de este canal es regulable para valores positivos entre 1/500 a 1/200 y para pendiente negativa valores entre 1/500 a 1/40.

GRAFICO 3-20: CANAL ARMFIELD



- Bomba hidráulica marca NECO de 4 HP de potencia cuya máxima capacidad es 22 lt/s.



GRAFICO 3-21: BOMBA NECO



- Medidor de nivel: Que consta de una varilla deslizante paralela a una regla milimétrica.

GRAFICO 3-22: MEDIDOR DE NIVEL



- Aforadores:
 1. **Micromolinete.-** Rickly Hydrological, Tipo PYGMY, Modelo 6205
 2. **Molinete.-** Rickly Hydrological, Tipo AA – MH, Modelo 6215



3. **Flow Tracker.-** Sonteck,

GRAFICO 3-23: MICROMOLINETE

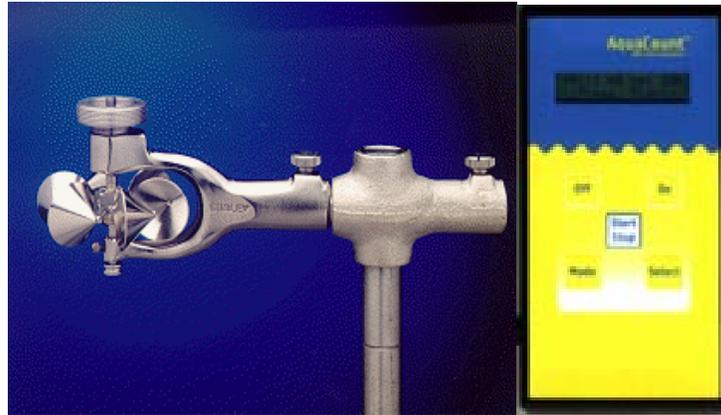


GRAFICO 3-24: MOLINETE



GRAFICO 3-25: FLOW TRACKER



- Equipo menor: Escuadras, regletas.



3.3 METODOLOGÍA.

El empleo de modelos en el ambiente del laboratorio para la solución de problemas de la ingeniería hidráulica requiere un entendimiento claro y preciso de los principios de similitud.

Por otro lado, es necesario considerar los límites del modelo que pueden responder a:

- I. circunstancias de orden físico, constructivo, así como también de orden de infraestructura, capacidad de los laboratorios (instrumentación y equipos, logística, etc.)
- II. simplificaciones necesarias realizadas a los modelos numéricos que rigen los fenómenos o procesos a ser estudiado mediante un modelo físico.

Uno de los puntos críticos dentro del proceso de modelización física hidráulica es la construcción misma del modelo, ya que ello involucra desde la selección de materiales hasta la implementación de soluciones que faciliten la implementación y que sean consistentes con el diseño de la experimentación proyectado.

Para el fenómeno estudiado, y en consideración de las hipótesis, se han identificado las variables presentes, que se consideran relevantes en términos de la conceptualización teórica que representa el proceso y de las simplificaciones que se han establecido. De dichas variables se han establecido las relaciones existentes entre ellas precisando las variables dependientes y aquellas que son independientes y que determinan las condiciones de frontera, los límites y los parámetros de entrada. En este punto se ha diseñado el procedimiento de registro de datos (variables dependientes), y dimensionado el alcance de los mismos (número de mediciones y/o repeticiones).

Para predecir el comportamiento del prototipo de manera adecuada, una vez construido e implementado el modelo, fue necesario realizar una calibración para efectos de ajustar y validar las condiciones que rigen el fenómeno, hasta lograr una concordancia entre el modelo y prototipo. En consideración del diseño para la experimentación establecido, se lleva a cabo las mediciones de las variables dependientes. Durante la ejecución de la experimentación, el diseño preestablecido ha sido continuamente ajustado en términos de optimizar el alcance del propósito de la modelización.



Los resultados de la experimentación han sido sometidos a un riguroso análisis a fin de identificar por un lado el comportamiento de las variables en consideración de la conceptualización teórica de base y por otro lado los efectos de las condiciones propias del prototipo proyectado sobre los resultados. Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de inferencia sobre la base de un tratamiento estadístico que permita obtener las conclusiones y/o generalizaciones para emitir criterios 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.

3.3.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS PROCESOS HIDRÁULICOS Y DE VARIABLES RELACIONADAS AL ESTUDIO.

Como ya se mencionó anteriormente en la Ecuación 2-13, la disipación de energía en el resalto está en función de las alturas y_1 y y_2 correspondientes a los calados antes y después del resalto; por lo que a estas variables se las define como variables de estudio debido a su importancia dentro del fenómeno de disipación energía. Dentro del experimento, el calado y_2 ha sido medido con sondas de altura; mientras que el calado y_1 ha sido calculado para cada caso debido a la dificultad que presenta la medición directa de esta variable en el experimento.

Los calados conjugados en el resalto se producen en dos puntos diferentes, existiendo entre ellos una distancia, la misma que varía debido al grado de disipación obtenido en el cuenco; entonces se considera a la variable longitud del resalto L_r como una variable importante dentro del estudio y se la incorpora al análisis.

El calado y_1 del resalto, es una variable dependiente de la velocidad V_1 en ese punto, a su vez la velocidad está en función de la carga H_o en el vertedero como se indica en el GRAFICO 3-8, por lo que consideró conveniente para el estudio tabular los datos de esta variable ya que

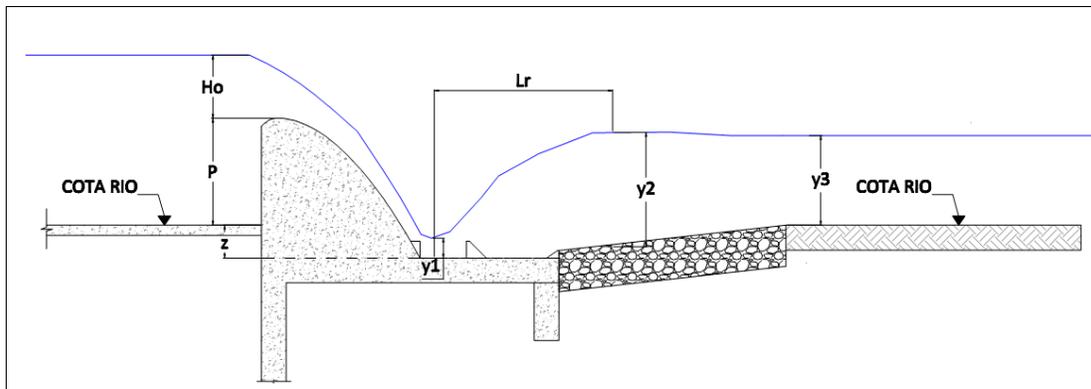


además en los experimentos se consideró el azolvamiento del paramento del vertedero aguas arriba y se debe verificar la variabilidad de la velocidad a causa de este fenómeno.

La sumergencia del resalto se logra con una altura y_3 del orden subcrítico correspondiente al calado del río para el caudal correspondiente, esta variable será además considerada en el análisis.

También se ha calificado la profundización del cuenco denominada z , ya que esta variable influye en la velocidad de caída del agua y por lo tanto también en el valor que y_1 adopta.

GRAFICO 3-26: VARIABLES ASOCIADAS



3.3.2 ANÁLISIS DE SIMILITUD Y SEMEJANZA.

Para este análisis se consideran los planos del prototipo, los mismos que se encuentran en el ANEXO 1. En este paso muy importante para el desarrollo del modelo, se han determinado las dimensiones de modelo escalado, considerando las limitaciones que presenta el canal sobre el cual se ensambló el modelo; además, se verificó que se cumplan las condiciones necesarias en el flujo es decir que las fuerzas predominantes en los fenómenos sean las fuerzas gravitacionales.

El modelo del vertedero y del dissipador SAF de la Derivadora Cañar fue ensayado en un canal de pendiente variable de 0,30m de base x 0,46m de altura. Debido a esta limitante en el ancho

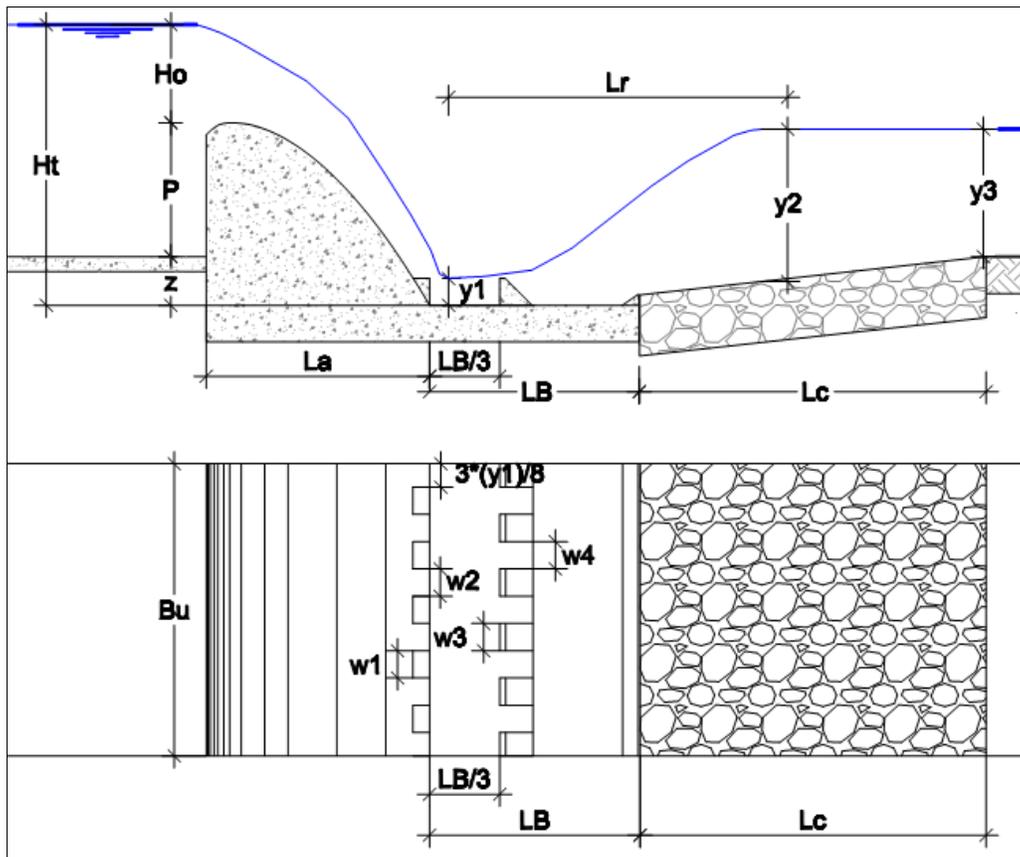


del canal se decidió diseñar el modelo por ancho unitario en función de las dimensiones del canal.

La escala longitudinal escogida para el modelo corresponde a $\lambda L = 1:16$ con la cual se comprobó si las dimensiones resultantes del modelo garantizan el flujo esperado y que los equipos estén a la medida.

En la siguiente figura se especifican las variables consideradas en el dimensionamiento del modelo:

GRAFICO 3-27: VARIABLES PARA EL DIMENSIONAMIENTO (CORTE Y PLANTA)



De los ANEXOS 1 y 2, la dimensión H_t del prototipo es:

$$H_{t_p} = 4.61 \text{ m}$$



Por tanto, y con la escala longitudinal impuesta se tiene:

$$\lambda l = \frac{1}{16}$$

$$\frac{Ht_m}{Ht_p} = \frac{1}{16}$$

$$Ht_m = \frac{4,61}{16} = 0,29 \text{ m} \approx 0,30 \text{ m}$$

Como ya se definió anteriormente en el punto 2.2.4.2 la escala de caudales es:

$$\lambda Q = \lambda L^{5/2}$$

Entonces:

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \left(\frac{1}{16}\right)^{5/2}$$

La estructura derivadora enviará al bypass un caudal de 1100 m³/s; entonces:

$$Q_p = 1100 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_m = 1100 \times \left(\frac{1}{16}\right)^{5/2} = 1,07 \text{ m}^3/\text{s}$$

El ancho transversal B de la estructura de derivación (vertedero Creager) es de 270m, para el modelo se tiene:

$$B_p = 270 \text{ m}$$



$$\frac{B_m}{B_p} = \frac{1}{16}$$

$$B_m = 270 \times \left(\frac{1}{16}\right) = 16,875 \text{ m}$$

Se obtiene el caudal unitario en el modelo de la siguiente manera.

$$\frac{Q_m}{B_m} = \frac{1,07 \text{ m}^3/\text{s}}{16,875 \text{ m}} = 0,0634 \frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{m}}$$

El ancho del canal en el que se va a colocar el modelo es de 0,3m por lo que el caudal total es de:

$$0,3 \times \frac{Q_m}{b_m} = 0,3 \times 0,634 = 0,019 \text{ m}^3/\text{s} \approx 0,020 \text{ m}^3/\text{s}$$

Una vez determinado el caudal y las dimensiones básicas del modelo se tiene que comprobar que efectivamente las fuerzas de gravedad son las que rigen el flujo, es decir que no se tienen en el modelo efectos de escala, por lo tanto no se tiene influencia de fuerzas por viscosidad.

$$\frac{R_m}{R_p} = \frac{V_m}{V_p} \times \frac{H_m}{H_p} = \lambda L^{1/2} \times \lambda L = \lambda L^{3/2}$$

$$R_m = \frac{V_m * y_m}{\nu}$$

$$y_m = \frac{y_p}{16}$$



$$y_p = 3,51$$

$$y_m = \frac{3,51}{16}$$

$$y_m = 0,22m$$

$$V_m = \frac{Q_m}{A_m}$$

$$V_m = \frac{0,02}{0,22 \times 0,3} = 0,303 \text{ m/s}$$

$$R_m = \frac{0,303 \times 0,22}{1,242 \times 10^{-6}} = 53672$$

Al ser $R_m > 12500$, se define al flujo en el modelo como turbulento, es decir, que las fuerzas de viscosidad no tienen efecto y por tanto tampoco existen efectos de escala. Bajo estas condiciones establecidas se concluye que es posible modelar a la escala propuesta y con el mismo tipo de flujo del prototipo.

DISEÑO DEL MODELO DEL AZUD Y CUENCO DISIPADOR DE ENERGÍA.

Al no tenerse efectos de escala en el modelamiento, las dimensiones de las estructuras del modelo se obtuvieron directamente del escalamiento del prototipo, es decir las dimensiones del modelo corresponden a las del prototipo dividido por 16.

En la siguiente tabla se indican las dimensiones del prototipo y las del modelo escalado:

TABLA 3-3: DIMENSIONES DEL PROTOTIPO Y DEL MODELO ESCALADO

DIMENSIONES DEL PROTOTIPO	DIMENSIONES DEL MODELO ESCALADO
---------------------------	---------------------------------



Ht	4.61	m.
Ho	1.61	m.
P	2.2	m.
z	0.8	m.
La	3.67	m.
LB	3.44	m.
Lc	10	m.
Bu	270	m.
w1	0.44	m.
w2	0.44	m.
w3	0.44	m.
w4	0.44	m.

Htr	28.81	cm.
Hor	10.06	cm.
Pr	13.75	cm.
zr	5.00	cm.
Lar	22.94	cm.
LBr	21.50	cm.
Lcr	62.50	cm.
Bur	30.00	cm.
w1r	2.80	cm.
w2r	2.80	cm.
w3r	2.80	cm.
w4r	2.80	cm.

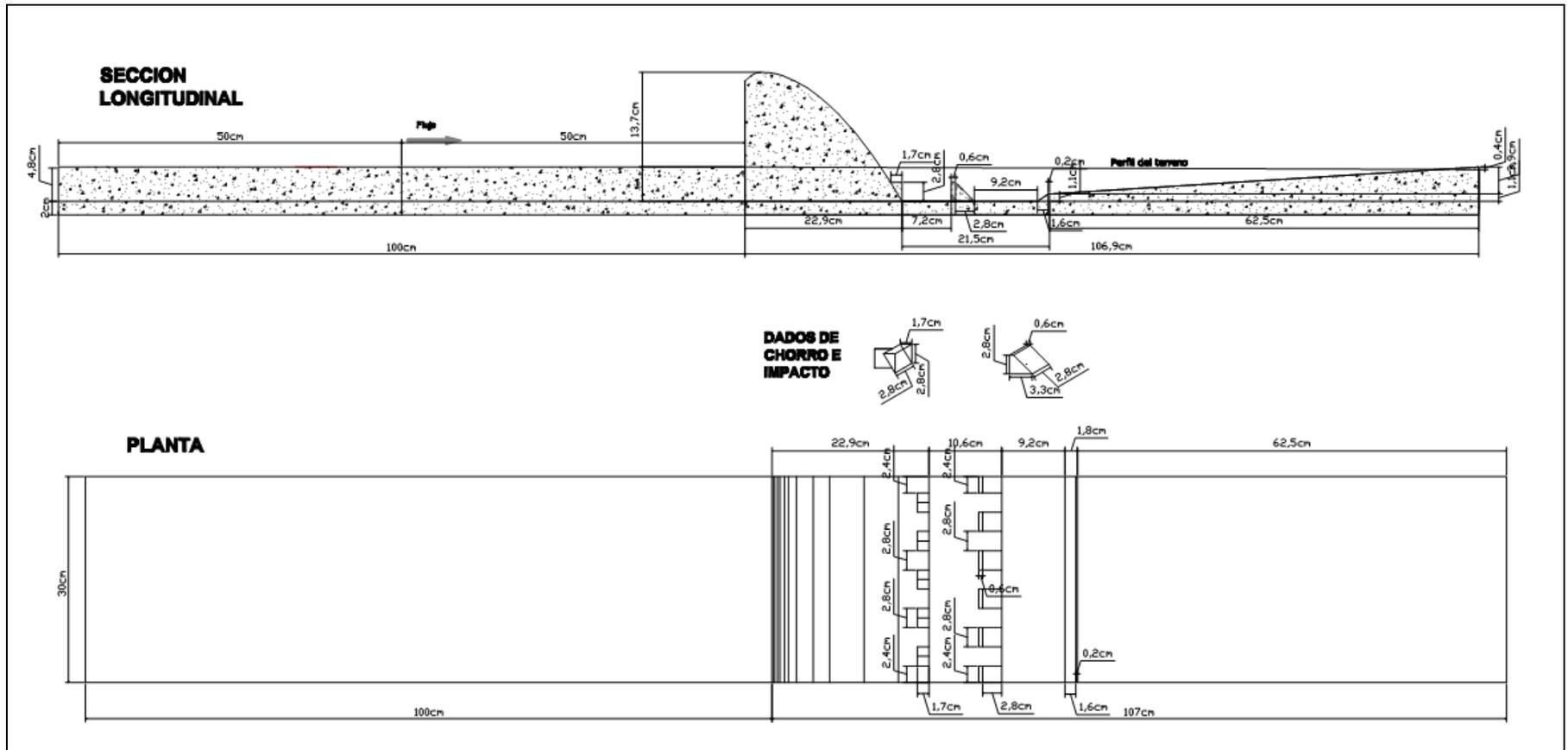
Como se puede apreciar el cociente de las dimensiones homólogas corresponde a la escala asumida en el modelo.

En el GRAFICO 3-10, están especificadas las dimensiones calculadas para el modelo, como ya se indicó anteriormente en el análisis de similitud y semejanza, se considera un ancho del modelo de 30 cm. esto debido a las limitaciones del canal del laboratorio a ser empleado.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

GRAFICO 3-28: MODELO ESCALADO



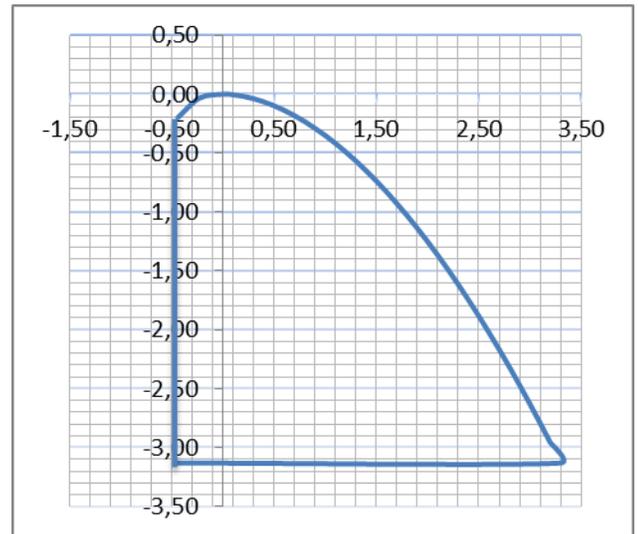
FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011



Bajo las mismas consideraciones, las coordenadas para el perfil hidrodinámico Creager se calculan escalando las coordenadas correspondientes al perfil del prototipo. Las coordenadas se indican en la siguiente tabla:

TABLA 3-4: COORDENADAS DEL AZUD PARA EL PROTOTIPO Y MODELO

PROTOTIPO		MODELO: Escala 1:16	
Coordenadas del Azud (m)		Coordenadas del Azud (cm)	
x	y	x	y
-0.44	-0.20	-2.77	-1.24
-0.23	-0.03	-1.43	-0.20
0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	-0.01	0.63	-0.03
0.20	-0.02	1.25	-0.12
0.30	-0.04	1.88	-0.24
0.40	-0.07	2.50	-0.41
0.50	-0.10	3.13	-0.62
0.60	-0.14	3.75	-0.86
0.70	-0.18	4.38	-1.14
0.80	-0.23	5.00	-1.46
0.90	-0.29	5.63	-1.81
1.00	-0.35	6.25	-2.20
1.10	-0.42	6.88	-2.62
1.20	-0.49	7.50	-3.07
1.30	-0.57	8.13	-3.55
1.40	-0.65	8.75	-4.07
1.50	-0.74	9.38	-4.62
1.60	-0.83	10.00	-5.20
1.70	-0.93	10.63	-5.81
1.80	-1.03	11.25	-6.45
1.90	-1.14	11.88	-7.12
2.00	-1.25	12.50	-7.82
2.10	-1.37	13.13	-8.55
2.20	-1.49	13.75	-9.31
2.30	-1.62	14.38	-10.10
2.40	-1.75	15.00	-10.92
2.50	-1.88	15.63	-11.76
2.60	-2.02	16.25	-12.64
2.70	-2.17	16.88	-13.55
2.80	-2.32	17.50	-14.48
2.90	-2.47	18.13	-15.44





3.00	-2.63	18.75	-16.43
3.10	-2.79	19.38	-17.44
3.20	-2.96	20.00	-18.49

GRAFICO 3-29: COORDENADAS AZUD PROTOTIPO

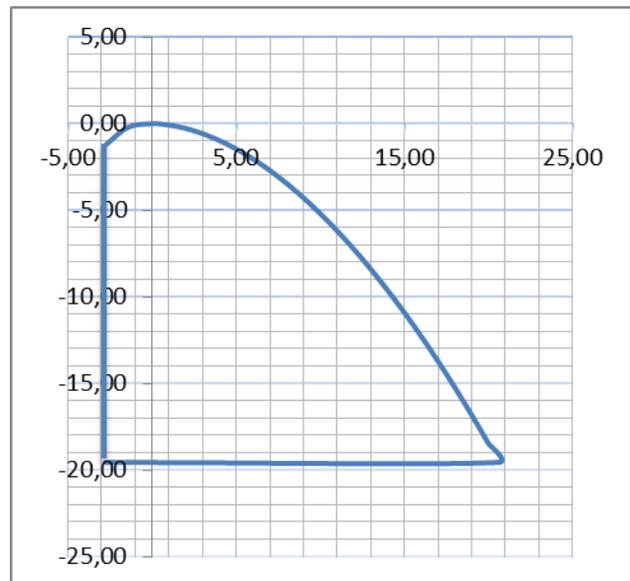
GRAFICO 3-30: COORDENADAS AZUD MODELO

3.3.3 CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO.

Una vez calculadas las dimensiones correspondientes al modelo, y considerando las limitaciones que presenta el laboratorio, se pensó que lo más conveniente sería elaborar las estructuras a escala con madera, ya que este material es fácil de manejar, moldear, y ensamblar.

Para la construcción del azud fue fundamental considerar las coordenadas calculadas ya que estas permiten una mejor representación de los fenómenos hidráulicos que se presentaran en el prototipo, una vez escaladas las coordenadas del prototipo se trazó sobre madera el perfil Creager del modelo. Para darle mayor sujeción al azud, se colocó material antideslizante en los bordes y se reforzó con silicona. El modelo del azud se observa en el GRAFICO 3-13

GRAFICO 3-31: MODELO DEL AZUD



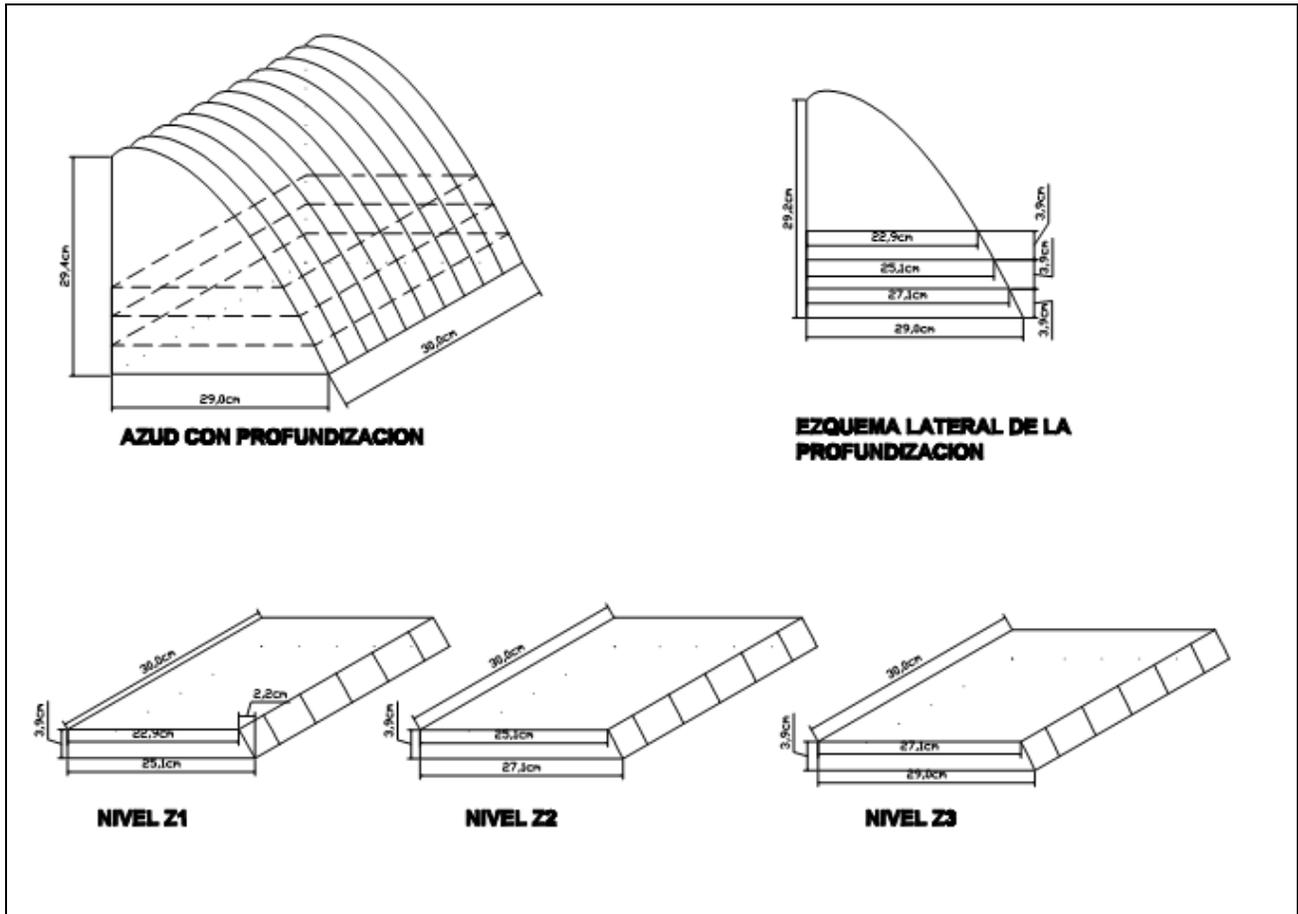


FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011

En los GRAFICOS 3-14 se puede apreciar el modelo escalado construido con madera y diseñado para ser ensamblado en partes según sean los requerimientos del experimento a realizarse. Las ranuras laterales sirven para la implementación de material antideslizante, el mismo que asegurara la sujeción de la estructura a las paredes del canal.

Para modelar los fenómenos con el cuenco profundizado, se emplearon tabloncillos de madera de 5 cm de espesor, esto con el fin de sobre elevar al cuenco y lograr una mayor altura de caída del agua desde el vertedero y así experimentar las diferentes variaciones en el diseño. En el siguiente grafico se indican los tabloncillos usados para la profundización del cuenco:

GRAFICO 3-32: ESQUEMA PROFUNDIZACION DEL CUENCO EN TRES NIVELES



Para el zampeado del modelo se escogió colocar la rugosidad a escala del material del prototipo, esto con el fin de obtener resultados más reales en la experimentación, adicionalmente el zampeado se construyó con una cama cuya pendiente es regulable ya que se la profundización del cuenco implica también sobre elevación en dicha estructura, todas estas estructuras se observan en el GRAFICO 3-15.

GRAFICO 3-33: ZAMPEADO E IMPLEMENTACION DE ESTRUCTURAS



FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011

La estructura del modelo requiere ser armada para cada caso cuando se varíe la profundización del cuenco.

Como ya se mencionó anteriormente, al ser un modelo no distorsionado en el que se cumple con las leyes de similitud dinámica y cinemática, los procesos de la calibración no son tan complejos como para el caso de modelos distorsionados.

Para asegurar el correcto desempeño del modelo, se procedió a realizar aforos en el canal para diversos caudales obteniéndose de esto una curva de descarga para el canal aguas arriba de la estructura de derivación. El vertedero Creager empleado corresponde a un vertedero de perfil hidrodinámico cuya ecuación Q vs y fue usada para comprobar el caudal de tránsito. La ecuación utilizada es:



$$Q = M_o \cdot L \cdot H^{3/2}$$

Donde:

L: Longitud del vertedero.

H: Carga hidráulica sobre la cresta.

M_o: Coeficiente de descarga.

La comparación para la calibración del modelo se la realiza en los puntos más adelante desarrollados.

3.3.4 DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN PARA EL RANGO DE CAUDALES EN EL MODELO.

El método que se utilizó para determinar los caudales, es el de la velocidad media, que consiste en medir la velocidad al sesenta por ciento del calado desde la superficie libre y en tres puntos en el sentido transversal de la sección, para esto se utilizó el equipo para aforos Flow Traker, descrito en el capítulo de equipos y laboratorio; y que además de proporcionar los datos de velocidad, aportó valores de desviación estándar de la velocidad y la calidad de las condiciones de frontera. Estos datos son útiles al momento de aceptar o rechazar la medición.

Como datos adicionales el equipo Flow Traker proporciona el área de la sección aforada, la velocidad media de la sección y el caudal, mediante el método de $0,6 H$.

El procedimiento del aforo se describe a continuación:

Para la ubicación de la sección de control el criterio fue buscar un punto donde el flujo sea estable por lo que se determinó ubicarlo aguas arriba del vertedero a una distancia de 4 veces



la altura del mismo (vertedero perfil Creager), en este lugar el flujo no se ve influenciado por lo que ocurre aguas abajo.

Se mide la altura del flujo en la sección de control.

En la primera estación en el extremo derecho de la sección de control se coloca el Flow Tracker, a la altura de 0,6 H, aquí realizamos la primera medición de la velocidad en un tiempo de 40 segundos (tiempo calibrado en el equipo). Este proceso lo repetimos para las otras dos estaciones (centro y extremo izquierdo).

Luego se realizaron varias de estas mediciones para diferentes caudales y así obtener un número suficiente de datos (caudal vs altura) para que la curva tenga un correcto ajuste. Para determinar el caudal (Q) y la velocidad media (V_m) se aplicaron las siguientes formulas:

$$Q = V_m \times A,$$

A es el área de la sección transversal.

$$V_m = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3},$$

Dónde:

V_1 : Velocidad en el extremo izquierdo.

V_2 : Velocidad en el centro.

V_3 : Velocidad en el extremo derecho.

Se obtuvieron doce puntos (TABLA 3-3), los mismos que se ajustaron a una curva polinómica de segundo orden (GRAFICO 3-16).

TABLA 3-5: AFOROS DE VELOCIDAD MEDIA

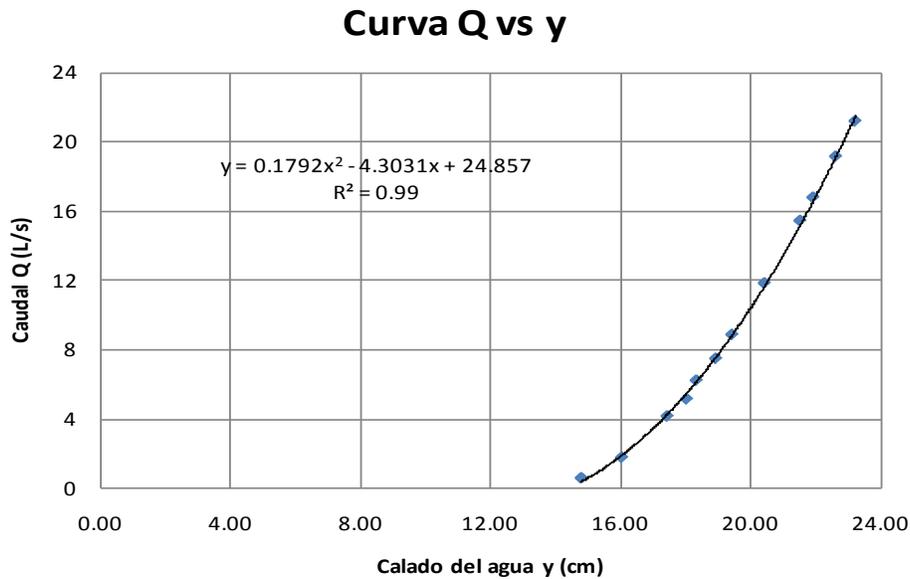


AFORO 1

y (cm)	0.6y (cm)	v1 (cm/s)	v2 (cm/s)	vm (cm/s)	A (cm ²)	Q (cm ³ /s)	Q (L/s)
14.750	8.8500	1.300	1.300	1.300	442.50000	575.250	0.575
16.000	9.6000	3.600	3.800	3.667	480.00000	1760.000	1.760
17.400	10.4400	7.800	8.200	7.933	522.00000	4141.200	4.141
18.000	10.8000	9.700	9.100	9.500	540.00000	5130.000	5.130
18.300	10.9800	11.600	10.700	11.300	549.00000	6203.700	6.204
18.900	11.3400	13.300	12.900	13.167	567.00000	7465.500	7.466
19.400	11.6400	15.200	15.200	15.200	582.00000	8846.400	8.846
20.400	12.2400	19.500	18.900	19.300	612.00000	11811.600	11.812
21.500	12.9000	24.400	22.900	23.900	645.00000	15415.500	15.416
21.900	13.1400	26.000	24.500	25.500	657.00000	16753.500	16.754
22.600	13.5600	28.600	27.400	28.200	678.00000	19119.600	19.120
23.200	13.9200	31.600	28.000	30.400	696.00000	21158.400	21.158

FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011

GRAFICO 3-34: CURVA Q VS Y



FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011

3.3.5 VALIDACIÓN DE LA CURVA DE DESCARGA

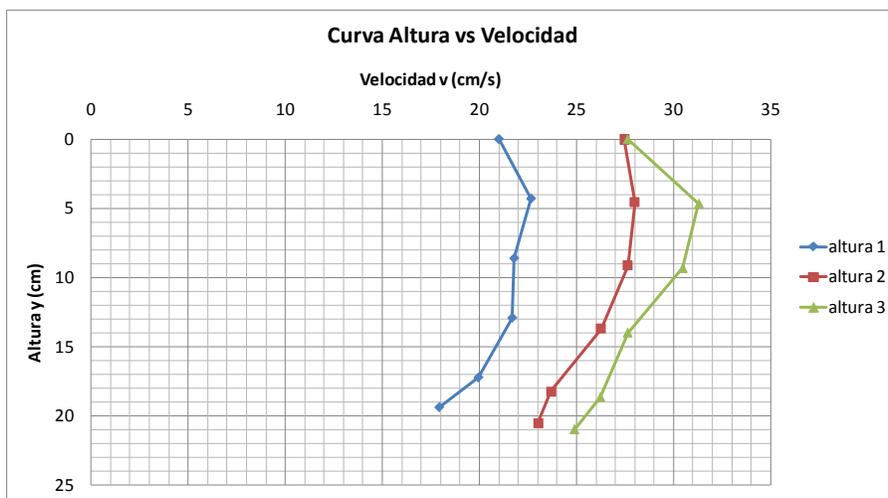
Para determinar de mejor manera la curva calado - caudal se ha realizado la validación de la misma con el método de los 6 puntos que consiste en comprobar tres caudales de los datos ya obtenidos.



El procedimiento consiste en que para un determinado calado de altura H se aforan velocidades en $0.9H$; $0.8H$; $0.6H$; $0.4H$; $0.2H$ y la velocidad superficial. Este proceso se lo realiza en los 3 puntos de la sección transversal (extremos y centro).

Como conclusión tenemos el GRAFICO 3-17 que nos muestra el perfil de velocidades medias a las diferentes alturas de H para un mismo caudal, con este perfil de velocidades validamos la curva ya que este siempre mantiene un mismo comportamiento.

Grafico 3-35: PERFILES DE VELOCIDAD



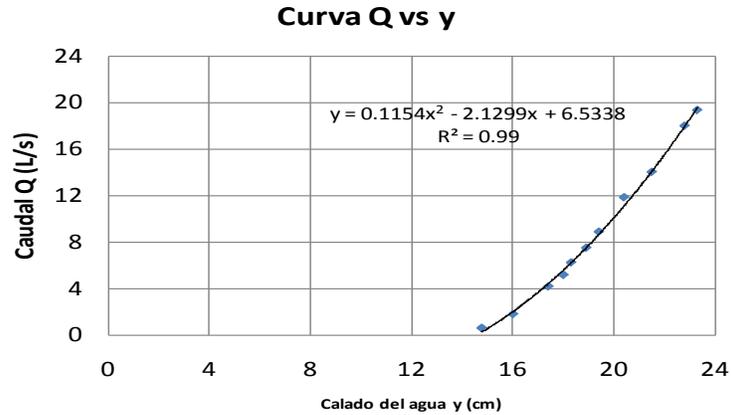
FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011

El caudal obtenido es el producto del promedio de las velocidades a las diferentes alturas de H y el área de la sección mojada.

Los tres caudales obtenidos con las velocidades medias de los perfiles, se compararon con los caudales obtenidos en la primera curva de descarga, por lo tanto ya que las diferencias entre los caudales aforados con el método anterior y los nuevos presenta un porcentaje de diferencia entre ellas inferior al 10%, se utilizan los nuevos datos para implementar en una curva de descarga definitiva. (GRAFICO 3-18). Esta curva fue utilizada para los diferentes ensayos en el laboratorio y sirve de base para determinar los caudales mediante el calado en el canal.



GRAFICO 3-36: CURVA DE DESCARGA VALIDADADA



Fuente: PROMAS U. de Cuenca 2011

3.3.6 DISEÑO EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DEL MODELO FÍSICO Y TOMA DE DATOS.

3.3.6.1 DESCRIPCIÓN DE VARIABLES DE ESTUDIO

Para el análisis del modelo y considerando las hipótesis que rigen el estudio del cuenco se identificaron las variables presentes y su comportamiento respecto al desarrollo de los ensayos, la relación entre estas variables y su origen nos han permitido dividirlos en: variables dependientes e independientes determinando las condiciones de frontera, los límites y los parámetros de entrada.

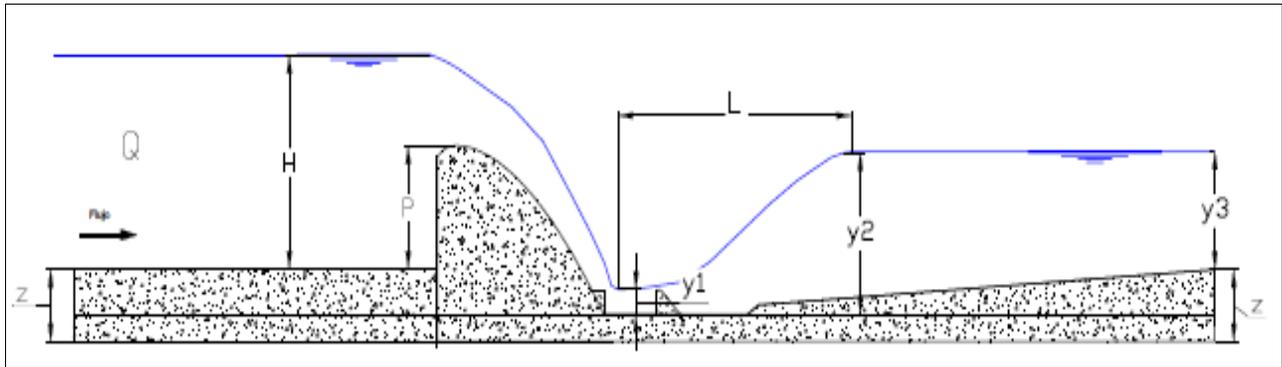
Como variables independientes en el modelo se tienen las siguientes (GRAFICO 3-19):

- El caudal (Q) de diseño para los diferentes eventos.
- Altura de llegada a la derivadora (H).
- Altura (P) del vertedero tipo Creager.



- Altura aguas abajo del cuenco disipador (y_3).
- Diferencia de altura entre la base del cuenco y la derivadora o el final del enrocado (z).
- Diámetro (D) de las piedras que se ubican después del cuenco.

GRAFICO 3-37: VARIABLES DE DISEÑO



En la siguiente imagen, que se consideró como la posición de diseño, se puede observar la altura inicial del azud y la altura del enrocado.

GRAFICO 3-38. CUENCO DISIPADOR SAF, POSICIÓN 1



Fuente: PROMAS U. de Cuenca 2011

En la imagen de la posición 2 se observa el cambio en la altura del azud y de la posición al final del enrocado, por consiguiente la pendiente de este cambia lo que provoca mayor altura de agua en el cuenco.



.GRAFICO 3-39. CUENCO DISIPADOR SAF, POSICIÓN 2



Fuente: PROMAS U. de Cuenca 2011

Finalmente la altura del azud aumento a la posición 3 como se observa en la siguiente imagen y además la altura al final del enrocado, se debe tomar en cuenta que la posición inicial del enrocado no cambia, simplemente se produce un giro mediante bisagras.

GRAFICO 3-40. CUENCO DISIPADOR SAF, POSICIÓN 3



Fuente: PROMAS U. de Cuenca 2011



Cabe señalar que las variables independientes variaron en el transcurso de los ensayos para determinar cuál es la mejor posición de la estructura. Las variaciones de estas son:

La altura z se varió en tres niveles; a 5, 9.64 y 13 cm como se observa en los GRAFICO 3-20, 3-21 y 3-22 respectivamente, elevando la altura del vertedero al igual que el nivel del enrocado, lo que originó un aumento en la altura de caída al cuenco y que además el nivel aguas abajo sea más profundo.

La altura P se varió de 13.7 a 6.53 y finalmente hasta un valor de 0.95 cm, según el nivel de azolvamiento. Así tenemos para un azolvamiento total la altura P ha equivalido a 0.95 cm lo que significa que el vertedero (tipo Creager) trabaja como vertedero de cresta ancha.

La altura aguas abajo (y_3) cambia al igual que z y permanece constante para todos los casos de variación de P , la variación de estas alturas son de 12, 15.63 y 18.75 cm con lo que se pretende mejorar la pérdida de energía en el cuenco mediante el acortamiento de la longitud de resalto y la disminución de las oscilaciones observadas aguas abajo.

Y finalmente el diámetro de las piedras varía entre los rangos de 1.25 - 3.125 cm y 1.875 - 4.375 cm.

Como variables dependientes tenemos las siguientes (GRAFICO 3-19):

- Oscilación aguas abajo del cuenco disipador.
- Longitud de resalto que se forma en el cuenco (L_r).
- Altura del resalto hidráulico (y_2) o altura conjugada de y_1 .
- Altura y_1 del resalto.

Además para diseño de la experimentación se debe tomar en cuenta los límites según las circunstancias físicas, constructivas, así como la infraestructura y capacidad de los laboratorios (instrumentación y equipos).

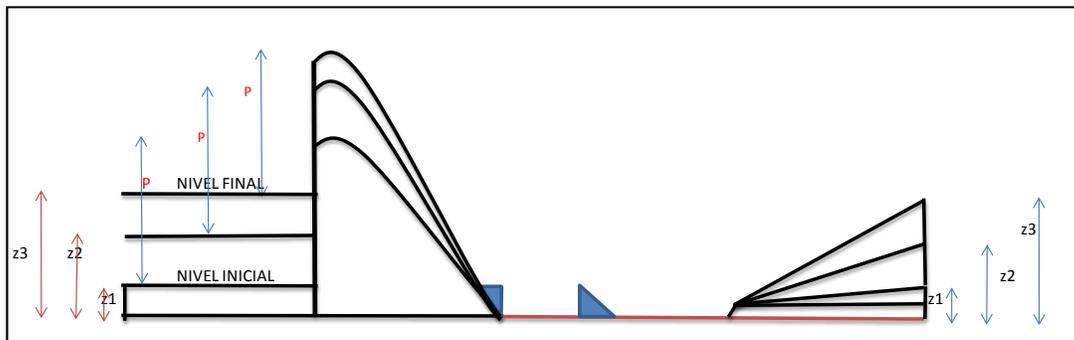


Para la modelización del cuenco disipador SAF se realizó en un canal ARMFIELD de pendiente variable, cuyos valores pueden variar entre valores de 1/40 y 1/500 en pendiente positiva y entre 1/500 y 1/200 en pendiente negativa. Las dimensiones del canal son 0,3 m de ancho por 0,46 m de alto y de 12,5 m de longitud, que tiene a la salida una compuerta para regular el nivel según se requiera.

También se tomó en consideración para el proceso de modelización física hidráulica el material para la construcción del modelo, que es determinante a la hora de conformar las diferentes posiciones de la estructura.

Como siguiente paso en el diseño de la experimentación se estableció las variantes de cada una de las variables:

GRAFICO 3-41: VARIACIONES DE Z

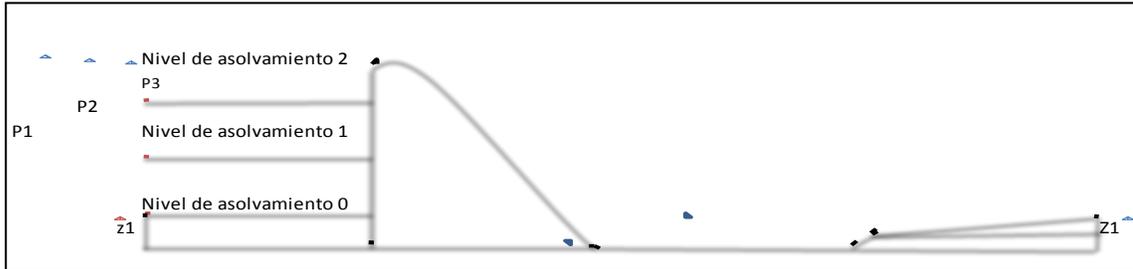


Planteamos 3 niveles de z (GRAFICO 3-23), con el cual tenemos 3 posiciones, para cada una de ellas se realizaron las siguientes variaciones:

Para cada caudal de retorno (100, 50 y 2 años) con las respectivas alturas aguas abajo (Y_3), se realizó la variación de P según el nivel de asolvamiento en P_1, P_2 y P_3 (GRAFICO 3-24) y para cada una de las posiciones de P se modificara también el diámetro del material del enrocado.

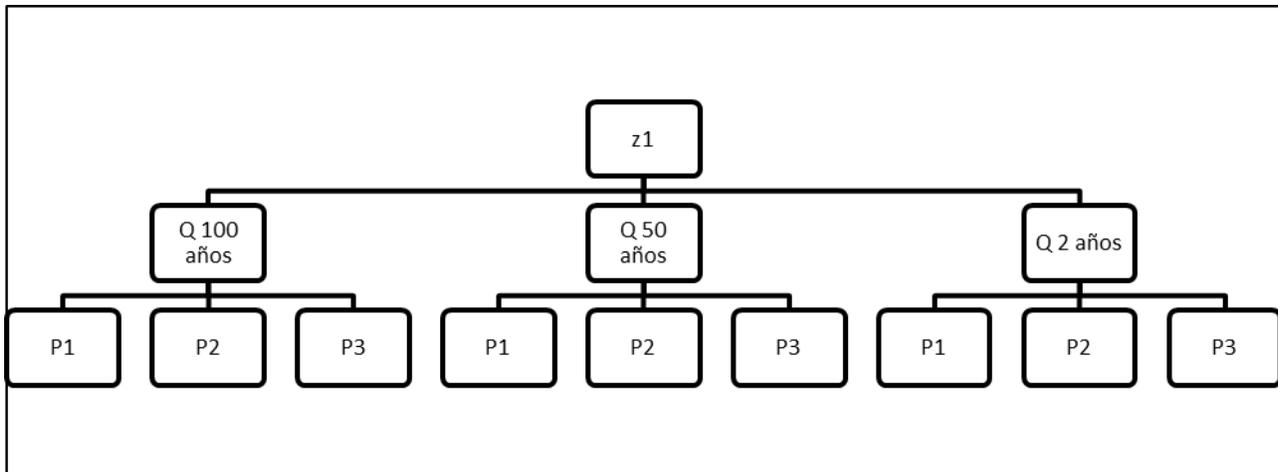


GRAFICO 3-42: VARIACION DE P



En el siguiente cuadro se muestra los ensayos para una posición z_1 , se debe tomar en cuenta que para cada caudal le correspondió su respectiva altura aguas abajo y_3 . Al igual que para cada valor de P un tamaño de material del enrocado.

GRAFICO 3-43: ESQUEMA DE ENSAYOS POSICION Z1



Al igual que para la posición z_1 , los ensayos se realizaron para la posición z_2 , y z_3 .



3.3.6.2 TOMA DE DATOS

El proceso de toma de datos consistió en recopilar la información que se obtiene de las diferentes variaciones de las variables dependientes. Por lo tanto conocidas las variables independientes como el caudal, la profundidad del cuenco, la altura del vertedero y la rugosidad artificial se obtuvo los datos de las variables dependientes.

Para determinar estos datos primero se especifican los valores conocidos o valores independientes:

El caudal Q como ya se mencionó está en función del periodo de retorno y estos son de 100, 50 y 2 años.

El valor de la profundidad del cuenco amortiguador, que se va profundizando mediante el aumento de z y varía desde la posición de diseño $z = z_1$ hasta $z = z_3$, y que además se representan con $h = 0$, $h = 1$ y $h = 2$. El cuenco en el modelo se profundizo de 4.3 cm para $h = 1$ y 8 cm para $h = 2$.

La variación de la altura libre en la cara frontal del azud se estableció en función del azolvamiento de sedimentos, considerando las condiciones extremas, es decir, que no ocurre sedimentación ($P = 13.7 \text{ cm}$), y que la sedimentación colmata casi en su totalidad la altura libre en la cara frontal del azud ($P = 0.7 \text{ cm}$), y una condición de depositación intermedia ($P = 7 \text{ cm}$).

De la rugosidad artificial se probaron dos variantes: la primera está constituida por partículas de un rango de diámetros entre 20 y 50 cm correspondientes al prototipo (1,25 y 3,125 cm en el modelo), y la segunda por partículas de un rango de diámetros entre 30 y 70 cm correspondientes al prototipo (1,875 y 4,375 cm en el modelo).

Para la toma de datos, en las primeras pruebas se estableció las diferentes alturas aguas abajo (calado de agua en el canal bypass) del cuenco según el caudal aplicado. Estas alturas

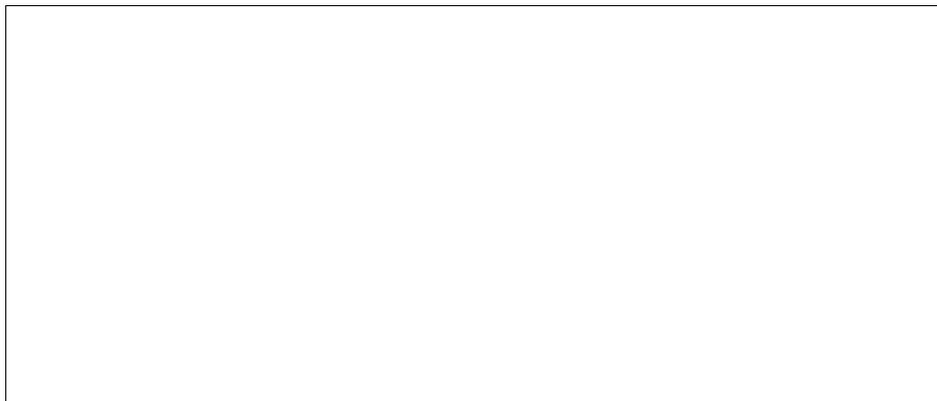


se determinaron mediante un tanteo que tuvo como finalidad buscar las mejores condiciones del flujo, esto con el fin de disminuir la oscilación y la longitud del resalto. Entonces, se tomó como dato de aproximación $y_3 = 3.5 m$ en el prototipo que a la escala correspondiente en el modelo es de 21,88 cm.

Esta altura inicial se caracterizó por producir la sumergencia completa del cuenco, así como el azud (GRAFICO 3-26) y aunque las condiciones aguas abajo se mostraron estables, la sumersión del azud no garantiza una situación estable.

Se optó por la disminución gradual de esta altura aguas abajo hasta encontrar un valor para el cual se equilibra el funcionamiento adecuado de la estructura azud – cuenco dissipador de energía y las condiciones aguas abajo (calado de agua en el canal bypass).

GRAFICO 3-44: CONDICIONES DE FLUJO PARA UN CALADO AGUAS ABAJO DE 3,50 M (PROTOTIPO)



FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011

Mediante experimentación se determinó para el caudal de diseño que el valor más conveniente de y_3 está alrededor de los 2,50 m en el prototipo (es decir 15,63 cm en el modelo), es por esto que los ensayos se realizaron con este calado aguas abajo.

GRAFICO 3-45: ENSAYO PARA: $h = 0$; $P = 13,7$ cm; $D = 50 - 20$ cm; $Q = 19l/s$, VALORES DEL CALADO AGUAS ABAJO DE (a) 2,60 (b) 2,50 (c) 2,40.



(a)

(b)



(c)

FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011

Por lo tanto se estableció luego de varias pruebas lo siguiente:

TABLA 3-6: ALTURA AGUAS ABAJO DEL CUENCO (CALADO DE AGUA EN EL CANAL BYPASS)

Q Período de retorno		Y3	
Años	Q (lt/seg)	Prototipo (m)	Modelo (cm)
*100	23,86	3,00	18,75
50	19	2,50	15,63
2	1,5	1,92	12

- Para el caudal de retorno de 100 años se tomaron valores aproximados ya que por razones de equipos, específicamente por la bomba del canal, no se pudo llegar al valor del gasto, sin embargo se utilizaron caudales muy próximos.

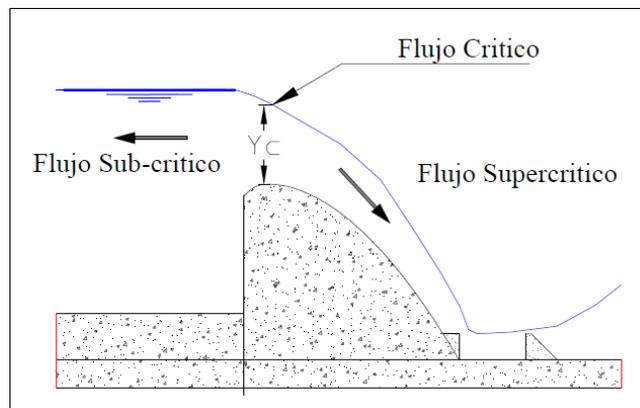
Establecido todos los valores de las variables independientes se procedió con la toma de datos de las variables dependientes mediante el siguiente proceso:

1. Partiendo en la posición de diseño con $z = z_1$ y caudal de 100 años, se midió la altura aguas arriba del azud y se verificó el caudal según nuestra curva de calibración.



2. A través de una compuerta aguas abajo del canal, se procedió a la calibración del calado y_3 .
3. Se midió la altura crítica (GRAFICO 3-28) sobre el vertedero (y_c), esto se hizo con un método aproximado es decir se buscó un punto donde el flujo cambie de sub-crítico a supercrítico.

GRAFICO 3-46: ALTURA CRÍTICA EN EL AZUD



4. Luego se midió aproximadamente el valor de y_1 en la base del cuenco.
5. Posteriormente se midió el valor de y_2 y de forma aproximada la longitud del resalto usando la lectura de la diferencia de abscisas en el canal tomando como punto de inicio la abscisa que corresponde a la lectura de y_1 y la abscisa final en y_2 .
6. Y para finalizar se midió la oscilación aguas abajo.

Se debe tomar en cuenta que para la lectura de los datos previamente se hizo un análisis teórico de los posibles valores, para así tener una referencia y no caer en errores de gran magnitud que pudieran suceder por una mala apreciación al momento de leer las variables dependientes.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Para los casos de azolvamiento aguas arriba del azud las mediciones de las variables aguas abajo son las mismas. Sin embargo existe una variación de la altura para los mismos caudales cuando el azolvamiento es completo y además la posición de la altura crítica (y_c).



CAPITULO 4: EXPERIMENTACION EN EL MODELO HIDRAULICO DE LA DERIVADOA CAÑAR

4.1 RECOPIACIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LA EXPERIMENTACIÓN.

Previamente hecho el diseño de la experimentación y con las variables bien definidas se procedió a la recopilación de los datos con el formato indicado en el Anexo 1.

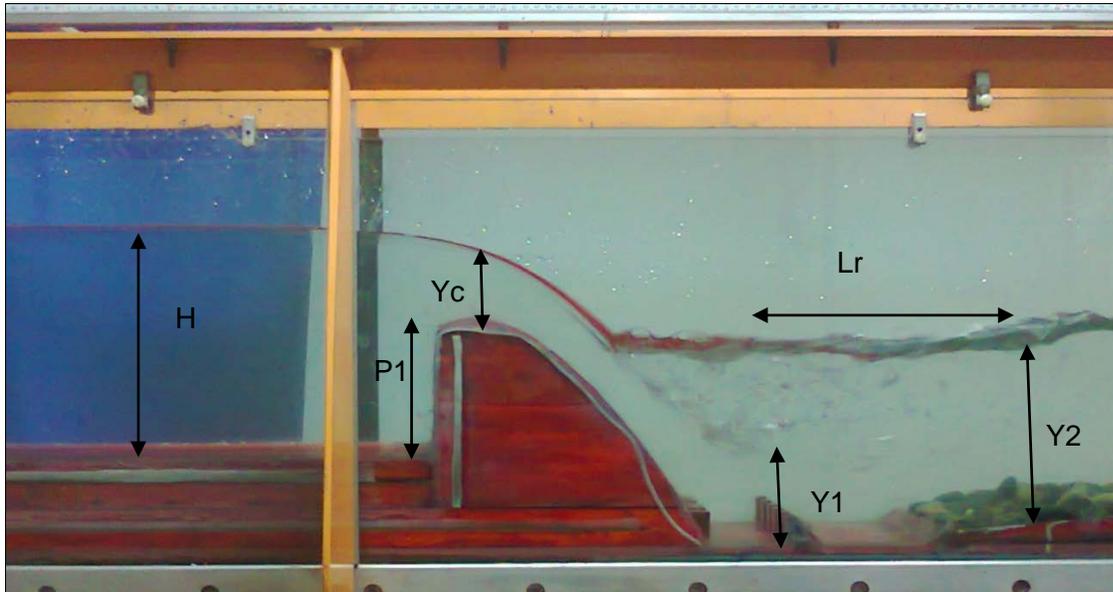
En los GRÁFICOS 4-1, se ilustran una representación de los ensayos para el caudal de diseño con periodo de retorno de 50 años, y un nivel de aguas abajo de 15.63 cm, y la variación de la variable P por motivo del azolvamiento, todo esto para un mismo diámetro del material del enrocado

Se intenta representar una parte del total de ensayos realizados, tomando en cuenta que los experimentos son de carácter repetitivos, para las diferentes variables independientes.

En el GRAFICO 4-1 (a) se pueden observar los parámetros y_1 , y_2 y L_r para el caso en que no se tiene asolvamiento y además se advierte que la longitud del resalto está dentro del cuenco.

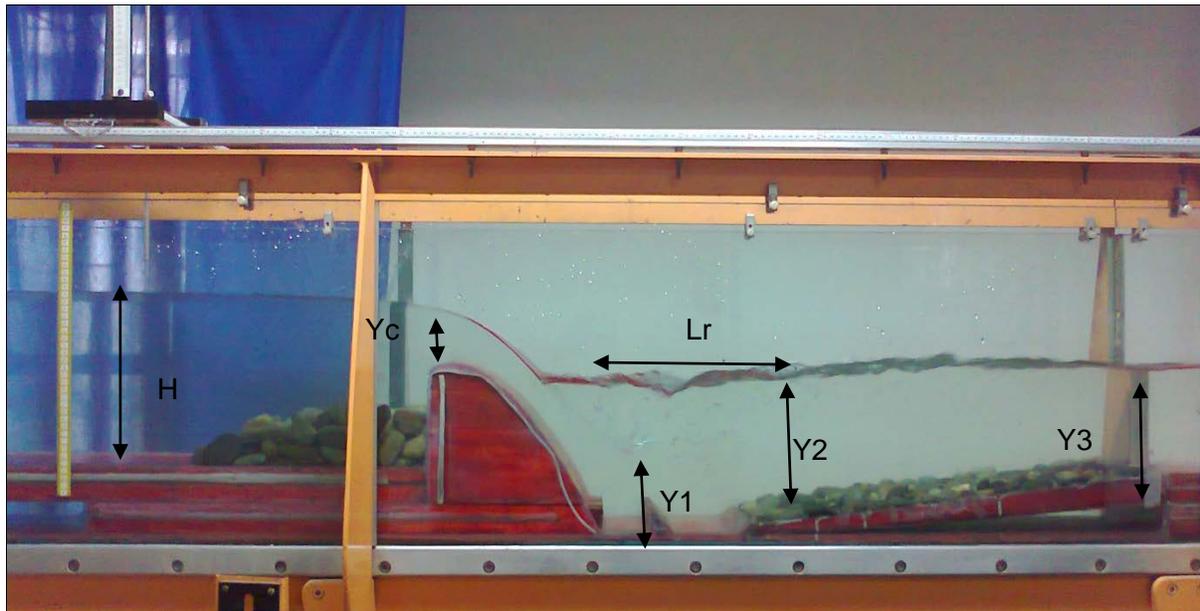


GRAFICO 4-47: ENSAYO CONDICIONES DE DISEÑO PARA: (a) $P = 13.7$ cm, (b) $P = 6.8$ cm (c) $P = 0.00$ cm.



(a)

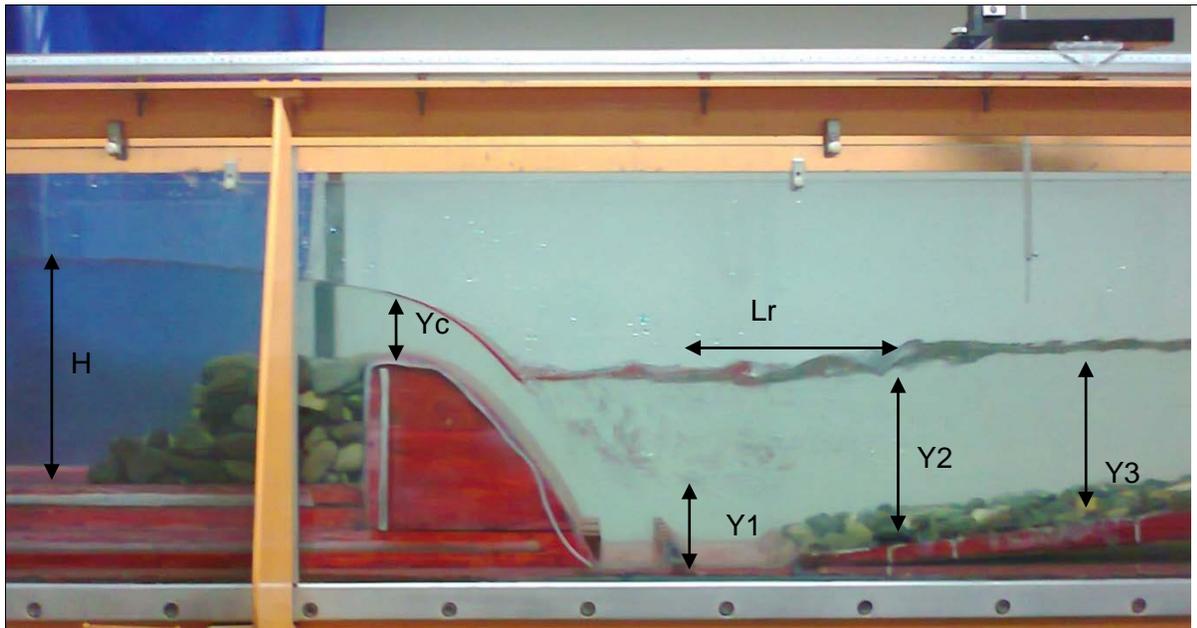
En el GRAFICO 4-1 (b) se representó el asolvamiento mediante material de distinto tamaño pero que en conjunto forma una consolidación de material, además se observa que los parámetros y_1 y y_2 se trasladaron una pequeña distancia aguas abajo y por consiguiente L_r esta fuera de la longitud del cuenco, pero dentro del zampeado.



(b)

En el GRAFICO 4-1 (c) tenemos un asolvamiento aproximadamente completo, el mismo que se formó con el criterio de un asolvamiento gradual, mayor altura en la pared del azud y disminución progresiva hacia aguas arriba.

Se puede notar también que la carga de agua aumento y como resultado advertimos que la ubicación de los parámetro y_1 , y_2 se trasladan aguas abajo y además la L_r queda fuera del cuenco, pero al igual que en el caso anterior dentro del zampeado.



(c)

FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011

Los resultados de los ensayos para el azud y el cuenco disipador con todas las variaciones establecidas se indican a continuación en la TABLA 4-1.

En las columnas correspondientes a los datos calculados, se obtuvieron los datos teóricos de y_1 , y_2 y la longitud del resalto, para luego poder establecer las diferencias entre la medida experimental y la teórica.

Como se explicó previamente se dividieron en variables independientes y variables dependientes para poder hacer el análisis estadístico, así como las comparaciones y las relaciones entre los diferentes parámetros del estudio. Lo que nos permite tener un enfoque claro de lo que sucede al momento de relacionar una variable con otra



VARIABLES INDEPENDIENTES							VARIABLES DEPENDIENTES							DATOS CALCULADOS				
h (cm)	z modelo (cm)	P modelo (cm)	D modelo (cm)	H modelo (cm)	Q modelo (L/s)	y3 modelo (cm)	Oscilación modelo (mm)	Abscisa modelo x (m)	Abscisa modelo y (m)	Longitud Resalto modelo (cm)	y1 modelo (cm)	y2 modelo (cm)	yc modelo (cm)	y2i modelo (cm)	LRi modelo (cm)	yci modelo (cm)	V1 modelo (m/s)	Fr1
0	5,00	13,70	3.125-1.25	23,10	19,00	15,63	8,00	1,706	1,924	21,80	2,70	15,60	7,46	11,04	36,68	7,42	2,348	3,23
0	5,00	13,70	4.375-1.875	23,10	19,00	15,63	5,00	1,673	1,961	28,80	2,70	15,50	7,46	11,04	36,68	7,42	2,348	3,23
0	5,00	6,53	3.125-1.25	23,10	19,00	15,63	5,00	1,673	1,874	20,10	2,70	16,40	7,46	11,04	36,68	7,42	2,348	3,23
0	5,00	6,53	4.375-1.875	23,10	19,00	15,63	5,00	1,686	1,860	17,40	2,70	16,60	7,46	11,04	36,68	7,42	2,348	3,23
0	5,00	0,95	3.125-1.25	23,90	19,00	15,63	7,00	1,690	1,893	20,30	2,66	16,50	6,70	11,14	37,59	7,42	2,3812	3,30
0	5,00	0,95	4.375-1.875	23,90	19,00	15,63	8,00	1,662	1,915	25,30	2,66	15,90	6,70	11,14	37,59	7,42	2,3812	3,30
0	5,00	13,70	3.125-1.25	24,50	23,86	18,75	4,00	1,703	1,968	26,50	3,31	19,10	8,70	12,41	38,75	8,64	2,4058	2,99
0	5,00	13,70	4.375-1.875	24,50	23,86	18,75	4,00	1,680	1,996	31,60	3,31	18,50	8,70	12,41	38,75	8,64	2,4058	2,99
0	5,00	6,55	3.125-1.25	24,50	23,86	18,75	5,00	1,682	1,919	23,70	3,31	19,50	8,60	12,41	38,75	8,64	2,4058	2,99
0	5,00	6,55	4.375-1.875	24,50	23,86	18,75	4,00	1,694	1,940	24,60	3,31	19,40	8,60	12,41	38,75	8,64	2,4058	2,99
0	5,00	0,60	3.125-1.25	25,20	23,86	18,75	4,00	1,715	2,204	48,90	3,27	19,10	9,50	12,509	39,65	8,64	2,4342	3,04
0	5,00	0,60	4.375-1.875	25,20	23,86	18,75	4,00	1,697	1,900	20,30	3,27	18,60	9,50	12,51	39,65	8,64	2,4342	3,04
1	9,64	13,70	3.125-1.25	23,11	19,00	15,63	5,00	1,694	1,977	28,30	2,50	18,55	7,30	11,60	41,60	7,42	2,5349	3,62
1	9,64	13,70	4.375-1.875	23,11	19,00	15,63	4,00	1,667	1,900	23,30	2,50	18,87	7,30	11,60	41,60	7,42	2,5349	3,62
1	9,64	6,70	3.125-1.25	23,11	19,00	15,63	5,00	1,687	1,892	20,50	2,50	19,47	7,50	11,60	41,60	7,42	2,5349	3,62
1	9,64	6,70	4.375-1.875	23,11	19,00	15,63	5,00	1,682	1,892	21,00	2,50	19,32	7,10	11,60	41,60	7,42	2,5349	3,62
1	9,64	1,10	3.125-1.25	23,60	19,00	15,63	5,00	1,710	1,915	20,50	2,48	19,85	7,30	11,66	42,07	7,42	2,5538	3,66
1	9,64	1,10	4.375-1.875	23,60	19,00	15,63	6,00	1,689	1,890	20,10	2,48	19,18	7,30	11,66	42,07	7,42	2,5538	3,66
1	9,64	13,70	3.125-1.25	24,40	23,49	18,75	4,00	1,710	2,105	39,50	3,03	22,50		12,93	44,13	8,55	2,5843	3,35



UNIVERSIDAD DE CUENCA

1	9,64	13,70	4.375-1.874	24,40	23,49	18,75	4,00	1,689	2,034	34,50	3,03	24,13		12,93	44,13	8,55	2,5843	3,35
---	------	-------	-------------	-------	-------	-------	------	-------	-------	-------	------	-------	--	-------	-------	------	--------	------

TABLA 4-7 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DEL AZUD Y CUENCO DISIPADOR DE LA DERIVADORA CAÑAR



VARIABLES INDEPENDIENTES							VARIABLES DEPENDIENTES						DATOS CALCULADOS					
h (cm)	z model (cm)	P model (cm)	D modelo (cm)	H model (cm)	Q mode (L/s)	y3 model (cm)	Oscilación modelo (mm)	Abscisa modelo x (m)	Abscisa modelo y (m)	Longitud Resalto modelo (cm)	y1 model (cm)	y2 model (cm)	yc model (cm)	y2i model (cm)	LRi model (cm)	yci model (cm)	V1 model (m/s)	Fr1
1	9,64	7,10	3.125-1.25	24,40	23,49	18,75	4,00	1,730	2,050	32,00	3,03	25,50		12,93	44,13	8,55	2,5843	3,35
1	9,64	7,10	4.375-1.875	24,40	23,49	18,75	4,00	1,685	2,012	32,70	3,03	24,25		12,93	44,13	8,55	2,5843	3,35
1	9,64	0,80	3.125-1.25	24,90	23,49	18,75	4,00	1,722	2,095	37,30	3,01	25,45		12,99	44,68	8,55	2,6032	3,39
1	9,64	0,80	4.375-1.875	24,90	23,49	18,75	4,00	1,729	2,054	32,50	3,01	24,30		12,99	44,68	8,55	2,6032	3,39
2	13,00	13,70	3.125-1.25	23,10	19,00	15,63	6,00	1,687	1,991	30,40	2,38	24,60	7,50	11,97	44,67	7,42	2,6614	3,89
2	13,00	13,70	4.375-1.875	23,10	19,00	15,63	6,00	1,703	2,036	33,30	2,38	25,70	7,50	11,97	44,67	7,42	2,6614	3,89
2	13,00	6,90	3.125-1.25	23,10	19,00	15,63	6,00	1,715	1,963	24,80	2,38	24,56	7,50	11,97	44,67	7,42	2,6614	3,89
2	13,00	6,90	4.375-1.875	23,10	19,00	15,63	6,00	1,723	1,964	24,10	2,38	25,68	7,50	11,97	44,67	7,42	2,6614	3,89
2	13,00	0,70	3.125-1.25	23,90	19,00	15,63	6,00	1,695	1,993	29,80	2,35	24,49	7,90	12,06	45,35	7,42	2,6907	3,96
2	13,00	0,70	4.375-1.875	23,90	19,00	15,63	6,00	1,723	1,968	24,50	2,35	25,71	7,90	12,06	45,35	7,42	2,6907	3,96
2	13,00	13,70	3.125-1.25	24,30	23,13	18,75	4,00	1,734	1,915	18,10	2,85	23,50	8,50	13,23	47,40	8,46	2,7052	3,62
2	13,00	13,70	4.375-1.875	24,30	23,13	18,75	4,00	1,720	1,952	23,20	2,85	23,70	8,50	13,23	47,40	8,46	2,7052	3,62
2	13,00	6,40	3.125-1.25	24,30	23,13	18,75	4,00	1,699	1,969	27,00	2,85	23,90	8,80	13,23	47,40	8,46	2,7052	3,62
2	13,00	6,40	4.375-1.875	24,30	23,13	18,75	5,00	1,708	1,964	25,60	2,85	23,20	8,80	13,23	47,40	8,46	2,7052	3,62
2	13,00	0,60	3.125-1.25	25,30	23,13	18,75	5,00	1,730	1,955	22,50	2,81	26,40	9,50	13,339	48,35	8,46	2,7413	3,69
2	13,00	0,60	4.375-1.875	25,30	23,13	18,75	5,00	1,720	1,974	25,40	2,81	24,40	9,50	13,34	48,35	8,46	2,7413	3,69

Fuente: PROMAS U. de Cuenca 2011VALIDACIÓN DE DATOS



Para la validación de los datos obtenidos en el laboratorio se procede con un análisis estadístico de las diferentes variables y sus relaciones, obteniendo una tendencia en los datos, lo que nos permite verificar si existen datos erróneos que están fuera de los límites de la mayoría de valores. Se produce una selección minuciosa, verificando que estén en un rango aceptable y que se siga una tendencia.

4.1.1 ANÁLISIS DE LA NORMALIDAD DE LAS MUESTRAS

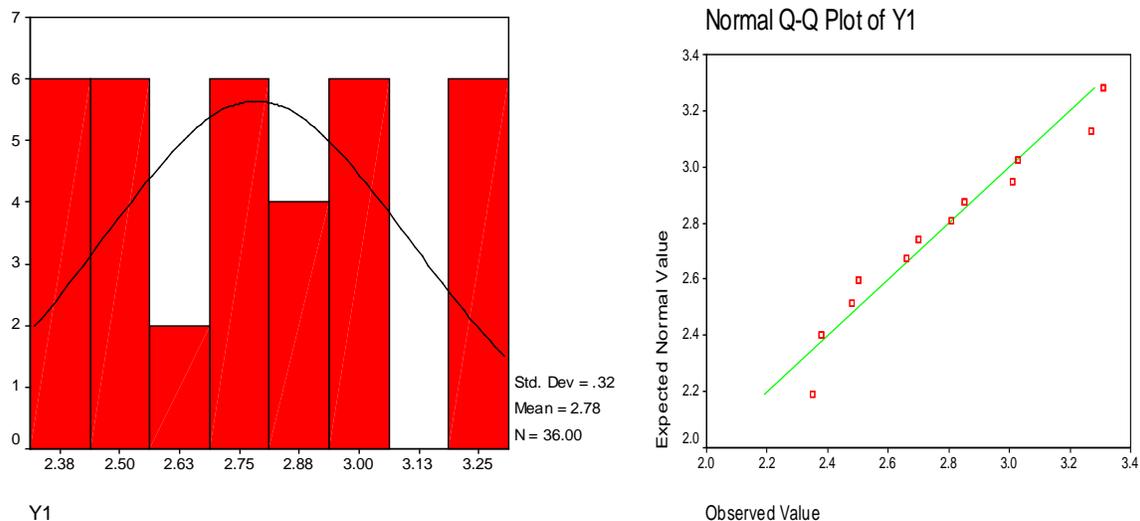
4.1.1.1 GRÁFICOS CUANTIL-CUANTIL (Q-Q PLOTS)

Un gráfico Cuantil-Cuantil permite observar cuan cerca está la distribución de un conjunto de datos a alguna distribución ideal o comparar la distribución de dos conjuntos de datos.

El análisis se realiza para las variables dependientes Y1 y Longitud del resalto:

Y1

GRAFICO 4-48: DISTRIBUCION MUESTRAL PARA Y1

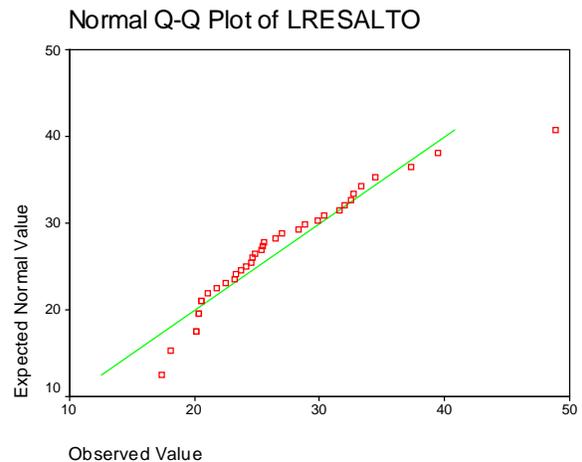
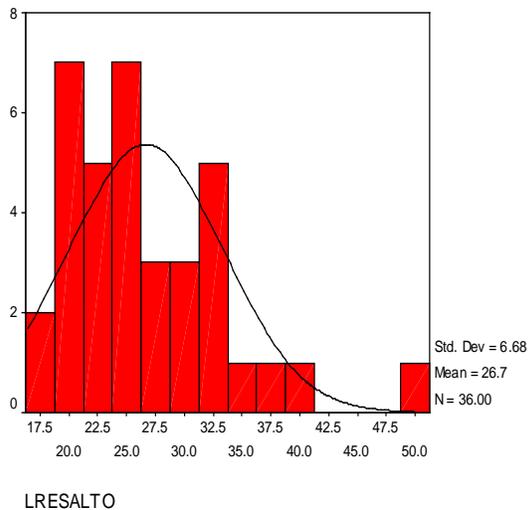


FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011



LONGITUD DEL RESALTO

GRAFICO 4-49: DISTRIBUCION DE MUESTRAS PARA LONGITUD DE RESALTO



FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011

El análisis de la normalidad de las muestras manifiesta que no existe una normalidad marcada en cuando a la longitud del resalto, presentando asimetría positiva, los resultados de Y1 en cambio presentan cierta normalidad de los resultados.

4.1.2 ANÁLISIS DE VARIABLES DEPENDIENTES

Para el análisis de las variables dependientes, básicamente se utilizara una herramienta computacional llamada SPSS Statics 17.0, con este software se llevaron a cabo tres tipos de análisis:



- 1. DIAGRAMAS DE CAJA:** Para la visualización general del comportamiento de las variables en función de los datos de experimentación obtenidos se establece el diagrama de caja para las mismas. Estos diagramas reflejan la dispersión que existe entre los datos en relación al tamaño de la muestra, lo cual se expresa a través de un gráfico elaborado en términos de cuartiles (se requieren cinco tipos de datos para construir un diagrama de caja: el valor mínimo, el primer cuartil, la mediana, el tercer cuartil, y el valor máximo) que dan información respecto de los valores mínimo y máximo, valores atípicos posibles dentro de la muestra, y la simetría de la distribución.
- 2. ANOVA:** El análisis de varianza comúnmente conocido como ANOVA, por las iniciales que se obtienen del nombre en inglés (analysis of variance) se fundamenta en el estudio de las varianzas. Es un método creado para probar la hipótesis de que las medias aritméticas de más de 2 grupos poblacionales son iguales. Se utiliza cuando queremos contrastar más de dos medias, por lo que puede verse como una extensión de la prueba t para diferencias de dos medias. Técnicamente el ANOVA, desarrolla un contraste de hipótesis estadísticas, que afecta simultáneamente a los [valores medios](#) o esperados de k poblaciones ([variables aleatorias](#)) con [distribución normal](#) y homoscedásticas, es decir, con idénticas [varianzas](#).
- 3. PRUEBA DE TUKEY:** Técnica fundamental que, en su diseño más sencillo, desarrolla un contraste de hipótesis estadísticas, que afecta simultáneamente a los [valores medios](#) o esperados de k poblaciones ([variables aleatorias](#)) con [distribución normal](#) y homoscedásticas, es decir, con idénticas [varianzas](#).

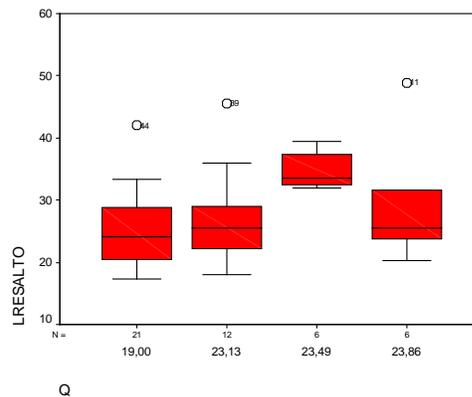
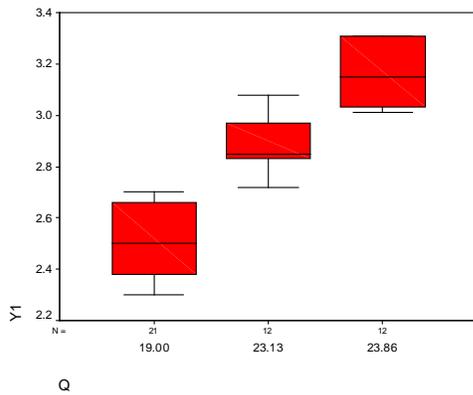
El análisis estadístico para cada variable dependiente se realizó en función de cada variable independiente, esto con el fin de relacionar los dos tipos de variables y determinar la relación y afectación que se produce entre estas; así se tiene el análisis:



4.1.2.1 EN FUNCIÓN DEL CAUDAL:

4.1.2.1.1 DIAGRAMAS DE CAJA:

GRAFICO 4-50: DIAGRAMAS DE CAJA PARA Y1 Y LONGITUD DE RESALTO EN FUNCIÓN DEL CAUDAL



FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011

La variación del caudal presenta un incremento lógico de del parámetro Y1, ya que a mayor caudal, el resalto esperado será mayor, para la longitud del resalto parece que el grupo de análisis con el tercer valor de caudal esta fuera de la tendencia, estas variaciones se notaran más significativamente con el análisis ANOVA.



4.1.2.1.2 ANOVA Q:

TABLA 4-8: Análisis ANOVA para Y1 y Longitud del Resalto en Función del Caudal

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
LRESALTO	Between Groups	603.834	3	201.278	6.713	.001
	Within Groups	959.518	32	29.985		
	Total	1563.352	35			
Y1	Between Groups	3.224	3	1.075	109.370	.000
	Within Groups	.314	32	9.825E-03		
	Total	3.538	35			

FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011

4.1.2.1.3 PRUEBA DE TUKEY:

TABLA 4-9: PRUEBA DE TUKEY PARA Y1 Y LONGITUD DEL RESALTO EN FUNCIÓN DEL CAUDAL

Dependent Variable	(I) Q	(J) Q	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LRESALTO	19.00	23.13	.4944	2.5813	.997	-6.4994	7.4883
		23.49	-10.6222*	2.5813	.001	-17.6161	-3.6284
		23.86	-5.1389	2.5813	.213	-12.1327	1.8550
	23.13	19.00	-.4944	2.5813	.997	-7.4883	6.4994
		23.49	-11.1167*	3.1615	.007	-19.6824	-2.5510
		23.86	-5.6333	3.1615	.300	-14.1990	2.9324
	23.49	19.00	10.6222*	2.5813	.001	3.6284	17.6161
		23.13	11.1167*	3.1615	.007	2.5510	19.6824
		23.86	5.4833	3.1615	.323	-3.0824	14.0490
	23.86	19.00	5.1389	2.5813	.213	-1.8550	12.1327
		23.13	5.6333	3.1615	.300	-2.9324	14.1990
		23.49	-5.4833	3.1615	.323	-14.0490	3.0824
Y1	19.00	23.13	-.3200*	4.673E-02	.000	-.4466	-.1934
		23.49	-.5067*	4.673E-02	.000	-.6333	-.3801
		23.86	-.7800*	4.673E-02	.000	-.9066	-.6534
	23.13	19.00	.3200*	4.673E-02	.000	.1934	.4466
		23.49	-.1867*	5.723E-02	.013	-.3417	-3.16E-02
		23.86	-.4600*	5.723E-02	.000	-.6151	-.3049
	23.49	19.00	.5067*	4.673E-02	.000	.3801	.6333
		23.13	.1867*	5.723E-02	.013	3.161E-02	.3417
		23.86	-.2733*	5.723E-02	.000	-.4284	-.1183
	23.86	19.00	.7800*	4.673E-02	.000	.6534	.9066
		23.13	.4600*	5.723E-02	.000	.3049	.6151
		23.49	.2733*	5.723E-02	.000	.1183	.4284

FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011

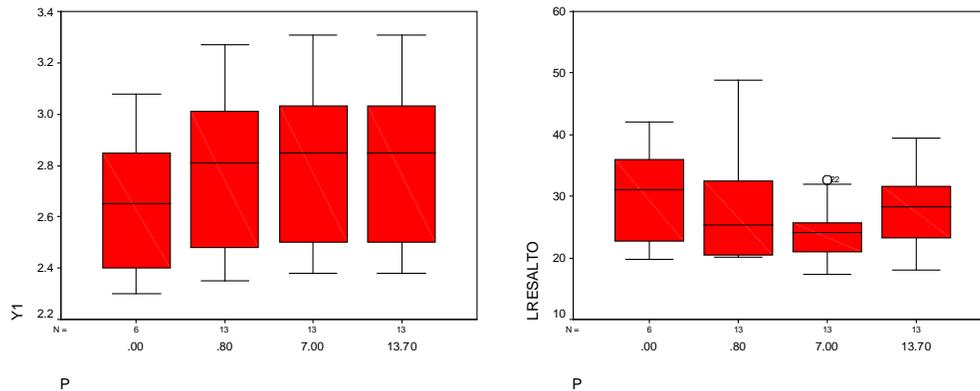


Los resultados indican que a un nivel de significancia del 95%, los caudales presentan resultados diferentes, dicho de otra manera los diferentes caudales ocasionan variabilidad en las lecturas de Y1 y Longitud del resalto.

4.1.2.2 EN FUNCIÓN DE P (PARAMENTO DEL AZUD)

4.1.2.2.1 DIAGRAMAS DE CAJA:

GRAFICO 4-51: DIAGRAMAS DE CAJA PARA Y1 Y LONGITUD DE RESALTO EN FUNCIÓN DEL PARAMENTO DEL AZUD



FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011

Las diferentes alturas de P no presentan en este análisis de diagrama de caja variaciones significativas para los parámetros Y1 y LR (longitud del resalto), siendo una variable no significativa al momento, se debe ensayar con un valor de $P = 0$ para verificar los resultados cuando el azud empiece a comportarse como un vertedero de pared gruesa.

4.1.2.2.2 ANOVA P:

TABLA 4-10: ANÁLISIS ANOVA PARA Y1 Y LONGITUD DEL RESALTO EN FUNCIÓN DE P



		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
LRESALTO	Between Groups	211.743	3	70.581	1.362	.268
	Within Groups	2124.989	41	51.829		
	Total	2336.732	44			
Y1	Between Groups	.117	3	3.907E-02	.395	.757
	Within Groups	4.052	41	9.883E-02		
	Total	4.169	44			

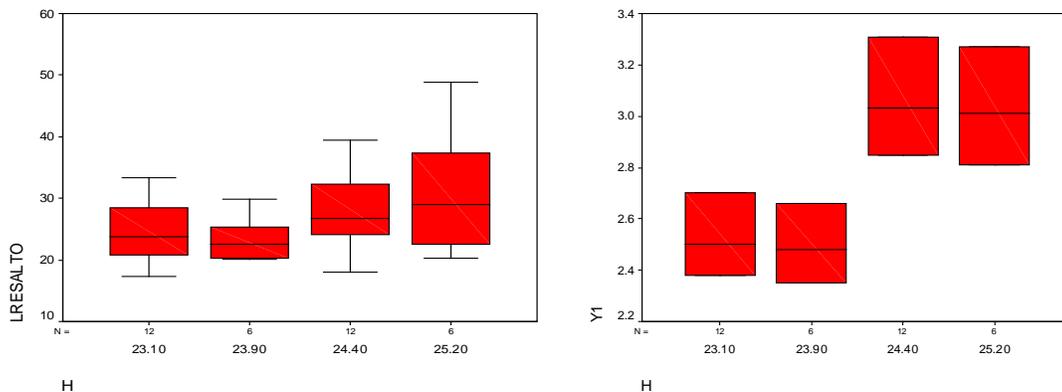
FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011

Las pruebas son altamente significativas al nivel de análisis 0.05%, se concluye que el valor o rangos de P no son significativos en los valores de Y1, Y2, y longitud del resalto

4.1.2.3 EN FUNCIÓN DE H (ALTURA AGUAS ARRIBA DEL AZUD)

4.1.2.3.1 DIAGRAMAS DE CAJA:

GRAFICO 4-52: DIAGRAMAS DE CAJA PARA Y1 Y LONGITUD DE RESALTO EN FUNCIÓN DE LA ALTURA AGUAS ARRIBA DEL AZUD H



FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011

La altura aguas arriba del azud presenta dos tipos de tendencia, valores menores para los dos primeros grupos de altura (más bajos) y calados mayores para Y1 con alturas sobre el azud



mayores, situación que se puede explicar por la forma del diseño del cuenca dissipador con los bloques de choque.

4.1.2.3.2 ANOVA H:

TABLA 4-11: ANÁLISIS ANOVA PARA Y1 Y LONGITUD DEL RESALTO EN FUNCIÓN DE H

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
LRESALTO	Between Groups	271.262	3	90.421	2.239	.103
	Within Groups	1292.090	32	40.378		
	Total	1563.352	35			
Y1	Between Groups	2.589	3	.863	29.115	.000
	Within Groups	.949	32	2.965E-02		
	Total	3.538	35			

FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011

El factor H resulta no significativo dentro del análisis de Y1, se acepta la hipótesis alternativa que a diferente valor de H la variable Y1 presenta diferentes resultados. Lo que no ocurre con la longitud del resalto que se muestra significativa al nivel de análisis. Para estudiar un poco más a la variable Y1 se analiza en pares para determinar que muestra está afectando el análisis de varios grupos.

4.1.2.3.3 PRUEBA DE TUKEY

TABLA 4-12: PRUEBA DE TUKEY PARA Y1 Y LONGITUD DEL RESALTO EN FUNCIÓN DE H



Dependent Variable	(I) H	(J) H	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95 % Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LRESALTO	23.10	23.90	1.0667	3.1772	.987	-7.5415	9.6749
		24.40	-3.7667	2.5942	.477	-10.7952	3.2619
		25.20	-6.6667	3.1772	.175	-15.2749	1.9415
	23.90	23.10	-1.0667	3.1772	.987	-9.6749	7.5415
		24.40	-4.8333	3.1772	.437	-13.4415	3.7749
		25.20	-7.7333	3.6687	.172	-17.6732	2.2066
	24.40	23.10	3.7667	2.5942	.477	-3.2619	10.7952
		23.90	4.8333	3.1772	.437	-3.7749	13.4415
		25.20	-2.9000	3.1772	.798	-11.5082	5.7082
	25.20	23.10	6.6667	3.1772	.175	-1.9415	15.2749
		23.90	7.7333	3.6687	.172	-2.2066	17.6732
		24.40	2.9000	3.1772	.798	-5.7082	11.5082
Y1	23.10	23.90	3.000E-02	8.609E-02	.985	-.2033	.2633
		24.40	-.5367*	7.029E-02	.000	-.7271	-.3462
		25.20	-.5033*	8.609E-02	.000	-.7366	-.2701
	23.90	23.10	-3.000E-02	8.609E-02	.985	-.2633	.2033
		24.40	-.5667*	8.609E-02	.000	-.7999	-.3334
		25.20	-.5333*	9.941E-02	.000	-.8027	-.2640
	24.40	23.10	.5367*	7.029E-02	.000	.3462	.7271
		23.90	.5667*	8.609E-02	.000	.3334	.7999
		25.20	3.333E-02	8.609E-02	.980	-.1999	.2666
	25.20	23.10	.5033*	8.609E-02	.000	.2701	.7366
		23.90	.5333*	9.941E-02	.000	.2640	.8027
		24.40	-3.333E-02	8.609E-02	.980	-.2666	.1999

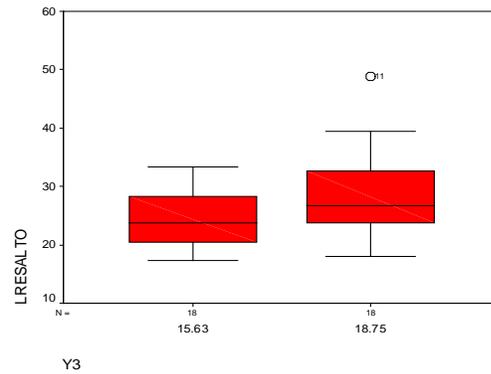
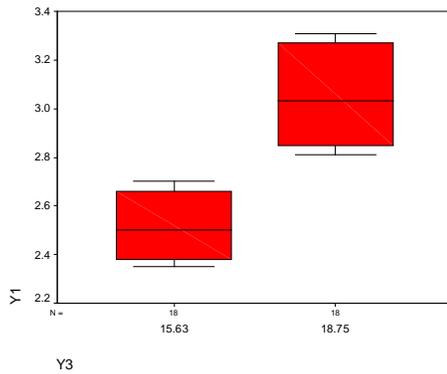
FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011

Del análisis múltiple se detecta que para las experimentaciones de Y1 existen dos grupos con alta significancia. El primero formado por los dos valores menores de H (23.1 y 23.9) y por otro las valores mayores (24.4 y 25.2), la significancia para ambos es de 0.98, cualquier otra combinación entre las muestras no tiene ninguna significancia estadística.

4.1.2.4 EN FUNCIÓN DE Y3 (ALTURA AGUAS ABAJO)

4.1.2.4.1 DIAGRAMAS DE CAJA

GRAFICO 4-53: DIAGRAMAS DE CAJA PARA Y1 Y LONGITUD DE RESALTO EN FUNCIÓN DE LA ALTURA AGUAS ABAJO DEL AZUD Y3



FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011

4.1.2.4.2 ANOVA Y3

TABLA 4-13: ANÁLISIS ANOVA PARA Y1 Y LONGITUD DEL RESALTO EN FUNCIÓN DE Y3

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
LRESALTO	Between Groups	233.071	1	233.071	5.957	.020
	Within Groups	1330.281	34	39.126		
	Total	1563.352	35			
Y1	Between Groups	2.581	1	2.581	91.738	.000
	Within Groups	.957	34	2.814E-02		
	Total	3.538	35			

FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011

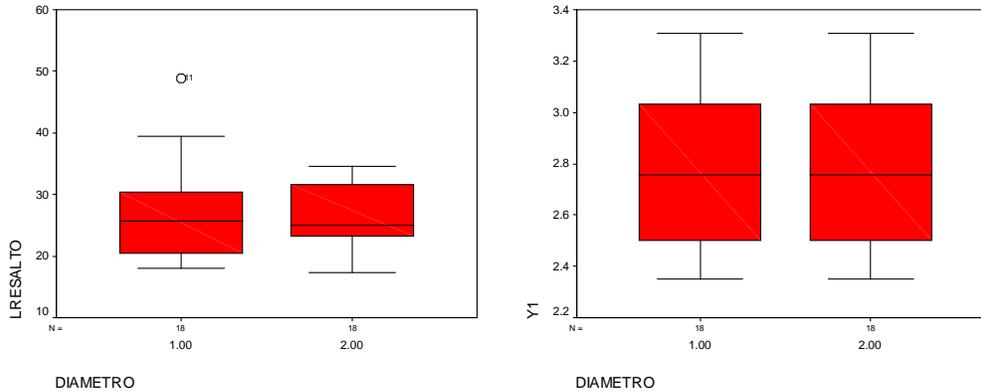
La altura aguas abajo de la obra de disipación manifiesta que para calados mayores aumenta la altura del resalto de forma significativa y un incremento apreciable de la longitud del resalto.

4.1.2.5 EN FUNCIÓN DE D (DIÁMETRO DE LAS PARTÍCULAS DEL ZAMPEADO)

4.1.2.5.1 DIAGRAMAS DE CAJA



GRAFICO 4-54: DIAGRAMAS DE CAJA PARA Y1 Y LONGITUD DE RESALTO EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO DE LAS PARTICULAS DEL ZAMPEADO D



FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011

El diagrama de caja indica que para las muestras consideradas con la variación del diámetro de las partículas este efecto es irrelevante, prácticamente se tienen los mismos resultados de longitud del resalto y la Altura contraída Y1.

4.1.2.5.2 ANOVA D

TABLA 4-14: ANÁLISIS ANOVA PARA Y1 Y LONGITUD DEL RESALTO EN FUNCIÓN DE Y3

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
LRESALTO	Between Groups	15.734	1	15.734	.346	.560
	Within Groups	1547.618	34	45.518		
	Total	1563.352	35			
Y1	Between Groups	.000	1	.000	.000	1.000
	Within Groups	3.538	34	.104		
	Total	3.538	35			

FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011

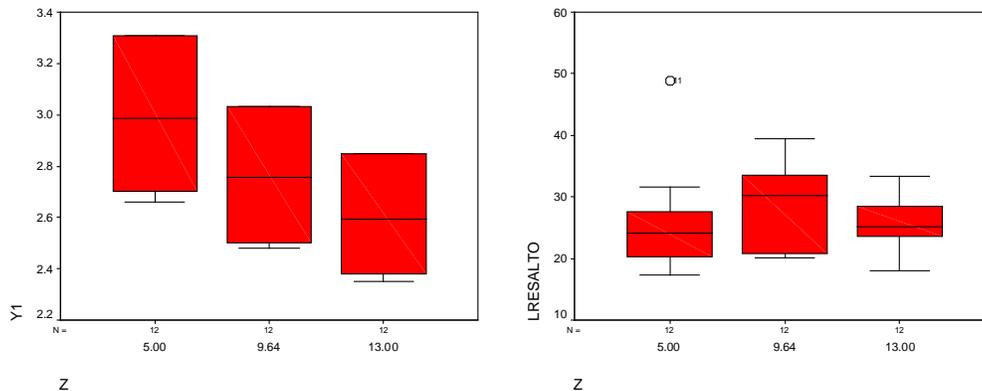
Los ensayos son altamente significativos, el diámetro de las piedras no influyen en el comportamiento del resalto hidráulico del modelo.



4.1.2.6 EN FUNCIÓN DE Z (PROFUNDIDAD DEL CUENCO)

4.1.2.6.1 DIAGRAMAS DE CAJA

GRAFICO 4-55: DIAGRAMAS DE CAJA PARA Y1 Y LONGITUD DE RESALTO EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL CUENCO Z



FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011

Cuando se profundizo el cuenco amortiguador se presentan los siguientes resultados visuales; por un lado la altura de Y1 disminuye con la profundidad y la longitud del resalto parece no tener mayor influencia a partir de la profundización, con el análisis estadístico ANOVA se despejaron algunas dudas adicionales.

4.1.2.6.2 ANOVA Z

TABLA 4-15: ANÁLISIS ANOVA PARA Y1 Y LONGITUD DEL RESALTO EN FUNCIÓN DE Z

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Y1	Between Groups	.917	2	.459	5.773	.007
	Within Groups	2.621	33	7.942E-02		
	Total	3.538	35			
LRESALTO	Between Groups	61.251	2	30.625	.673	.517
	Within Groups	1502.102	33	45.518		
	Total	1563.352	35			

FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011



Para la profundización del cuenco tenemos una alta significancia de similitud para la longitud del resalto, aceptando la hipótesis nula, sin embargo para el parámetro Y1 no existe significancia estadística, por tanto esta variable cambia a la variación de la profundización del cuenco amortiguador.

4.1.2.6.3 PRUEBA DE TUKEY

TABLA 4-16: PRUEBA DE TUKEY PARA Y1 Y LONGITUD DEL RESALTO EN FUNCIÓN DE Z

Dependent Variable	(I) Z	(J) Z	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Y1	5.00	9.64	.2333	.1151	.121	-4.90E-02	.5157
		13.00	.3883*	.1151	.005	.1060	.6707
	9.64	5.00	-.2333	.1151	.121	-.5157	4.899E-02
		13.00	.1550	.1151	.380	-.1273	.4373
	13.00	5.00	-.3883*	.1151	.005	-.6707	-.1060
		9.64	-.1550	.1151	.380	-.4373	.1273
LRESALTO	5.00	9.64	-2.7417	2.7543	.585	-9.5002	4.0169
		13.00	5.000E-02	2.7543	1.000	-6.7086	6.8086
	9.64	5.00	2.7417	2.7543	.585	-4.0169	9.5002
		13.00	2.7917	2.7543	.574	-3.9669	9.5502
	13.00	5.00	-5.000E-02	2.7543	1.000	-6.8086	6.7086
		9.64	-2.7917	2.7543	.574	-9.5502	3.9669

FUENTE: PROMAS U. DE CUENCA 2011



CAPITULO 5: RESULTADOS Y DISCUSION

5.1 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

En el análisis de los datos se procedió a verificar que las relaciones entre las diferentes variables tengan una secuencia lógica y que además nos permitan interpretar de manera directa la validez de los datos obtenidos en el laboratorio.

Debido a las condiciones de sumergencia del azud, no es posible determinar de una manera confiable los valores de y_2 , razón por la cual no se presenta el análisis estadístico para esta variable dependiente.

Una vez realizado el análisis de normalidad, se identifica una clara consistencia del comportamiento con una distribución normal para las variables con excepción del calado y_2 , esto debido a las condiciones de sumergencia antes expuestas

Del tratamiento estadístico mediante diagramas de caja para las variables dependientes: Calado contraído y_1 , y Longitud del resalto L_r , se concluye lo siguiente:

- Para variaciones pequeñas de la profundidad del paramento aguas arriba P , no se presentan cambios significativos para las variables del modelo y_1 , y L_r , esto dentro de condiciones límite en cuanto a variación de caudales simulados.
- En el modelamiento se determinó que, para incrementos sobre el caudal de diseño que corresponde a un periodo de retorno de 50 años (19 lts/s), hasta valores próximos al caudal correspondiente a un periodo de retorno de 100 años



(aproximadamente 23.86 lts/s), se observó un aumento del 25%, y 30% en las variables y_1 , y L_r respectivamente, esto en relación a sus valores medios.

- El calado aguas abajo del modelo y_3 , incide directamente sobre la variable y_1 esto debido a la condición de sumergencia que se produce en el modelo, afectando principalmente la ubicación de y_1 dentro del cuenco, teniendo como consecuencia inmediata variaciones en la posición del resalto mas no en su longitud L_r ,
- El análisis de las variables en relación al diámetro del material que corresponde dentro del modelo a rangos de tamaño de partícula del enrocado del zampeado entre 1,25 a 3,125 cm, y 1,875 a 4,375, no tiene ninguna influencia sobre las variables estudiadas, conclusión arrojada por los diagramas de caja realizados.
- Mediante la profundización del cuenco del modelo z , se pudo llegar a verificar la concordancia entre los valores teóricos y experimentales en lo que se refiere al calado contraído y_1 que presenta disminución (80% en términos relativos) a medida que z aumenta, verificando la lógica teórica que nos dice que a mayor carga, mayor velocidad y por lo tanto para el mismo caudal se tendrá menor y_1 ; en cuanto a L_r se observó una disminución aproximada del 15%.
- El análisis de varianza realizado a las variables permite confirmar las interpretaciones señaladas anteriormente en términos del grado de significancia alcanzado en el estudio estadístico.



5.2 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha realizado la investigación en el modelo físico de escala reducido para un cuenco de dissipador de energía tipo SAF perteneciente al PROYECTO DE CONTROL DE INUNDACIONES BULUBULU-CAÑAR-NARANJAL, el mismo que ha permitido establecer las condiciones de flujo existentes en las estructuras pertenecientes a la derivadora Cañar y a la vez prever el correcto desempeño de las obras hidráulicas durante su etapa de funcionamiento.

A partir de los análisis de varianza obtenidos para el modelo, se puede concluir que el comportamiento hidráulico para el prototipo será adecuado en los términos planteados en el diseño y que los eventos hidrológicos y caudales de circulación serán manejados apropiadamente por las estructuras tanto de derivación como de disipación del cuenco; todo esto a causa de los resultados antes expuestos, mediante los cuales se ha establecido la caracterización de las variables relevantes involucradas y la validación de los procesos de flujo estudiados.

El hecho de que una variación del paramento aguas arriba no incida sobre las variables y_1 , y L_r del modelo, se interpretaría en el sentido de que la longitud de resalto proyectada para el prototipo no debe ser revisada en este sentido pues no existe azolvamiento completo del cauce, sin embargo la experimentación ha identificado que al darse un azolvamiento completo se afectarían las variables de interés para el diseño, por lo tanto se sugiere completar la experimentación mediante un azolvamiento completo hacia aguas arriba para establecer el posible efecto en las condiciones de la disipación de energía dado que el coeficiente de descarga del azud se transformará significativamente.

La longitud mínima del resalto en el prototipo será de **2.78 m** con el caudal de diseño, la máxima de **7.82 m** con caudal cercano al periodo de retorno de 100 años, si tenemos en cuenta que la longitud del cuenco es **3.4 m** y más el zampeado o enrocado es **13.4 m**, significa que el valor mínimo está dentro del cuenco, el medio y el máximo está fuera pero dentro del enrocado



Se espera que para el prototipo tomando como referencia valores medios, la longitud del resalto L_r sea igual a 4.39 m . aproximadamente y que para el evento extremo de 100 años esta longitud se incremente hasta 5.7 m .; este resalto máximo debe estar ubicado dentro de los 13.44 m . correspondientes a la longitud del zameado L_c más la longitud total del cuenco SAF L_B , siendo esta una condición fundamental para la implementación de las estructuras y la protección del cuenco.

Para un incremento de caudal en el prototipo de $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ (Periodo de retorno de 50 años) a caudales de $1400 \text{ m}^3/\text{s}$ (cercaos al periodo de retorno de 100 años) se espera un incremento de la variable y_1 , de 0.44 m a 0.55 m lo que significa que a pesar de un aumento en el caudal y por consiguiente en la carga de agua sobre el azud las condiciones seguirán siendo estables.

Se verificó también el cumplimiento lógico de la disminución de y_1 en el prototipo cuando aumenta z , que corresponde al cambio de la posición 1 a la posición 3, y se notó que para el caudal de aproximado de 100 años este valor decrece de 0.53 m a 0.36 m .

En la siguiente gráfica se puede ver la altura y_1 que corresponde al caudal de 50 años y la posición 1, lo que significa que el valor de $z = 5 \text{ cm}$.

Para el caso de esta gráfica el valor de y_1 en el prototipo está alrededor de 0.43 m sin nivel de asolvamiento, además cabe recalcar que para estos casos no incide significativamente este factor.

GRAFICO 5-56 CALADO CONTRAIDO Y1 PARA POSICION 1



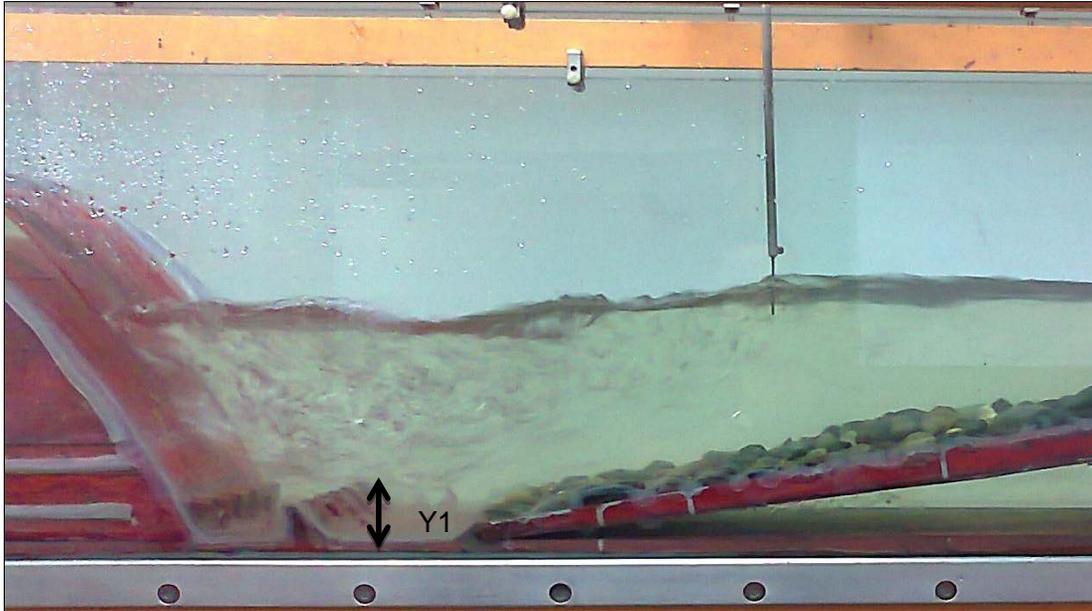
Tenemos también el GRAFICO 5-2 correspondiente al caudal de diseño y la posición 3, con un valor de z estimado en 13 cm ,produciéndose un aumento en la altura de caída y por consiguiente una disminución en el parámetro y_1 .

El valor en prototipo de y_1 para este caso en particular es de 0.38 m y asimismo para el caso de la posición 1 tampoco influye el asolvamiento.

Por lo tanto se puede concluir que y_1 disminuye en un 15 % considerando el aumento de z de 5 cm a 13 cm, para el caudal de diseño y para un nivel de asolvamiento cero.



GRAFICO 5-57 CALADO CONTRAIDO Y1 PARA POSICION 3



Fuente: PROMAS U. de Cuenca 2011

Debido a que no se tiene un método confiable para medir en el modelo la variable y_2 se omitió la interpretación estadística de las diferentes variables con relación a este parámetro. Cabe recalcar que en la actualidad no se dispone de fundamentación teórica para para longitud del resalto en cuencos de disipación tipo SAF.

El modelo físico reducido es una ayuda importante para el diseño de las obras hidráulicas difíciles de analizar por medio de un modelo matemático, siempre y cuando el diseño de un modelo reducido sea correcto, esté bien operado y los resultados sean interpretados con sentido crítico.

De acuerdo a los resultados obtenidos experimentalmente en la práctica, los parámetros de condición de flujo y condiciones externas (canal, accesorios, etc.) son factores determinantes en la obtención de los valores experimentales; razón por la cual se debe seguir un procedimiento riguroso para la toma de datos y así obtener resultados confiables para su consecuente análisis.



Para futuras experiencias con modelos se recomienda emplear métodos de medición digitales empleando las diversas tecnologías con las que en la actualidad se dispone, mejorando de esta manera los procesos de toma y calibración de datos en los modelos.

De la experiencia realizada se recomienda el modelamiento de las estructuras a escala reducida, por el beneficio cuantitativo al diseño de las obras, puesto que en este análisis se pueden observar fenómenos hidráulicos que difícilmente puede ser modelado por métodos matemáticos.

Asimismo, se recomienda la aplicación de este tipo de técnicas para obras de gran envergadura, considerando que aunque este tipo de modelamientos representan costos mínimos en relación a los costos del prototipo, los resultados que se obtienen son de cuantiosa utilidad y podrían jugar un papel importante en el diseño definitivo de las obras.



BIBLIOGRAFIA

CHANSON, H. (2004). *THE HIDRAULICS OF OPEN CHANNEL FLOW*. ELSEVIER BUTTERWORTH-HEINEMANN.

CHOW, V. T. (1994). *HIDRÁULICA DE CANALES ABIERTOS*. MCGRAW-HILL INTERAMERICANA.

FRENCH, R. H. (1988). *HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS*. MEXICO: MC GRAW HILL ITERAMERICANA DE MEXICO S.A. DE C.V.

[HTTP://FLUIDOS.EIA.EDU.CO/OBRASHIDRAULICAS/ARTICULOS/MODELACIONHIDRAULICA/MODELACION_HIDRAULICA.HTML](http://fluidos.eia.edu.co/OBRASHIDRAULICAS/ARTICULOS/MODELACIONHIDRAULICA/MODELACION_HIDRAULICA.HTML).

PROMAS. (2011). *ESTUDIOS HIDROLOGICOS, CLIMATOLOGICOS Y MODELOS HIDRAULICOS, EN EL MARCO DEL PROYECTO DE CONTROL DE INUNDACIONES BULUBULU- CAÑAR - NARANJAL*.

PROMAS. (2011). *ESTUDIOS HIDROLOGICOS, CLIMATOLOGICOS Y MODELOS HIDRAULICOS, EN EL MARCO DEL PROYECTO DE CONTROL DE INUNDACIONES BULUBULU- CAÑAR - NARANJAL*. CUENCA.

SOTELO AVILA, G. (2002). *HIDRAULICA DE CANALES*, MEXICO UNAM, FACULTAD DE INGENIERIA .

U. S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. (2006). *HYDRAULIC DESING OF ENERGY DISSIPATORS* (VOL. 14).

U.S BUREAU OF RECLAMATION. (1987). *DESING OF SMALL DAMS. A WATER RESOURCES TECHNICAL PUBLICATION*.

VICTOR L. STREETER, E. B. (1988). *MECANICA DE LOS FLUIDOS* . MCGRAW-HILL.



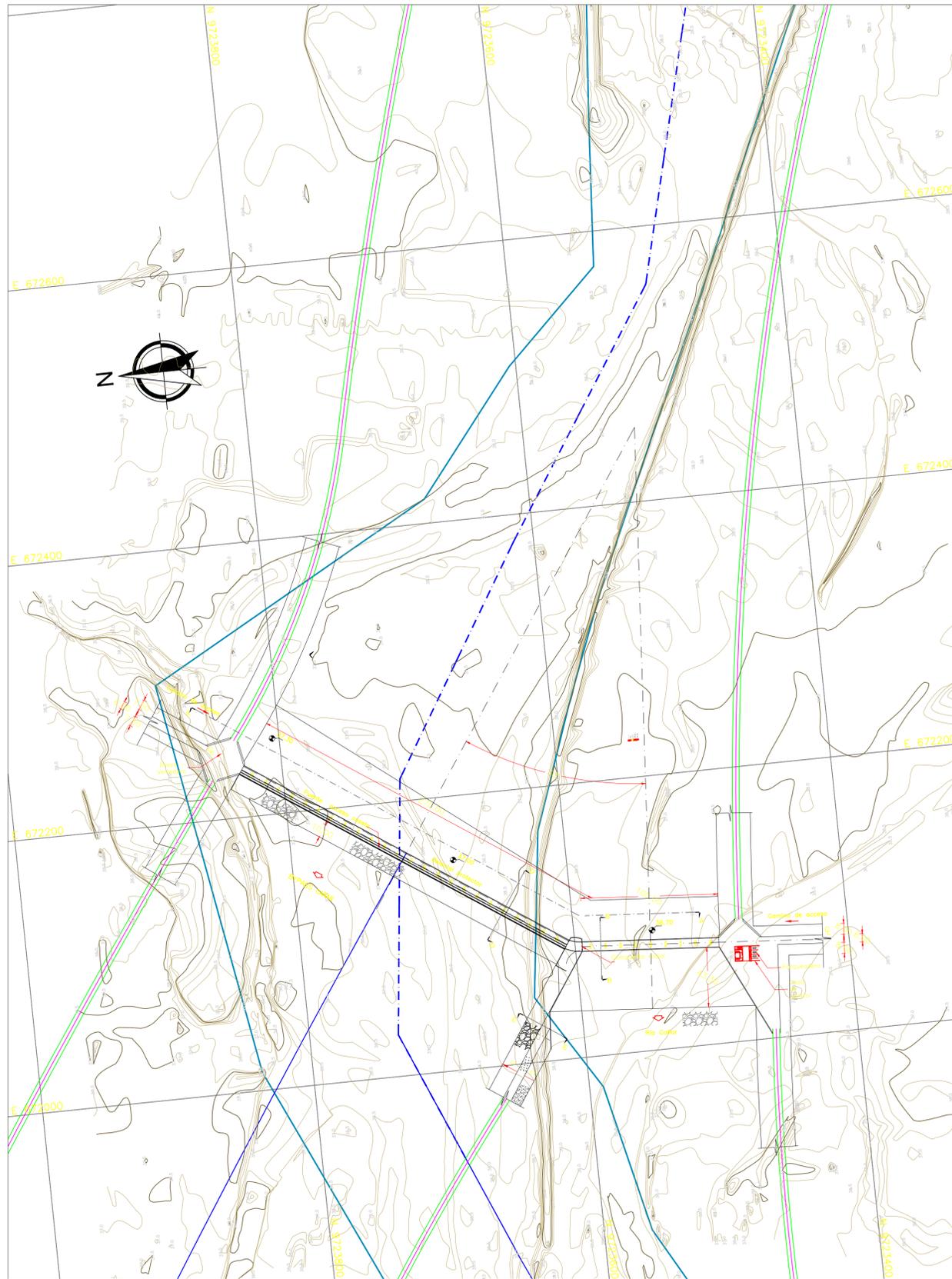
UNIVERSIDAD DE CUENCA

ANEXOS

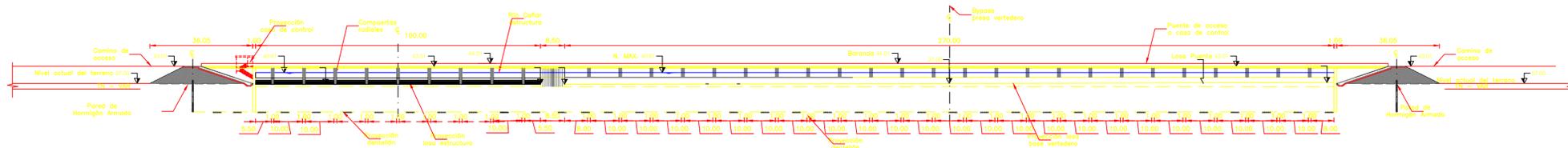


UNIVERSIDAD DE CUENCA

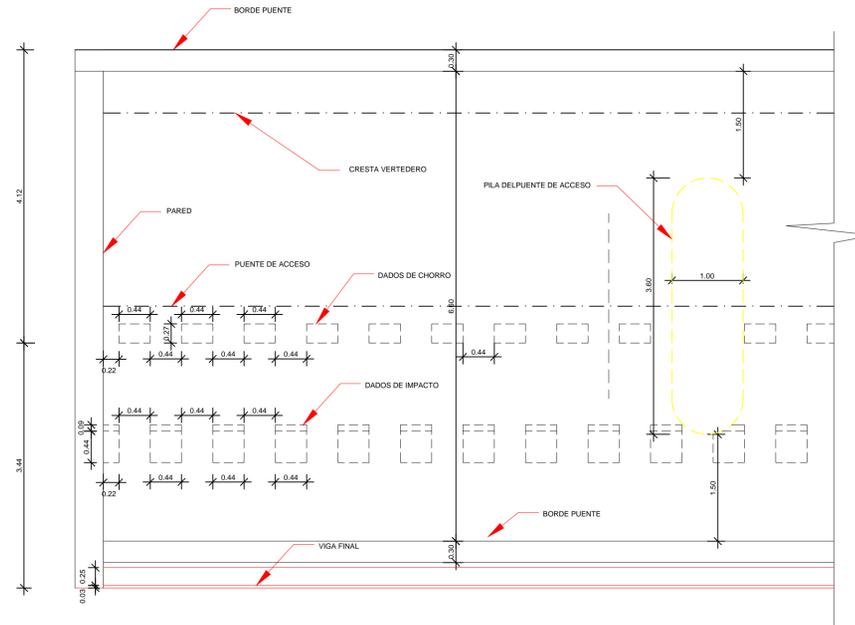
ANEXO 1: PLANOS DE LA DERIVADORA CAÑAR I y II.



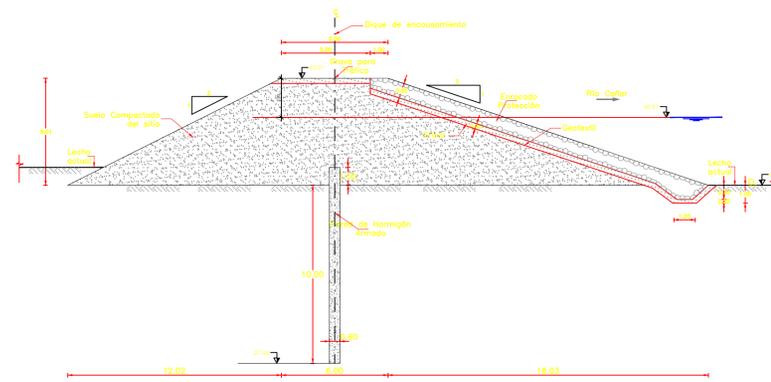
PLANTA GENERAL
ESC. 1:2000



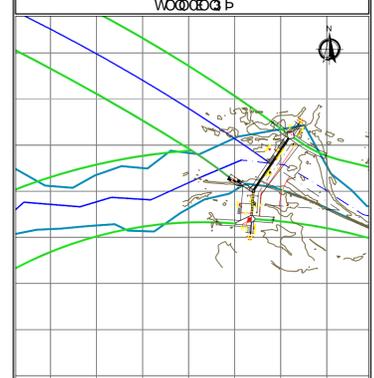
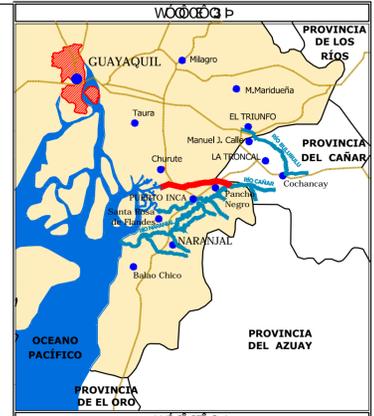
CORTE A-A
ESC. 1:1000



DETALLE DEL CUENCO AMORTIGUADOR
ESC. 1:50



CORTE E - E
ESC. 1:200



LEYENDA

- Elevación en corte o en perfil
- Nivel del terreno existente
- Talud en terraplen
- Enrocado suelto en corte
- Grava, gravilla
- Arena
- Línea central

NOTAS

CORTESIA: CONSULTORIA TECNICA ACSAM

REVISIONES

Último	FECHA	DESCRIPCION	DIS.	REV.	APRB.

SECRETARÍA NACIONAL DEL AGUA

SECRETARÍA NACIONAL DEL AGUA

SECRETARÍA NACIONAL DEL AGUA

SECRETARÍA NACIONAL DEL AGUA

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

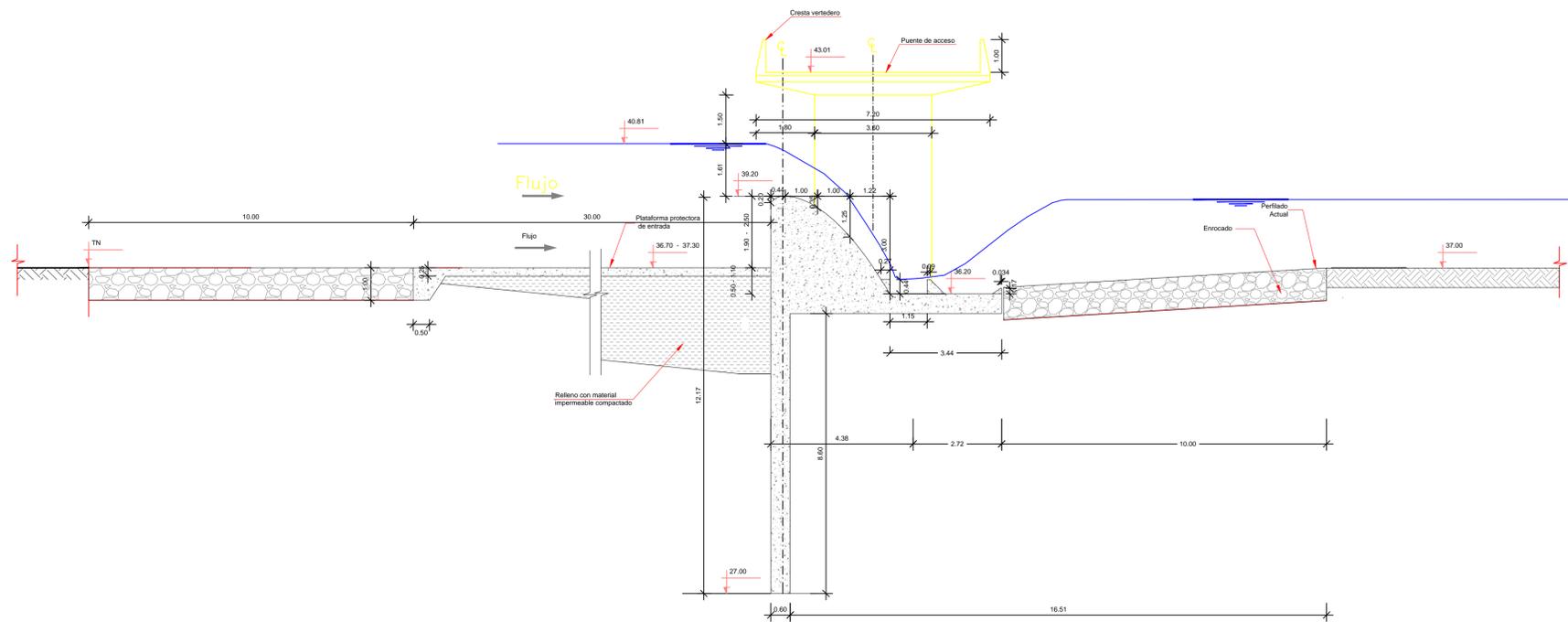
DERIVADORA RÍO CAÑAR PLANTA GENERAL CORTE A-A

SECRETARÍA NACIONAL DEL AGUA

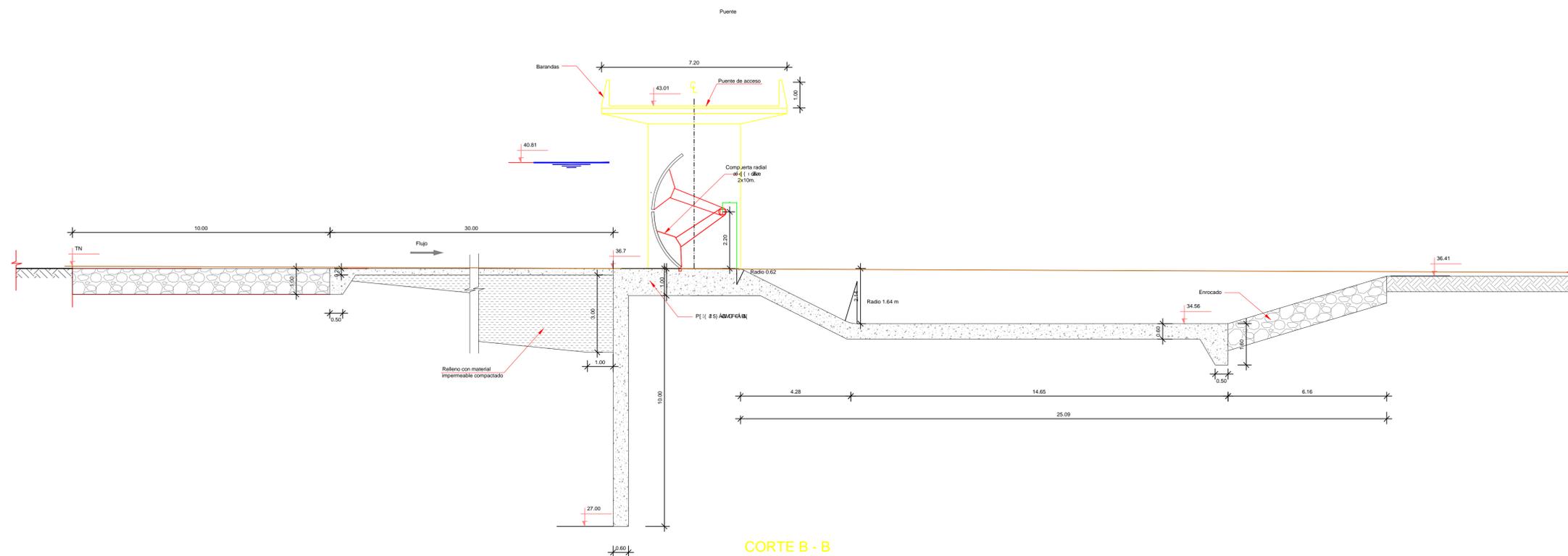
SECRETARÍA NACIONAL DEL AGUA

SECRETARÍA NACIONAL DEL AGUA

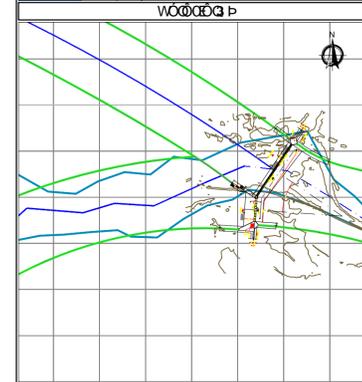
SECRETARÍA NACIONAL DEL AGUA



CORTE D - D
ESC. 1:100



CORTE B - B
ESC. 1:100



LEYENDA

- Elevación en corte o en perfil
- Nivel del terreno
- Talud en terraplen
- Enrocado suelto en corte
- Grava, gravilla
- Arena
- Línea central

NOTAS

CORTESIA: CONSULTORIA TECNICA ACSAM

REVISIONES

Último	FECHA	DESCRIPCION	DIS.	REV.	APRB.

SECRETARÍA NACIONAL DEL AGUA

SECRETARÍA NACIONAL DEL AGUA

SECRETARÍA NACIONAL DEL AGUA

SECRETARÍA NACIONAL DEL AGUA

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

DERIVADORA RÍO CAÑAR PLANTA GENERAL CORTE A-A

SECRETARÍA NACIONAL DEL AGUA

SECRETARÍA NACIONAL DEL AGUA

SECRETARÍA NACIONAL DEL AGUA

SECRETARÍA NACIONAL DEL AGUA



ANEXO 2: FORMATO PARA TOMA DE DATOS

ENSAYOS DE LABORATORIO MODELO FÍSICO PROYECTO CONTROL DE INUNDACIONES BULUBULU - CAÑAR																								
h (cm)	z (cm)	P (cm)	D (cm)	H (cm)	Q (l/s)	Y canal (m)	Y3 (cm)	Osc. (mm)	Abscisa y1	Abscisa y2	LR. (cm)	y2 (cm)	yc (cm)	w2 (gr)	Smax	V1 (m/s)	y1; (cm)	Fr1	y2; (cm)	LR; (cm)	yc (cm)			
0	5,00																							
1	9,64																							
2	13,00																							