



UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO COMPARATIVO DE VARIANTES DE DISEÑO
DE LA ESTRUCTURA DE EVACUACIÓN DE CAUDALES
DE EXCESO DE LA PRESA MOCACHE MEDIANTE
MODELACIÓN FÍSICA**

Trabajo de Titulación
previo a la obtención del título de
Ingeniera Civil

AUTORA:

Diana Cristina Cárdenas Vásquez

C.I. 0302185699

DIRECTOR:

Ing. Esteban Alonso Pacheco Tobar, M. Sc.

C.I. 0102114550

CUENCA – ECUADOR

2017

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se ha empleado la modelación hidráulica física como técnica de diseño para asegurar la operación óptima de la estructura y facilitar la toma de decisiones.

Se ha identificado la estructura de evacuación de caudales de exceso de la presa Mocache como caso de estudio, dicha presa forma parte del Megaproyecto "Plan de Aprovechamiento y Control del Agua, en la Provincia de Los Ríos, PACALORI". Al ser una estructura de descarga constituida por dos rápidas, una de ellas en forma curva, rápida de flujo que involucra muchos inconvenientes de erosión, socavación y variaciones bruscas de calados entre los bordes externos e internos de la curva; para lo que se ha optimizado su diseño, construyendo un modelo físico a escala reducida e implementando variantes de diseño como obstáculos diagonales, vanos concéntricos, transición de peralte y contrapendiente (0.2% a 2%), y evaluando los resultados que estas alternativas presenten para el caudal máximo de diseño. Además, se identifican las variantes eficientes y se realizan combinaciones entre ellas, consiguiendo resultados aún mejores, como una distribución adecuada del flujo y velocidades óptimas que no presentan fenómenos de socavación. Se concluye el estudio presentando la alternativa óptima evaluada para cuatro caudales de diseño.

Palabras Clave: modelo físico, vertedero, canal curvo, peralte, obstáculos diagonales, vanos concéntricos

ABSTRACT

In the present titling work, physical hydraulic modeling has been used as a design technique to ensure optimal operation of the structure and to facilitate decision making.

The structure for the evacuation of excess flows of the Mocache dam has been identified as a case study. The dam is part of the Megaproject "Plan de Aprovechamiento y Control del Agua, en la Provincia Los Ríos, PACALORI". Being a discharge structure constituted by two rapid ones, one of them in curved, fast form of flow that involves many disadvantages of erosion, undermining and sudden variations of drafts between the external and internal edges of the curve; for which it has been optimized its design, constructing a reduced scale physical model and implementing variants of design such as diagonal obstacles, concentric spans, cant transition and counterpendent (0.2% - 2%), and evaluating the results that these alternatives present for the maximum design flow rate. In addition, efficient variants are identified and combinations are made between them, resulting in even better results, such as adequate flow distribution and optimum velocities that do not exhibit undercutting phenomena. The study was concluded presenting the optimum alternative evaluated for four flow rates of design.

Keywords: physical model, dump, curved channel, canyon, diagonal obstacles, concentric spans

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN.....	5
1.1.	Antecedentes	5
1.2.	Alcance.	5
1.3.	Objetivos	5
1.3.1.	Objetivo General	5
1.3.2.	Objetivos Específicos	5
2.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	5
2.1.	Descripción general del proyecto	5
2.2.	Descripción del problema.....	6
2.3.	Modelación física en la hidráulica.....	11
2.3.1.	Relaciones básicas de escala.....	12
2.3.2.	Relaciones de escalas subsecuentes	12
2.3.3.	Efectos de escala	13
2.3.4.	Modelo hidráulico llevado a escala	13
2.4.	Aspectos hidráulicos relacionados a las variaciones implementadas en el modelo físico	17
2.4.1.	Rugosidad artificial	17
2.4.2.	Contra pendiente	17
2.4.3.	Transición del peralte de la curva	19
2.4.4.	Vanos concéntricos circulares.	20
2.4.5.	Obstáculos diagonales.	20
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
3.1.	Primer Escenario - Diseño Original	21
3.2.	Segundo Escenario - Alternativas de diseño en rápida 1	25
3.3.	Tercer escenario – Alternativas de diseño en rápida 2	30
3.	CONCLUSIONES.....	49
4.	BIBLIOGRAFÍA.....	51

Listado de Tablas.

Tabla 1. Caudales máximos para diferentes períodos de retorno , microcuenca Mocache, (PROMAS, 2014b).....	7
Tabla 2. Datos para el diseño del cimacio(PROMAS, 2014a)	8
Tabla 3. Cálculo Hidráulico del Cuenco Tipo III,(PROMAS, 2014a).....	9
Tabla 4 Cálculo Hidráulico de la Primera Rápida. (PROMAS, 2014a).....	10
Tabla 5 Datos para el cálculo de la curva de empalme, (PROMAS, 2014a).....	10
Tabla 6. Cálculo Hidráulico del Canal de Restitución(PROMAS, 2014a).....	11
Tabla 7. Caudales de diseño escalados, debidos a diferentes períodos de retorno	13
Tabla 8. Análisis de parámetros que provocan efectos de escala, en modelo y prototipo	17
Tabla 9 Coeficiente de descarga determinado mediante experimentación. Diseño Original	21
Tabla 10. Registro de velocidades medidas en laboratorio. Diseño Original	23
Tabla 11. Registro de calados medidos en laboratorio, presentados en prototipo. Diseño Original	23
Tabla 12. Velocidades (prototipo) de aproximación al cuenco dissipador en la abscisa 8.5. Diseño Original	24
Tabla 13. Velocidades en el canal de restitución. Diseño Original	25
Tabla 14 Registro de velocidades medidas en laboratorio. Alternativa 2-1	26
Tabla 15. Registro de calados tanto en modelo como en prototipo. Alternativa 2-1	26
Tabla 16. Registro de velocidades medidas en la experimentación. Alternativa 2-2 ...	27
Tabla 17.Registro de calados en modelo y prototipo. Alternativa 2-2.....	27
Tabla 18 Registro de velocidades medidas en experimentación. Alternativa 2-4	28
Tabla 19. Registro de calados en modelo y prototipo. Alternativa 2-4.....	28
Tabla 20 Registro de velocidades medidas en laboratorio. Alternativa 2-5	29
Tabla 21. Registro de calados en modelo y prototipo debidos a la experimentación en la Alternativa 2-5.....	29
Tabla 22 Registro de velocidades medidas en la experimentación. Alternativa 2-6	30
Tabla 23 Datos obtenidos en la experimentación para el diseño de transición de peralte. Alternativa 3-1	31
Tabla 24. Perfil de flujo. Alternativa 3-1	31
Tabla 25. Registro de velocidades medidas en laboratorio. Alternativa 3-1	32
Tabla 26. Registro de calados en modelo y prototipo. Alternativa 3-1	33
Tabla 27 Registro de velocidades medidas en laboratorio. Alternativa 3-2	34
Tabla 28. Registro de calados en modelo y prototipo. Alternativa 3-2.....	34
Tabla 29. Registro de velocidades medidas en experimentación. Alternativa 3-3	36
Tabla 30. Registro de calados en modelo y prototipo debidos a la implementación de la alternativa 3-3.....	36
Tabla 31 Registro de velocidades medidas en laboratorio para caudal de 12.52 m ³ /s. Alternativa 3-4.....	37
Tabla 32. Registro de calados en modelo y prototipo debidos a caudal de 12.52 m ³ /s. Alternativa 3-4.....	38
Tabla 33 Registro de velocidades medidas en laboratorio para Q _{max} . Alternativa 3-4.....	38
Tabla 34. Registro de calados en modelo y prototipo para Q _{max} . Alternativa 3-4	39
Tabla 35. Registro de velocidades en canal de restitución. Q _{max} . Alternativa 3-4.....	39
Tabla 36 Velocidades en canal de restitución. Q=12.52 m ³ /s Alternativa 3-5	41
Tabla 37. Velocidad en el cuenco dissipador. Alternativa 3-5	41

Tabla 38 Registro de velocidades para caudal de 12.52m ³ /s. Alternativa 3-5	41
Tabla 39 Registro de calados en modelo y prototipo debidos a caudal de 12.52 m ³ /s Alternativa 3-5.....	42
Tabla 40. Velocidades a la salida del cuenco disipador. Q=13.72 m ³ /s Alternativa 3-5	42
Tabla 41. Velocidades en el canal de restitución debidas a Q=13.72 m ³ /s Alternativa 3-5	43
Tabla 42 Velocidades registradas en rápida 2. Alternativa 3-5.....	43
Tabla 43 Registro de calados en modelo transformados a prototipo para la Alternativa 3-5	43
Tabla 44 Velocidades en el cuenco disipador para Q (100 años) =14.94 m ³ /s Alternativa 3-5.....	44
Tabla 45. Velocidades registradas en el canal de restitución para Q(100 años) =14.94 m ³ /s Alternativa 3-5.....	44
Tabla 46 Registro de velocidades medidas en laboratorio debidas a Q (100 años) =14.94 m ³ /s Alternativa 3-5	44
Tabla 47 Registro de calados debidos a Q (100 años) =14.94 m ³ /s Alternativa 3-5 ...	45
Tabla 48 Velocidades a la salida del cuenco disipador para Q _{max} de diseño Alternativa 3-5.....	46
Tabla 49 Registro de velocidades a lo largo de la estructura para caudal de 30.95 m ³ /s Alternativa 3-5.....	46
Tabla 50 Registro de calados en modelo y prototipo debidos a caudal máximo de diseño Alternativa 3-5	46
Tabla 51 Velocidades medidas en canal de restitución para caudal máximo de diseño. Alternativa 3-5.....	47
Tabla 52 Geometría definida para obstáculos diagonales Alternativa 3-6	47

Listado de Figuras.

Figura. 1 Ubicación de la zona de estudio. (Castro, 2015).....	6
Figura. 2. Configuración general de la estructura de vertido de excesos (Chow, 1994)	7
Figura. 3. Detalle del perfil hidrodinámico del cimacio(PROMAS, 2014a)	8
Figura. 4 Esquema de las rápidas y la curva de empalme vertical.(PROMAS, 2014a)	11
Figura. 5. Aquietamiento del flujo de ingreso, aguas arriba y aguas abajo del vertedero de control	14
Figura. 6. Estructura de control de niveles de agua, ubicada sobre el vertedero Creager	15
Figura. 7 Curva de descarga del vertedero de control de caudales de ingreso	16
Figura. 8. Configuración de las ondas oblicuas para el flujo supercrítico en una curva simple horizontal, (Sotelo,G., n.d.)	18
Figura. 9. Equilibrio y pendiente transversal en una curva horizontal, (Sotelo, n.d.)	19
Figura. 10. Transición del peralte en una curva simple.....	19
Figura. 11. Planta de la instalación de obstáculos en un canal curvo (Knapp, 1951)..	20
Figura. 12. Esquema de datos levantados en la experimentación. Diseño Original	22
Figura. 13. Visualización de líneas de flujo oblicuas en laboratorio. Diseño Original ...	22
Figura. 14. secciones transversales y dirección del flujo en la rápida en curva. Diseño Original.....	23
Figura. 15. Características del flujo de aproximación hacia la estructura de disipación de energía. Remolino en la margen izquierda. Socavación en la margen derecha del canal de restitución. Diseño Original.....	24
Figura. 16. Datos disipadores a 8m del pie del Creager. Alternativa 2-1 (PROMAS,2015).....	25
Figura. 17. Geometría de los datos disipadores de energía. Alternativa 2-1	26
Figura. 18. Distribución del Flujo Alternativa 2-1	26
Figura. 19 Datos disipadores de energía al pie del Creager. Alternativa 2-2.....	27
Figura. 20. Resalto sumergido. Alternativa 2-2	27
Figura. 21. Contrapendiente (0.2%) en rápida 1. Alternativa 2-3. (PROMAS, 2015)	28
Figura. 22. Contrapendiente (2%) en rápida 1. Alternativa 2-4 (PROMAS,2015).....	28
Figura. 23 Contrapendiente (1.5%) en rápida 1. Alternativa 2-5	29
Figura. 24 Contrapendiente (1%) en rápida 1. Alternativa 2-6.....	30
Figura. 25. Resalto Hidráulico al pie del Creager. Alternativa 2-6.....	30
Figura. 26. Sección transversal del peralte con pendiente 7.3%. Alternativa 3-1	31
Figura. 27. Patrones de flujo predominantes en rápida 2. Alternativa 3-1	32
Figura. 28. Funcionamiento ineficiente del cuenco disipador. Alternativa 3-1	32
Figura. 29 Sección transversal de la rápida 2, abscisa 7.3, peralte 14.6. Alternativa 3-2	33
Figura. 30. Patrones de flujo predominante a lo largo de la rápida 2. Alternativa 3-2 ..	34
Figura. 31. Funcionamiento del cuenco disipador, presencia de turbulencia. Alternativa 3-2.....	34
Figura. 32 Implementación de la prolongación del peralte. Alternativa 3-3	35
Figura. 33. Patrones de flujo predominantes en la rápida 2. Alternativa 3-3.....	35
Figura. 34. Comportamiento del flujo debido a 12.52 m ³ /s. Alternativa 3-4	37
Figura. 35 Socavación en el canal de restitución. Caudal 12.52 m ³ /s. Alternativa 3-4	37
Figura. 36 Vórtice formado en el cuenco disipador debido a caudal máximo de diseño, 30.95 m ³ /s, Alternativa 3-4	38

Figura. 37 Secciones transversales para vanos concéntricos. Alternativa 3-5 (PROMAS, 2016).....	40
Figura. 38. Implementación de la Alternativa 3-5.....	40
Figura. 39 Comportamiento del flujo en la rápida 2 para el caudal correspondiente a 25 años de período de retorno Alternativa 3-5.....	40
Figura. 40 Canal de restitución sin socavación. Q: 12.52 m ³ /s Alternativa 3-5	41
Figura. 41 Óptimo funcionamiento del cuenco disipador, no se presenta socavación en canal de restitución. Q=13.72 m ³ /s Alternativa 3-5	42
Figura. 42 Comportamiento adecuado del flujo en cuenco disipador, canal de restitución sin socavación. Q (100 años) =14.94 m ³ /s Alternativa 3-5.....	44
Figura. 43 Comportamiento de flujo para Q _{max} de diseño Alternativa 3-5	45
Figura. 44 Canal de restitución sin socavación debido a Q _{max} de diseño Alternativa 3-5	45
Figura. 45 Implementación en rápida 1 y rápida 2 de Alternativa 3-6.....	47
Figura. 46 Líneas de corriente en rápida 1, resalto hidráulico en rápida dos, funcionamiento no adecuado del cuenco disipador.....	48
Figura. 47 Socavación en canal de restitución Alternativa 3-6	48



Universidad de Cuenca
Clausula de propiedad intelectual

Yo Diana Cristina Cárdenas Vásquez, autora del Trabajo de Titulación "Estudio Comparativo de Variantes de Diseño de la Estructura de Evacuación de Caudales de Exceso de la Presa Mocache mediante Modelación Física", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 12 de abril de 2017

Cárdenas Vásquez Diana Cristina

C.I: 0302185699



Universidad de Cuenca
Clausula de derechos de autor

Yo Diana Cristina Cárdenas Vásquez, autora del Trabajo de Titulación "ESTUDIO COMPARATIVO DE VARIANTES DE DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE EVACUACIÓN DE CAUDALES DE EXCESO DE LA PRESA MOCACHE MEDIANTE MODELACIÓN FÍSICA", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniera Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.

Cuenca, 12 de abril de 2017

Cárdenas Vásquez Diana Cristina

C.I: 0302185699



DEDICATORIA.

Todos los días, después de la cena, sentada sobre una vitrina jugando con tapas de cola, mientras él fumaba, pensaba y aconsejaba, terminaba la charla con la niña de 9 años pidiéndole que algún día visite su tumba con un título profesional ya que la vida no le alcanzaría para mirarla...

Hoy ya no tengo 9 años, pero te quiero más de lo que lo hacía a esa edad...

Este logro es para ti Abuelito Carlos.



AGRADECIMIENTOS.

A mi madre Cristina Vásquez, quien ha sido el pilar fundamental de mi crecimiento, quien con su arduo sacrificio ha conseguido apoyarme en este y todos mis objetivos, a ella mi más profundo agradecimiento y admiración.

A mi Abuelita Elba, quien con sus bendiciones y consejos ha guiado mis días.

A mi Tía María Vásquez, su esposo e hijos, que todos estos años me han acogido en su hogar, apoyándome en los momentos difíciles de este proceso. Convirtiéndose en mi segunda familia.

A mis amigos y compañeros, quienes han colaborados con consejos y enseñanzas valiosas, dejando huellas y recuerdos inmemorables de estos años de convivencia.

Un agradecimiento muy especial a los Ingenieros Carlos Buñay y Freddy Pacheco quienes han sido guías y colaboradores esenciales para este trabajo.

Así como también a la Ingeniera Verónica Carrillo quien ha apoyado este trabajo desde el inicio, compartiendo conmigo sus valiosos conocimientos, así como su tiempo.

De igual manera al Ingeniero Felipe Cisneros, Director del PROMAS, quien me ha facilitado el espacio de estudio, así como materiales para las implementaciones del mismo.

Al Ingeniero Esteban Pacheco, Director del Trabajo de Titulación..



1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Para cambiar la matriz productiva, y lograr una mayor articulación de la triple hélice, el Estado, a través de las diferentes políticas públicas y bajo las directrices establecidas con diversos criterios técnicos, ha emprendido un proceso de incremento de producción de energía eléctrica. En este sentido, se ha dado paso a la realización de varios estudios que permitan la construcción de centrales hidroeléctricas, entre ellos, el Megaproyecto “Plan de Aprovechamiento y Control del Agua, en la Provincia de Los Ríos” (PACALORI), el cual ha sido estudiado por el Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca, delegación que ha sido realizada por la Secretaría Nacional del Agua, SENAGUA.

1.2. Alcance.

Mediante la ejecución del presente trabajo, se ha generado información nueva que permita la optimización de los diseños y procesos de operación de las obras anexas del proyecto de generación hidroeléctrica Mocache. Adicionalmente se ofrece un importante aporte al entendimiento, aplicación y desarrollo de conocimiento en modelización física para la optimización del diseño y operación de obras hidráulicas para proyectos de ingeniería del agua, en especial para diseños de canales con alineamiento no lineal, puesto que no se encuentra una modelación o formulación matemática que facilite al diseñador realizar este cálculo con facilidad y certeza, por lo que la modelación física del mismo servirá al lector como guía para sus diseños; así como también se expone este producto para el desarrollo futuro de documentos de divulgación técnica/científica.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar y optimizar en un modelo físico, el comportamiento hidráulico de la estructura de evacuación de caudales de exceso para la presa Mocache, del proyecto PACALORI.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Evaluar el comportamiento del flujo a lo largo de estructura en modelo original.
- Evaluar las alternativas y sus resultados para los caudales de diseño en modelos físicos a escala reducida
- Comparar y optimizar los resultados por fases de combinación de alternativas.
- Definir la alternativa con los mejores resultados como criterio de diseño

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Descripción general del proyecto

El proyecto Plan de Aprovechamiento y Control del Agua en la Provincia de Los Ríos, PACALORI, pertenece a la Demarcación Hidrográfica del Guayas, y comprende la construcción 7 presas y dos trasvases de agua para riego de zona de cultivos en las regiones sur occidental, central y sur de la Provincia de los Ríos, que son: Quevedo-Chojampe, Quevedo-Pueblo Viejo, Calabí/Lechugal-Aguacatal/Pueblo Viejo. Dicho proyecto beneficiará a 183.835 personas, y cubre un área de 170.000 hectáreas para riego. El primer trasvase será ubicado en el Río Quevedo, donde se construirán 4 presas, una de ellas sobre el Río Mocache, y el segundo trasvase sobre el Río Lechugal y Chojampe con 3 presas.

El Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca para el diseño de este proyecto ha financiado la realización de un estudio en modelo físico de escala reducida que fuera ejecutado través del Laboratorio de Hidráulica y Dinámica de Fluidos LH&DF y mediante el cual se ha tratado de avizorar alternativas de optimización de las obras

2.2. Descripción del problema

Una de las 7 presas del proyecto PACALORI, es la que será construida en el primer trasvase del Río Quevedo, en el afluente del Río Mocache el mismo que permite un tránsito de hasta $98.1 \text{ m}^3/\text{s}$ estimados para un período de retorno de 100 años y hasta $208.3 \text{ m}^3/\text{s}$ calculados por el método de la máxima avenida probable, dato necesario para evaluar la estructura de evacuación de caudales de excesos de esta presa, problemática en la que se basa este estudio.

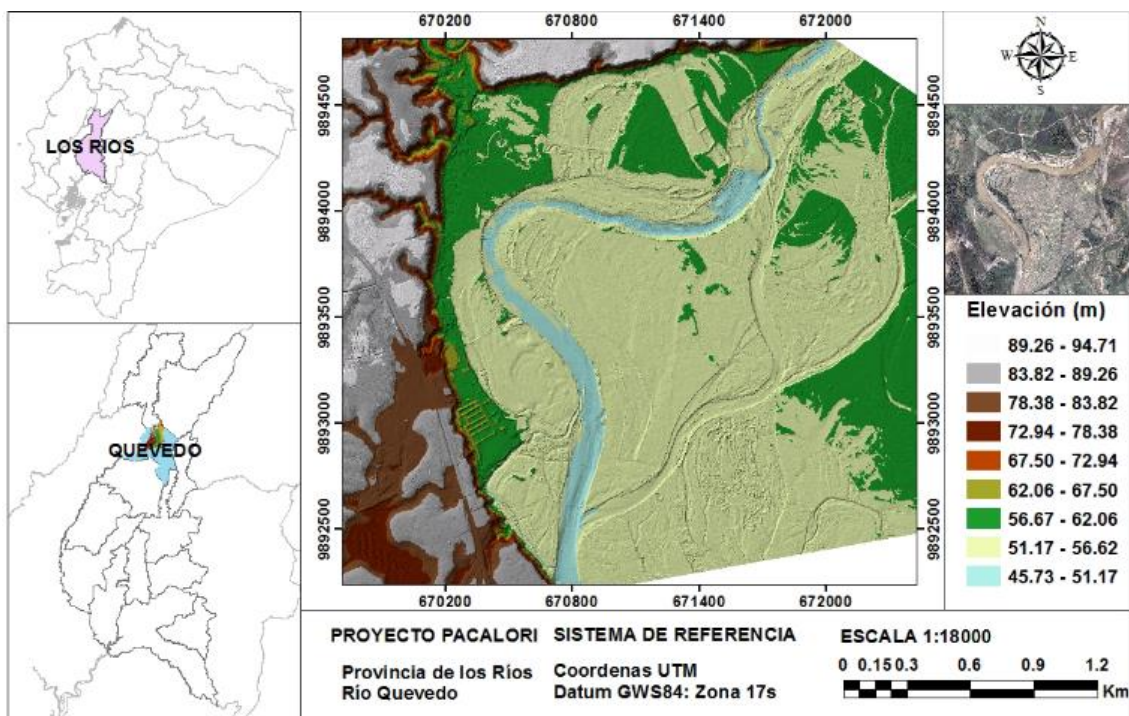


Figura. 1 Ubicación de la zona de estudio. (Castro, 2015)

Se describe a continuación los materiales (datos de análisis hidrológicos e hidráulicos) necesarios para el estudio, que han sido favorecidos por el PROMAS.

2.2.1. Datos Hidrológicos

El río Mocache se encuentra ubicado en la zona central de la costa ecuatoriana, en la provincia de Los Ríos, es un afluente del río Vinces. Su cuenca es alargada y cubre un área de 29 km^2 , la longitud del cauce principal es de aproximadamente 15 km , con una pendiente media del 1.7% ; su nivel más bajo es de 35 y la cota más alta es de 88 msnm .

Mediante el procesamiento de datos de precipitaciones diarias de las estaciones meteorológicas Pichilingue y Puerto Lla, se han obtenido los caudales necesarios para el diseño hidráulico de la obra.

Tabla 1. Caudales máximos para diferentes períodos de retorno , microcuenca Mocache, (PROMAS, 2014b)

CAUDALES MÁXIMOS		
Período de Retorno	Caudal Máximo de Ingreso	Caudal Máximo Laminado
T (años)	Qmax (m ³ /s)	(m ³ /s)
5	54.9	9.5
10	66.1	10.8
10 verano	16.9	
25	79.5	12.5
50	89.0	13.7
100	98.1	14.9
AMP	208.3	30.9

*AMP, método de Avenida Máxima Probable

2.2.2. Datos Hidráulicos

Del análisis hidráulico se recalca a continuación, el tipo del vertedero, su forma y capacidad, así como la geometría de las rápidas y la estructura del cuenco disipador.

- La selección del tipo de vertedero se ha realizado considerando la longitud del vertedero requerida y las características topográficas del sitio de cierre. Determinando un vertedero frontal de cimacio tipo Creager con un paramento vertical aguas arriba. En términos generales dicho vertedero está formado por un perfil hidrodinámico, una rápida tangente a dicho perfil y termina con un arco en el talón del vertedero que se vuelve tangente al fondo del canal de la rápida.

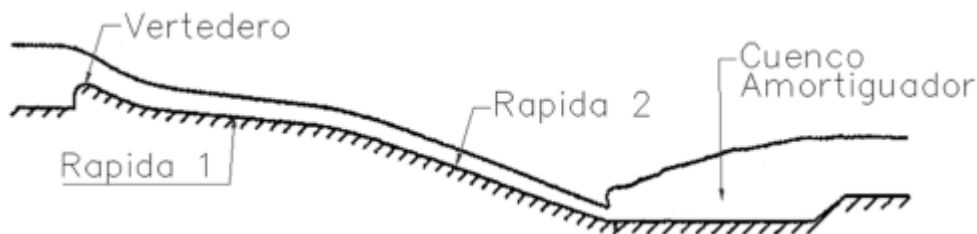


Figura. 2. Configuración general de la estructura de vertido de excesos (Chow, 1994)

- La geometría del vertedero, su emplazamiento y las obras complementarias para su adecuado funcionamiento se describen a continuación.
 - La forma del perfil de la estructura de control depende de la carga de agua sobre la corona, la inclinación del paramento aguas arriba y de la altura de este sobre la solera del canal de aproximación. la curvatura del perfil está definida por la expresión:

$$\frac{y}{H_0} = -K \left(\frac{x}{H_0} \right)^n \tag{1}$$

En la cual K y n son constantes que dependen de la inclinación del paramento aguas arriba y de la velocidad de aproximación del flujo, definidos por relaciones y ábacos basados en recomendaciones de la Bureau of Reclamation, 2007, citadas en el informe definitivo de cálculo (PROMAS, 2014a)

Tabla 2. Datos para el diseño del cimacio (PROMAS, 2014a)

DATOS				
Ítem	Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
1	Caudal de diseño	Q	30.94	m ³ /s
2	Carga de agua sobre el vertedero	ho	1.29	m
3	Longitud del vertedero	L	10.00	m
4	Cota Cresta del Vertedero	-	48.00	msnm
5	Altura paramento aguas arriba	P	2.00	m
6	Cota solera canal de aproximación	-	46.00	msnm
7	Cota talón del vertedero	-	46.50	msnm

Con los parámetros descritos en la Tabla 2, han obtenido un perfil hidrodinámico para el cimacio mediante la Ecuación (1), detallado en la Figura 3.

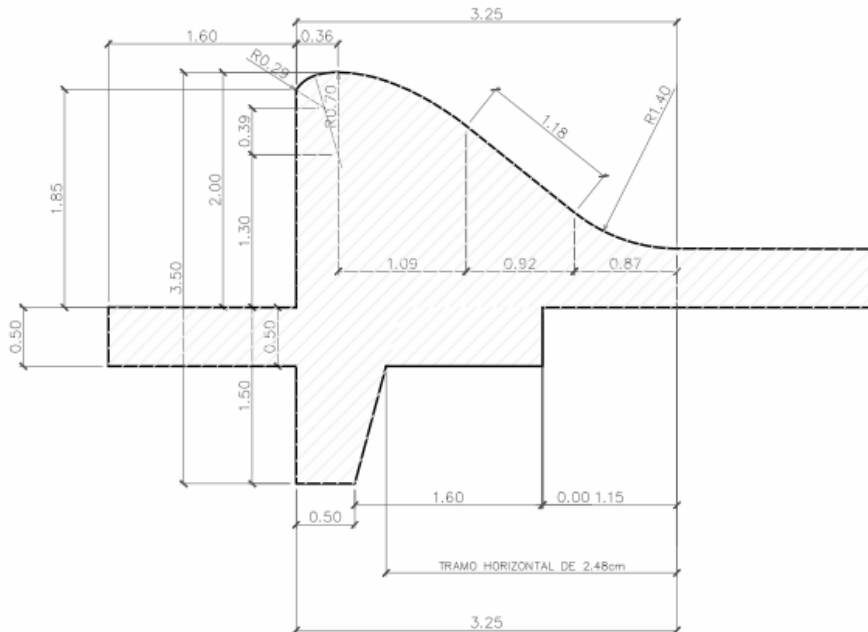


Figura. 3. Detalle del perfil hidrodinámico del cimacio (PROMAS, 2014a)

- El cuenco disipador, estructura que disipa la energía cinética del flujo en una estructura, a fin de que el flujo restituído aguas abajo presente condiciones semejantes a las existentes antes de la ejecución de la obra, para lo que se ha considerado la implementación de un cuenco amortiguador Tipo III recomendado por la Bureau of Reclamation (Froude mayor o igual a 4.5, Velocidades menores a 18m/s). Se describe en la Figura 4 el esquema recomendado, y a continuación en la Tabla 3 los resultados del cálculo para la geometría del mismo.

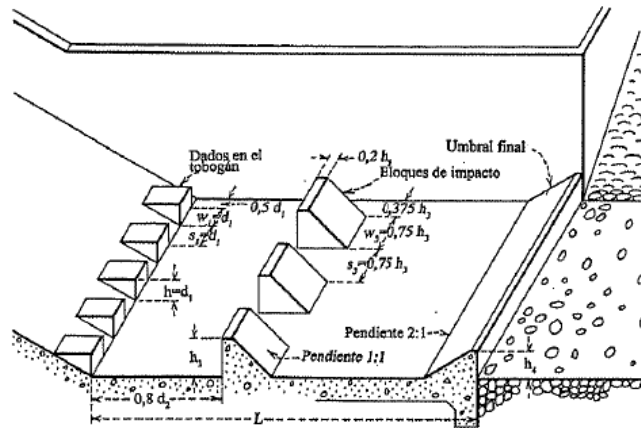


Figura. 4. Esquema general del cuenco Tipo III (“Bureau of Reclamation,” 2007)

Tabla 3. Cálculo Hidráulico del Cuenco Tipo III, (PROMAS, 2014a)

CÁLCULO DEL CUENCO TIPO III				
Ítem	Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
1	Ancho del cuenco	b	10	m
2	Calado contraído	y1	0.269	m
3	Velocidad	V	11.48	m
4	Número de Froude	Fr	7.07	m
5	Calado conjugado	y2	2.56	m
6	Altura de los dados	h	0.30	m
7	Altura de los bloques	h3	0.50	m
8	Altura del umbral modificado	h4	1.30	m
9	Longitud del cuenco	L	6.60	m

- La rápida, estructura encargada de salvar la diferencia de nivel que puede existir entre la sección vertedora y el cauce del río, consiguiendo por su paso las condiciones de ingreso al cuenco disipador de energía. Se ha considerado las quebradas existentes para su trazado en planta evitando los cambios de dirección y logrando sustanciales ahorros de excavación y hormigón. El trazado longitudinal se ha definido en dos tramos de acuerdo a la topografía y geología de la zona evitando pendientes mayores al 30 por ciento. Y su sección transversal es de tipo rectangular.

La conexión entre las rápidas se realiza a través de curvas convexas, formada aproximadamente por la expresión (U, S. Army Corps of Engineers, 1980):

$$y = -x \tan \theta - \frac{gx^2}{2(1.25V_{sm})^2 \cos^2 \theta} \tag{2}$$

Donde,

- x, y : coordenadas medidas desde el inicio de la curva en m
- θ : ángulo de inclinación de la rápida aguas arriba de la curva
- g : aceleración de la gravedad en m/s^2
- V_{sm} : velocidad media del flujo al inicio de la curva en m/s

Para la primera rápida.

Tabla 4 Cálculo Hidráulico de la Primera Rápida. (PROMAS, 2014a)

CÁLCULO PRIMERA RÁPIDA				
Ítem	Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Condiciones Críticas				
1	Caudal de diseño	Q	30.94	m ³ /s
2	Ancho de la rápida	b	10.0	m
3	Calado critico	yc	1.26	m
4	Pendiente critica	Sc	0.003	-
Condiciones de calado contraído constante				
5	Ancho de la rápida	b	10.0	m
6	Calado normal	yn	0.460	m
7	Pendiente	So	0.024	-
Condiciones de diseño				
8	Ancho de la rápida	b	10.00	m
9	Pendiente de diseño	So	-0.010	-
10	Calado normal	yn	1.101	m
11	Área	A	11.01	m ²
12	Perímetro mojado	P	12.20	m
13	Radio hidráulico	Rh	0.902	m
14	Velocidad en el canal	V	2.81	m/s
15	Número de Froude	Fr	0.86	-

Para la segunda rápida, la longitud y la pendiente se ha establecido de acuerdo a la configuración topográfica del sitio de emplazamiento, en ese sentido, la longitud de la misma será 91.5 m con una pendiente de 18.9 %. Para el radio de la curva se ha empleado la teoría expuesta obteniendo un radio mínimo de 40m, pero en base a la topografía se ha establecido la curvatura en términos de un radio de 75 m. las propiedades del flujo en la misma se han determinado a través del análisis del perfil de flujo (supercrítico), en la entrada del cuenco disipador se tiene un calado de 0.269m, una velocidad estimada de 11.48 m/s y un número de Froude de 7.07.

- Para la curva del empalme se tienen los datos:

Tabla 5 Datos para el cálculo de la curva de empalme, (PROMAS, 2014a)

CURVA DE EMPALME VERTICAL			
Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Pendiente de la primera rápida	m	0.02	-
Ángulo que forma la primera rápida con la horizontal	θ	0.01	rad
Velocidad media al inicio de la rápida	V_{sm}	6.73	m/s
Pendiente de la segunda rápida	dy/dx	0.189	-

Con los datos de la Tabla 5 han obtenido el perfil vertical de la estructura de descarga esquematizado en la Figura 5:

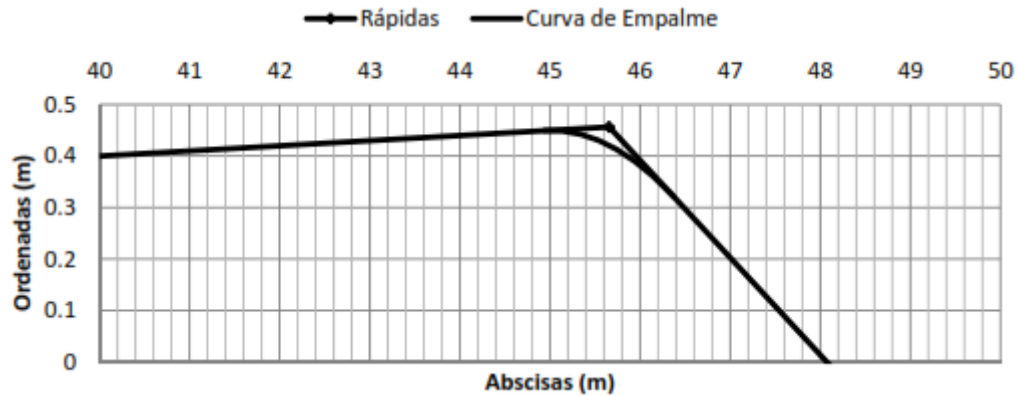


Figura. 5 Esquema de las rápidas y la curva de empalme vertical.(PROMAS, 2014a)

- Para el canal de restitución se tiene, mediante el cálculo descrito en la Tabla 6, un canal trapezoidal de base de 10 m en el que se espera una velocidad media de 1.18 m/s para evitar efectos de erosión y socavación del cauce.

Tabla 6. Cálculo Hidráulico del Canal de Restitución(PROMAS, 2014a)

CÁLCULOS CANAL DE RESTITUCIÓN				
Ítem	Descripción	Símbolo	Valor	Unida
1	Caudal de diseño	Q	30.94	m3/s
2	Ancho de la base	b	10	m
3	Inclinación del	z	1.5	-
4	Pendiente critica	Sc	0.0068	-
5	Pendiente de	So	0.0005	-
6	Calado normal	yn	2.01	m
7	Área	A	26.19	m2
8	Perímetro mojado	P	17.25	m
9	Radio hidráulico	Rh	1.52	m
10	Velocidad	V	1.18	m/s
11	Numero de	Fr	0.30	-

2.3. Modelación física en la hidráulica

La modelación hidráulica física es una técnica de diseño utilizada por los ingenieros para optimizar el diseño de estructuras, asegurar la operación óptima de la estructura y facilitar la toma de decisiones (Chanson, 2002)

El empleo de modelos físicos requiere que tanto las condiciones físicas de frontera como las condiciones del flujo aguas arriba sea llevado correctamente a escala, para lo que se emplean principios básicos de la mecánica de fluidos, así como de la teoría de similitud, refiriendo principalmente a la relación de Froude que implica que las fuerzas gravitacionales tanto en el modelo como en el prototipo sean las mismas, es decir; que el número de Froude del modelo sea igual al del prototipo ($Fr_m = Fr_p$).



2.3.1. Relaciones básicas de escala

En un modelo físico se establece que las condiciones de flujo son similares a las del prototipo siempre y cuando el modelo presente una similitud de forma de movimiento y de fuerzas.

Las similitudes presentan relaciones entre el prototipo y modelo, las mismas que emplearán los subíndices p y m respectivamente.

- Similitud geométrica, relación de longitudes

$$\lambda_L = L_r = \frac{l_p}{l_m} = \frac{d_p}{d_m} = \frac{H_p}{H_m} \quad (3)$$

Estas relaciones no son suficientes para asegurar que los patrones de flujo sean similares tanto en el modelo como en el prototipo.

- Similitud cinemática, relación de las velocidades características

$$\lambda_V = V_r = \frac{V_p}{V_m} = \frac{V_{1p}}{V_{1m}} = \frac{V_{2p}}{V_{2m}} \quad (4)$$

- Similitud dinámica, relación de fuerzas

$$\lambda_F = F_r = \frac{F_{1p}}{F_{1m}} = \frac{F_{2p}}{F_{2m}} \quad (5)$$

2.3.2. Relaciones de escalas subsecuentes

De las relaciones básicas de escala, L_r , V_r y F_r , se pueden deducir expresiones para masa, tiempo, presión y caudal.

$$Q_r = V_r * \lambda_L^2 \quad \text{Caudal} \quad (6)$$

En flujo en canales abiertos, la presencia de la superficie libre significa que los efectos gravitacionales son importantes. El número de Froude ($F_r = V/\sqrt{gL}$) siempre es importante. Se pueden deducir relaciones subsecuentes de escala con el número de Froude constante.

$$\begin{aligned} F_{rp} &= F_{rm} \\ \frac{V_p}{\sqrt{gL_p}} &= \frac{V_m}{\sqrt{gL_m}} \\ \lambda_V &= \sqrt{\lambda_L} \quad \text{Similitud de Froude} \end{aligned} \quad (7)$$

Con la similitud de Froude se deducen las siguientes expresiones útiles para la modelación física de estructuras hidráulicas.

$$\lambda_A = \lambda_L^2 \quad \text{Escala de áreas} \quad (8)$$

$$\lambda_Q = \lambda_L^{\frac{5}{2}} \quad \text{Escala de caudales} \quad (9)$$



2.3.3. Efectos de escala

Las distorsiones producidas por efectos como la viscosidad, tensión superficial, fuerzas gravitacionales, etc., son los efectos de escala, que se producen cuando uno o más de los parámetros analizados (viscosidad, densidad del fluido, número de Reynolds) son diferentes entre el modelo y el prototipo.

En flujos de superficie libre, el efecto gravitacional es dominante, por ejemplo, si se utiliza agua tanto en el modelo como en el prototipo, es imposible mantener el mismo número de Froude y de Reynolds.

$$(Re = \lambda_r^{\frac{3}{2}}) \tag{10}$$

2.3.4. Modelo hidráulico llevado a escala

Selección de la escala para el modelo hidráulico.

Se ha implementado el modelo físico para el vertedero Mochache según las relaciones de escalas ya mencionadas, estableciendo la escala longitudinal según el área disponible (52 m²) en el terreno del Campus Balzay perteneciente a la Universidad de Cuenca.

$$\lambda_L = \frac{1}{20}$$

La relación principal para este estudio es la que transforma los caudales de diseño del prototipo, indicados en el análisis hidrológico, en los caudales a emplearse en el modelo.

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \lambda_L^{\frac{5}{2}} = \left(\frac{1}{20}\right)^{\frac{5}{2}} \tag{11}$$

Donde,

Q_p , caudal del prototipo ensayado experimentalmente

Q_m , caudal que ingresa al modelo

λ_L , factor de escala de longitudes

Con la última expresión establecida se describe en la Tabla 7 los caudales de diseño tanto en prototipo como en modelo.

Tabla 7. Caudales de diseño escalados, debidos a diferentes períodos de retorno

CAUDALES DE DISEÑO		
Período de Retorno	Caudal Máximo Laminado Prototipo	Caudal Máximo Laminado Modelo
T (años)	(m³/s)	(m³/s)
5	9.5	0.475
10	10.8	0.54
25	12.5	0.625
50	13.7	0.685
100	14.9	0.745
AMP	30.9	1.545

Construcción del modelo hidráulico

Respetando los criterios de similitud geométrica, cinemática y dinámica se ha construido el modelo hidráulico, con el objetivo que los resultados alcanzados sean altamente confiables.

La estructura de captación consta de una compuerta de operación vertical con capacidad de aproximadamente 100 l/s del Río Tomebamba, el caudal es conducido por un canal no revestido de sección rectangular hasta un canal de sección mayor que funciona como un tanque de almacenamiento. El tanque consta de dos estructuras principales que son: un vertedero lateral que permite evacuar los caudales de excesos y mantener una carga constante en el mismo, y una compuerta plana de operación vertical que regula los caudales de ingreso al modelo

Para las estructuras encargadas del control de caudales experimentales se ha implementado una compuerta para el control de caudales de ingreso al modelo Mocache, para ejecutar cada una de las pruebas en modelo hidráulico.

Para las estructuras de aquietamiento que permiten que el flujo ingrese al modelo hidráulico sin efectuar ningún tipo de distorsión, evitando la alteración de los diferentes patrones de flujo, se han empleado ladrillos con una malla plástica que también evita el paso de material flotante del agua. Se puede observar lo descrito en la Figura 6.



Figura. 6. Aquietamiento del flujo de ingreso, aguas arriba y aguas abajo del vertedero de control

Las estructuras de control de niveles de agua han sido colocadas de forma puntual considerando zonas de interés, como el nivel del embalse usado como el origen para la calibración de los caudales a evaluar, así como la carga en el vertedero Creager que sirve como referencia para constatar el funcionamiento óptimo de la estructura.

El modelo hidráulico se ha construido una vez analizada la información proporcionada sobre la disposición en planta y perfil de la geometría del vertedero prevista en los diseños originales. Previo a la construcción se analizó la siguiente información:

- Topografía en planta de la zona.
- Geometría general del vertedero.
- Consideraciones adicionales básicas aplicadas en el diseño de la obra de descarga.
- Niveles de agua en las diferentes zonas de interés

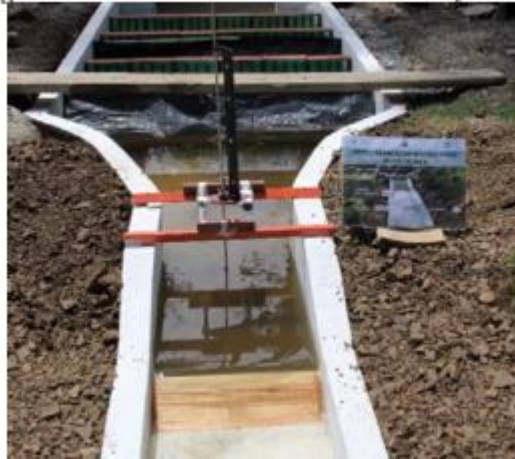


Figura. 7. Estructura de control de niveles de agua, ubicada sobre el vertedero Creager

El modelo hidráulico construido consta de las siguientes estructuras: Vertedero de excesos tipo Creager, dos rápidas, cuenco disipador y canal de restitución de caudales. La construcción del modelo físico, incluyendo sus estructuras de medición de caudales, comprende un área aproximada de 52 m^2 . El material utilizado para la construcción es 100 % de hormigón. El canal de restitución fue implementado de material suelto de tal manera que durante las pruebas experimentales nos permita visualizar los posibles procesos erosivos y concentración de energía que pudieran presentarse a la salida del cuenco disipador.

Calibración del modelo hidráulico

Con el propósito de evaluar el comportamiento hidráulico de la descarga sobre el vertedero de excesos con perfil Creager, se realiza el estudio para definir su curva de descarga con el siguiente procedimiento:

- Registrar el caudal que ingresa al modelo, y es descargado por el vertedero de excesos.
- Registrar el nivel estabilizado en el embalse y la carga de agua sobre la cresta del vertedero de excesos para cada caudal.

El caudal de ingreso al modelo es calculado con la tendencia experimental que relaciona el caudal evacuado Q , en función de la carga h , sobre la cresta del vertedero rectangular calibrado previamente.

El caudal medido en el modelo se traslada a prototipo como indica la Ecuación 12

El nivel del embalse es registrado mediante limnímetros con precisión de 0.1mm ubicados aguas arriba, a una distancia igual a cuatro veces la carga del vertedero de excesos, de esta manera el calado de agua H medido sobre la cresta se obtiene mediante la diferencia entre la cota del nivel del embalse y la cota de la cresta del vertedero. Las cargas sobre el vertedero registradas en modelo, son transformadas a calados del prototipo mediante la similitud de Froude explicada anteriormente:

$$H_m = N_{embalse} - N_{cresta} \quad (12)$$

$$H_p = H_m * \lambda_L \quad (13)$$

Donde,



H_p , carga sobre el vertedero de excesos en el prototipo.
 H_m , cara sobre el vertedero de excesos en el modelo.
 λ_L , factor de escala de longitudes.

El caudal evacuado por un vertedero ajustado a lámina vertical, es calculado mediante la Ecuación 15, de la que se obtiene el coeficiente de descarga.

$$Q_p = C_d * B_p * L_p * H_p^{\frac{3}{2}} \tag{14}$$

Donde;

- Q_p , Caudal prototipo descargado por el vertedero.
- C_d , Coeficiente de descarga variable.
- L_p , Ancho del vertedero.
- H_p , Carga prototipo sobre la coronación, más la altura debida a la velocidad de aproximación.

Se ha calibrado el vertedero de control de caudales de ingreso aforando mediante el método volumétrico para un rango de caudales entre 3.5 a 17 l/s, obteniendo la ecuación de descarga $Q = 0.7099 * H^{1.4409}$ de la curva de descarga de la Figura 8

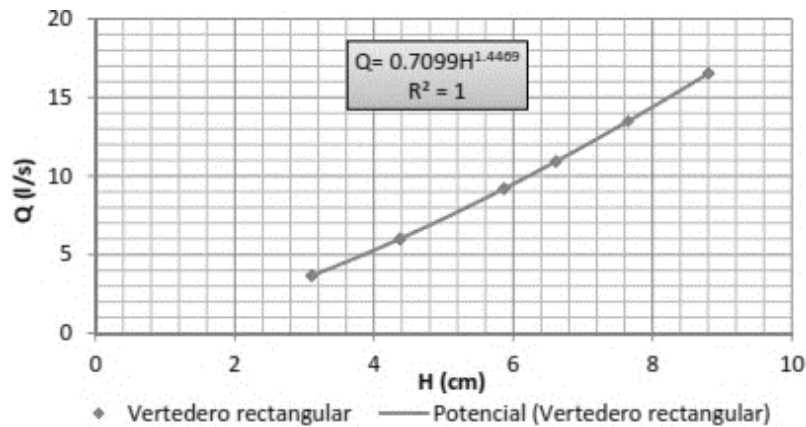


Figura. 8 Curva de descarga del vertedero de control de caudales de ingreso

Continuidad de caudales

Al ser el modelo físico del vertedero Mocache construido con materiales bajamente permeable se garantiza la continuidad de caudales.

Se han analizado los parámetros de interés que pudieran provocar efectos de escala, con el objetivo de garantizar la confiabilidad de los resultados, Tabla 8.

Tabla 8. Análisis de parámetros que provocan efectos de escala, en modelo y prototipo

	Descripción	Unidad	Modelo	Prototipo
Aproximación al vertedero	Viscosidad cinemática del fluido (18°C)	m ² /s	1.061E-06	1.061E-06
	Densidad del fluido (18°C)	Kg/m ³	998.5	998.5
	Caudal	m ³ /s	0.007	12.52
	Tirante	m	0.138	2.77
	Ancho del canal	m	0.50	10
	Área	m ²	0.0694	27.7
	Velocidad	m/s	0.1095	0.486
	Numero de Reynolds de Flujo	-	36875.44	3.29E+07
Rápida	Viscosidad absoluta del fluido (18°C)	m ² /s	1.061E-06	1.061E-06
	Caudal	m ³ /s	0.007	12.52
	Tirante	m	0.0054	0.108
	Ancho del canal	m	0.50	10
	Área	m ²	0.0027	1.08
	Velocidad	m/s	1.4	6.26
	Numero de Reynolds de Flujo	-	88069.846	3.29E+07

2.4. Aspectos hidráulicos relacionados a las variaciones implementadas en el modelo físico

Para conseguir una correcta distribución del flujo, velocidades óptimas a la llegada al cuenco disipador y evitar los fenómenos de erosión y socavación, se han implementado subestructuras hidráulicas en el modelo físico, descritas a continuación:

Implementos en rápida 1

2.4.1. Rugosidad artificial

Bloques disipadores de energía, con el objetivo de generar resalto hidráulico al pie del vertedero tipo Creager, y elevar el calado en esta sección de la estructura. Se indica posteriormente la geometría implementada.

2.4.2. Contra pendiente

Flujo con pendiente negativa con el objeto de disminuir las velocidades al final de la rápida 1, y controlar el comportamiento hidráulico en la rápida en curva., se indica posteriormente la geometría implementada.

Implementos en rápida 2

Como se ha indicado en la descripción del problema, la segunda rápida del vertedero de caudales de excesos de la presa Mocache es un canal hidráulico con alineamiento no lineal cuyo diseño es muy complejo debido a la trayectoria curva que debe seguir el flujo. La distribución del flujo no es adecuada, puesto que las líneas de corriente se presentan entrecruzadas a más de curvilíneas, generando corrientes espirales y ondas cruzadas. Además, la fuerza centrífuga que actúa sobre el flujo a lo largo de una curva produce un aspecto único conocido como sobreelevación, es decir, una elevación en la superficie de agua en la banda externa y una disminución en el calado del borde interno. (Chow, 1994)

Sobreelevación.

La sobre elevación en canales curvos puede determinarse mediante ecuaciones no muy exactas, basadas en la segunda ley del movimiento, de Newton, a la acción centrífuga de la curva. Al suponer una velocidad media V_z y un mismo radio de curvatura para las

líneas de corriente r_c , considerando la línea transversal del agua como recta puede obtenerse la ecuación para la sobreelevación.

$$\Delta h = \frac{V_z^2 b}{g r_c} \tag{15}$$

Donde,

b ancho del canal.

Al aplicar la segunda ley de Newton a cada línea de corriente e integrar para toda la sección del canal, se consigue:

$$\Delta h = \frac{2.30 V_z^2}{g} \log\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \tag{16}$$

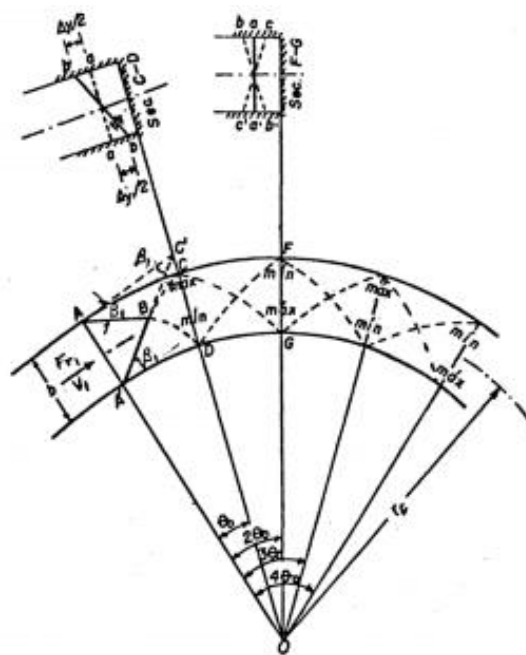


Figura. 9. Configuración de las ondas oblicuas para el flujo supercrítico en una curva simple horizontal, (Sotelo, G., n.d.)

De la figura se observa la disposición típica en planta de las ondas oblicuas formadas en una curva de un canal rectangular, con los frentes positivos y negativos señalados por las líneas ABD – A'BC respectivamente. Estos se generan en los puntos de tangencia A y A'

Para determinar el diseño de canales curvos en régimen supercrítico debe considerarse que el radio cumpla:

$$\frac{r_c}{b} > 4 * F_r^2 \tag{17}$$

En función de la figura se deduce el valor de la mitad de la longitud de onda.

$$\tan \theta_0 = \frac{b}{(r_c + \frac{b}{2}) \tan(\beta_1)} \tag{18}$$

Donde,

$$\text{sen} \beta = \frac{1}{F_r} \tag{19}$$

2.4.3. Transición del peralte de la curva

Para reducir el efecto de la sobreelevación del flujo en régimen supercrítico a través de canales curvos se ha encontrado conveniente la variación de la pendiente transversal del canal que ayude a disminuir la acción de la onda. Esto es similar a la inclinación que se utiliza en las curvas de las carreteras, a fin de equilibrar la componente del peso del elemento que transita la curva, como un vehículo o en nuestro caso el agua, en la dirección radial de la fuerza centrífuga. Esto implica que la resultante del peso W del agua y de la fuerza centrífuga sea perpendicular al piso del canal.

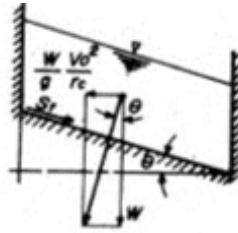


Figura. 10. Equilibrio y pendiente transversal en una curva horizontal, (Sotelo, n.d.)

$$\tan \theta = \frac{W \cdot \frac{v^2}{g \cdot r_c}}{W} \tag{20}$$

Por lo tanto, la pendiente transversal adecuada $S_t = \tan(\theta)$ debe ser:

$$S_t = \frac{v^2}{g r_c} \tag{21}$$

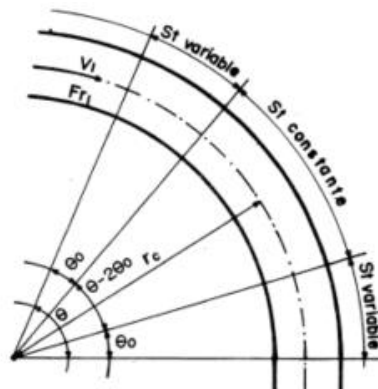


Figura. 11. Transición del peralte en una curva simple

Para evitar cambios bruscos en las características del flujo, la pendiente transversal debe proporcionarse de manera gradual, desde cero al principio de la curva (Figura 11.) y aumentando linealmente hasta su máximo en la parte central, para disminuir gradualmente hasta cero en una longitud de arco correspondiente a θ_0 antes de terminar la curva. de esta manera, la parte de la curva con pendiente transversal constante, corresponde al ángulo $\theta - 2\theta_0$, donde θ es la deflexión total de la curva.

Se puede hacer la transición del peralte con respecto al borde interno o externo. Para este caso se ha optado por una transición del peralte con respecto al borde interno, es decir, se dio elevación al borde externo mientras que el terno se mantiene fijo.

Se presenta el procedimiento del cálculo a ser empleado.

- 1) Determinación de parámetros hidráulicos: Ancho superficial (T), Área mojada (A), Profundidad Hidráulica (D), y Número de Froude (F).
- 2) Cálculo de ángulo β_1

$$\text{sen}\beta_1 = \frac{1}{Fr_1} - \sqrt{\frac{\tanh\left(\frac{2\pi y_1}{b_1 \cos\beta_1}\right)}{\frac{2\pi y_1}{b_1 \cos\beta_1}}} \quad (22)$$

- 3) Cálculo de la mitad de la longitud de la onda, ecuación (21)
- 4) Cálculo de la energía específica antes de la curva, para obtener el tirante y_1 .

2.4.4. Vanos concéntricos circulares.

La sobreelevación y el patrón de perturbación pueden reducirse mediante vanos concéntricos que dividen el ancho del canal en una serie de canales curvos angostos. Este método generalmente no es práctico y se vuelve inaplicable en canales que mueven basura de tamaños mayores que el ancho subdividido. (Chow, 1994)

No se presenta algún método definido para el diseño de la geometría de estos vanos, y al ser este un trabajo experimental se implementará una alternativa netamente empírica.

2.4.5. Obstáculos diagonales.

Son obstáculos instalados en el fondo del canal cerca de los extremos de la curva que producirán un efecto similar al de una curva suavizada (transición del radio en espiral). Un esquema efectivo de estos obstáculos se ha obtenido experimentalmente por Robert Knapp, indicado en la Figura 12. (Knapp, 1951)

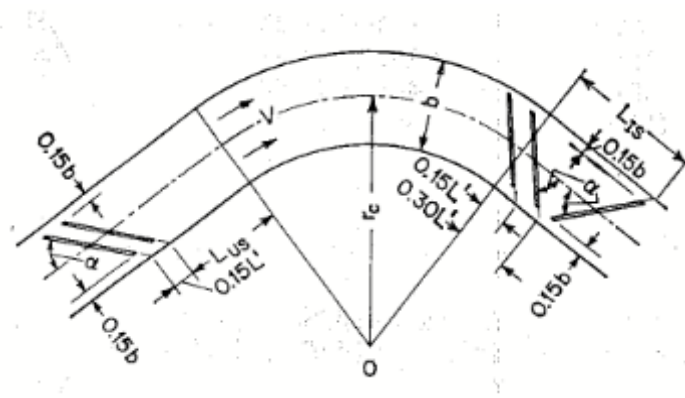


Figura. 12. Planta de la instalación de obstáculos en un canal curvo (Knapp, 1951)

Donde,

- El ángulo óptimo α de los obstáculos es de 30° .
- La distancia L_{US} puede estimarse mediante:

$$L_{US} = \frac{Kb}{\tan(\beta)} \quad (23)$$

Donde, K es un coeficiente adimensional que varía entre 0.9 y 1.15.

- La longitud L_{IS} es:

$$L_{IS} = 0.30L' + \frac{b}{\tan(\alpha)} \quad (24)$$

Donde, $L' = b/\tan(\beta)$, es decir la mitad de la longitud de onda.

Este método puede usarse como una medida remedial en canales existentes diseñados con curvas circulares simples y otras formas curvas no satisfactorias. Las principales desventajas de este método son el alto costo de mantenimiento, la perturbación muy



pronunciada en flujos bajos y la posible cavitación en flujos extremos con altas velocidades. La perturbación pronunciada en los puntos bajos puede causar inquietud y desconfianza en la observación.

Tabla Parámetros necesarios para el diseño de obstáculos diagonales

Característica	Símbolo	Valor	Unidad
Ángulo Óptimo	A	30,00	°
Ancho del canal	B	0,50	m
Ángulo de onda	B	8,13	°
Coefficiente	K	1,10	Adimensional
Longitud de Onda	L'	0,35	m

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según la metodología indicada y su orden descrito en el capítulo 2, se muestra a continuación los resultados alcanzados en el trabajo experimental.

3.1. Primer Escenario - Diseño Original

Con el modelo llevado a escala y garantizado todos los parámetros que pudieran provocar variaciones en los resultados se ha procedido a la experimentación para los caudales de interés mencionados.

Mediante limnómetros de precisión se estable la curva de descarga llevada a prototipo del Vertedero Creager Mocache.

Tabla 9 Coeficiente de descarga determinado mediante experimentación. Diseño Original

COEFICIENTE DE DESCARGA		
Caudal	Carga sobre la cresta del Vertedero (m)	Coeficiente de Descarga Cd
(m ³ /s)		(-)
12.12	0.78	1.77
14.00	0.85	1.78
14.91	0.90	1.73
19.91	1.04	1.88
25.41	1.22	1.89
29.20	1.29	2.00
15.12	0.88	1.83
17.59	0.96	1.86
23.44	1.13	1.95
30.95	1.36	1.96

Con lo que se obtiene un coeficiente de descarga promedio de 1.87

Una de las características que influye en la capacidad de descarga a través de un vertedero es la distribución del flujo de aproximación hacia la estructura es así que: para las condiciones de caudales de ingreso dadas, se visualizó una distribución uniforme del flujo de aproximación hacia la estructura de descarga con una velocidad de 1.06 m/s

Se identificó que no existe resalto hidráulico aguas abajo del cimacio para ninguno de los caudales de interés analizados.



Figura. 13. Esquema de datos levantados en la experimentación. Diseño Original

Mediante la experimentación se ha observado claramente la formación de líneas oblicuas de flujo, las mismas que han sido limitadas con la configuración de un abocinamiento en base a las recomendaciones de diseño, despreciando así su efecto mínimo en este modelo.



Figura. 144. Visualización de líneas de flujo oblicuas en laboratorio. Diseño Original

Como se ha indicado anteriormente, uno de los principales aspectos al analizar flujo supercrítico en canales no alineados (curvos) es el efecto de la sobreelevación, fenómeno presente en esta primera experimentación, al observar calados mayores en el borde exterior de la curva.

Para conocer los parámetros de flujo importante para el análisis (calado y velocidad), se ha identificado secciones transversales y abscisas en el eje del canal.

Para determinar las velocidades puntuales en las secciones transversales, se han realizado registros mediante Flow Tracker, Tubo Pitot y Micromolinetete en los márgenes externos (d), internos (i) y en el eje del canal (c), al igual que los calados del flujo.



Figura. 5. secciones transversales y dirección del flujo en la rápida en curva. Diseño Original

Evaluando para el caudal máximo de diseño $30.95 \text{ m}^3/\text{s}$, se presenta los resultados obtenidos tanto de velocidades (Tabla 10) como de calados (Tabla 11) en las secciones indicadas.

Tabla 10. Registro de velocidades medidas en laboratorio. Diseño Original

ABSCISA	VELOCIDAD (m/s)					
	Modelo			Prototipo		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
2.5		1.02			4.57	
4.1		1.09			4.86	
5.7	1.67	1.96	1.90	7.49	8.77	8.52
7.3		2.05	2.40		9.18	10.75
8.5		2.07	3.24		9.24	14.51

Tabla 11. Registro de calados medidos en laboratorio, presentados en prototipo. Diseño Original

ABSCISA	CALADOS					
	MODELO (cm)			PROTOTIPO (m)		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
2.5	3.21	2.965	2.29	0.642	0.593	0.458
2.9	3.8	3.38	2.41	0.76	0.676	0.482
3.3	3.36	3.69	3.3	0.672	0.738	0.66
3.7	2.91	3.17	3.63	0.582	0.634	0.726
4.1	2.47	3.25	3.71	0.494	0.65	0.742
4.5	2.895	3.24	3.44	0.579	0.648	0.688
4.9	2.22	2.91	2.29	0.444	0.582	0.458
5.3	2.43	2.37	1.8	0.486	0.474	0.36
5.7	1.5	2.01	2.965	0.3	0.402	0.593
6.1	0.85	2.19	3.89	0.17	0.438	0.778
6.5	0.36	1.55	6.27	0.072	0.31	1.254
6.9	0.2	1.41	5.8	0.04	0.282	1.16
7.3	0.15	0.975	6.69	0.03	0.195	1.338
7.7	0.3	0.63	6.39	0.06	0.126	1.278
8.1	0.305	1.63	6.105	0.061	0.326	1.221
8.5	0.3	1.15	5.325	0.06	0.23	1.065
8.9	7.06	7.46	4.02	1.412	1.492	0.804

En la segunda rápida se ha identificado la presencia clara de sobreelevación, lo que provoca una distribución del flujo no adecuada para el óptimo funcionamiento del cuenco disipador.

Para evaluar el desempeño del cuenco disipador se ha implementado una sección de control aguas abajo del modelo físico, en la misma que se ha identificado las velocidades en los puntos de interés presentados en la Tabla 12, obteniendo una velocidad al final de la rápida curva aproximada de 14.51 m/s (prototipo), recalcando la escasa uniformidad del flujo producida por la curvatura que finaliza directamente en el cuenco, a más de la limitación que produce para el cálculo del número de Froude al no permanecer los calados constantes.

Tabla 12. Velocidades (prototipo) de aproximación al cuenco disipador en la abscisa 8.5. Diseño Original

ABSCISA	VELOCIDAD (m/s)		
	Izquierda	Centro	Derecha
8.5	-	9.24	14.51



Figura. 66. Características del flujo de aproximación hacia la estructura de disipación de energía. Remolino en la margen izquierda. Socavación en la margen derecha del canal de restitución. Diseño Original

De acuerdo a las recomendaciones del Bureau of Reclamation para el cuenco disipador Tipo III, la condición de calado aguas abajo del mismo deberá ser del orden 2.53 m (semejante al calado conjugado), sin embargo, de acuerdo a la información topográfica, el cauce natural presenta una profundidad del orden de 3 m (a la salida del cuenco) de modo que es necesario profundizar el mismo para efectos de lograr un ajuste entre la superficie de agua en el cuenco y en el canal de restitución.

Al realizar los ensayos para evaluar el cuenco disipador se observó que el flujo solo ingresa por la margen derecha, lo cual provoca que el cuenco disipador no funcione de manera correcta, además se evidencio la presencia de un remolino en el cuenco. Al no trabajar adecuadamente el cuenco disipador se produjo socavación en la margen derecha del canal de restitución, todo lo mencionado se puede observar en la Figura 16

Debido a la gran turbulencia e inestabilidad del flujo que se presenta en el cuenco no se consiguió medir calados ni velocidades, pero se optó por medir las velocidades en la zona de recirculación formada en el cuenco disipador la cual es aproximadamente 2.93m/s (en prototipo). Se procedió a verificar las condiciones de bordo libre planteados en el diseño original para el caudal máximo de descarga evaluado en modelo físico (30.95 m/s), en éste sentido se determinó que el bordo libre, es insuficiente para el caudal establecido.

Se han registrado las velocidades en el canal de restitución en la zona media y final del canal, en la parte inicial no se pudo registrar debido a la inestabilidad del flujo.

Tabla 13. Velocidades en el canal de restitución. Diseño Original

Zona	VELOCIDAD (m/s)		
	Inicio	Centro	Salida
Canal de restitución	-	2.37	1.28

Debido a la presencia de calados no uniformes en la rápida en curva, inestabilidad del flujo en la zona de entrada al cuenco dissipador y velocidades altas en la margen derecha del cuenco, se registra socavación en la margen derecha del canal de restitución. Por lo que se han visto necesarias las evaluaciones de nuevas alternativas en modelo físico para resolver todos los problemas mencionados.

3.2. Segundo Escenario - Alternativas de diseño en rápida 1

En base a los resultados alcanzados en la primera fase de estudios de la estructura de evacuación de caudales de excesos de la presa Mocache, se planteó la necesidad de evaluar en una segunda fase las condiciones hidráulicas necesarias que ayuden a garantizar un resalto hidráulico en la primera rápida, mismo que permitirá la reducción de las velocidades de aproximación a la segunda rápida y la obtención de calados mayores, parámetros que serán importantes para el diseño de un peralte requerido en la segunda rápida. El peralte permitirá una mejor distribución del flujo a lo largo de la rápida 2, esto provocará que el cuenco dissipador trabaje de la forma esperada en diseño, y a la vez evitará la socavación en la margen derecha del canal de restitución.

Para todas las alternativas que se presentan a continuación se ha utilizado únicamente el caudal máximo de diseño $30.95 \text{ m}^3/\text{s}$ con el afán de garantizar el desempeño para la condición más desfavorable.

Alternativa 2-1

Esta primera alternativa consiste en emplear bloques dissipadores de energía, con el propósito de estimular la formación de un resalto hidráulico y conseguir así un calado conjugado más elevado.

Se han colocado los dados de impacto a 8m del pie del vertedero Creager, como se indica en la Figura 16 al igual que su geometría (Figura 17).



Figura. 7. Datos dissipadores a 8m del pie del Creager. Alternativa 2-1 (PROMAS,2015)

De la experimentación se ha observado que no se produce el resalto hidráulico buscado. El flujo impacta los bloques dissipadores aumentando el nivel únicamente en esta zona y perdiendo calado al terminarse el área destinada a los mismos. Además, los bloques provocan que el vertedero se sumerja, lo que resulta indeseable en este caso, por alterar directamente la laminación proyectada. Evaluando para el caudal máximo de diseño $30.95 \text{ m}^3/\text{s}$, se presentan los resultados obtenidos tanto de velocidades (Tabla 14) como de calados (Tabla 15) en las secciones indicadas.

Tabla 14 Registro de velocidades medidas en laboratorio. Alternativa 2-1

ABSCISA	VELOCIDAD (m/s)					
	MODELO			PROTOTIPO		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
2.5						
4.1		0,92			4,13	
5.7	1,73	1,96	1,99	7,72	8,74	8,92
7.3		2,08	2,63		9,31	11,76
8.5		1,98	2,83		8,85	12,68

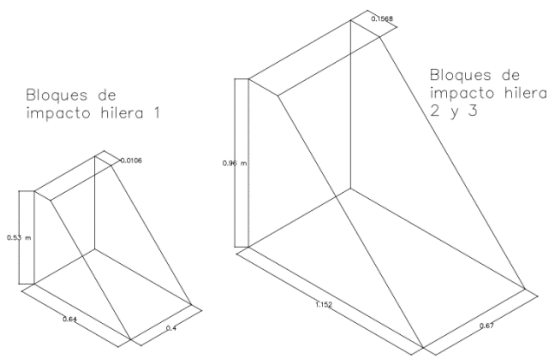


Figura 8. Geometría de los dados disipadores de energía. Alternativa 2-1

Figura 9. Distribución del Flujo Alternativa 2-1

Tabla 15. Registro de calados tanto en modelo como en prototipo. Alternativa 2-1

ABSCISA	CALADOS					
	MODELO (cm)			PROTOTIPO (m)		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
2.5	9,95	9,57	11,35	1,99	1,914	2,27
2.9	5,11	5,06	5,34	1,022	1,012	1,068
3.3	5,15	5,23	4,55	1,03	1,046	0,91
3.7	4,6	5,08	5,19	0,92	1,016	1,038
4.1	4,28	4,6	5,07	0,856	0,92	1,014
4.5	4,09	4,12	4,93	0,818	0,824	0,986
4.9	3,12	3,15	2,59	0,624	0,63	0,518
5.3	2,23	2,51	2,22	0,446	0,502	0,444
5.7	1,55	2,32	3,6	0,31	0,464	0,72
6.1	1	2,08	4,67	0,2	0,416	0,934
6.5	0,43	1,22	6,49	0,086	0,244	1,298
6.9	0,31	1,62	5,59	0,062	0,324	1,118
7.3	0,14	0,85	7,275	0,028	0,17	1,455
7.7	0,18	0,39	6,57	0,036	0,078	1,314
8.1	0,14	0,94	6,59	0,028	0,188	1,318
8.5	-	1,35	5,6	-	0,27	1,12
8.9	-	-	-	-	-	-

Alternativa 2-2

Debido a los resultados obtenidos en la alternativa anterior se ha procedido a modificar la implementación de los bloques de impactos al colocarlos al pie del vertedero Creager con el fin de incrementar la disipación de energía y provocar el que el calado conjugado aumente.



Figura. 10 Datos disipadores de energía al pie del Creager. Alternativa 2-2

Obteniendo resultados muy parecidos a los de la alternativa anterior.



Figura. 11. Resalto sumergido. Alternativa 2-2

Se indica en la Tabla 16 las velocidades medidas en la experimentación, que casi no varían comparadas con las de la alternativa anterior.

Tabla 16. Registro de velocidades medidas en la experimentación. Alternativa 2-2

ABSCISA	VELOCIDAD(m/s)	
	MODELO PROTOTIPO	
	Centro	Centro
4.1	0.93	4.16

Tabla 17. Registro de calados en modelo y prototipo. Alternativa 2-2

ABSCISA	CALADOS					
	MODELO (cm)			PROTOTIPO (m)		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
2.5	4,27	4,1	4,63	0,854	0,82	0,926
2.9	4,27	4,31	4,1	0,854	0,862	0,82
3.3	4,61	4,52	4,93	0,922	0,904	0,986
3.7	4,92	4,65	5,21	0,984	0,93	1,042
4.1	4,05	4,52	4,9	0,81	0,904	0,98
4.5	3,28	3,97	4,26	0,656	0,794	0,852

Alternativa 2-3

Debido a la inexistencia de resalto hidráulico con las alternativas anteriores se ha optado por implementar en la primera rápida un fondo en contra pendiente del 0.2%, como se indica en la Figura 21:

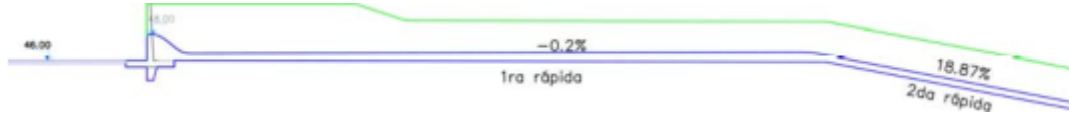


Figura. 12. Contrapendiente (0.2%) en rápida 1. Alternativa 2-3. (PROMAS, 2015)

De la experimentación se ha obtenido un flujo sin resalto hidráulico luego del Creager, por lo que se ha omitido la toma de datos (calados y velocidades).

Alternativa 2-4

Aun con la intención de provocar un resalto hidráulico se ha considerado como alternativa dar un contrapendiente del 2% en la primera rápida con el mismo procedimiento anterior.

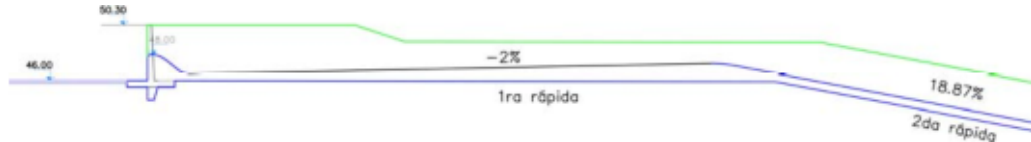


Figura. 13. Contrapendiente (2%) en rápida 1. Alternativa 2-4 (PROMAS,2015)

Se resalta que las velocidades resultan menores y adecuadas al finalizar la rápida 1, siendo estas convenientes para la distribución del flujo en la rápida 2. Pero se observa que el resalto esperado se ha sumergido al igual que el vertedero, siendo esto un resultado no válido para el proyecto. Se presenta los resultados cuantitativos de esta alternativa en la tabla y figuras a continuación.

Tabla 18 Registro de velocidades medidas en experimentación. Alternativa 2-4

ABSCISA	VELOCIDAD(m/s)	
	MODELO PROTOTIPO	
	Centro	Centro
4.1	0.59	2.66

Tabla 19. Registro de calados en modelo y prototipo. Alternativa 2-4

ABSCISA	CALADOS					
	MODELO (cm)			PROTOTIPO (m)		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
4.1	6,075	5,87	5,92	1,215	1,174	1,184
6.1	0,87	2,02	3,56	0,174	0,404	0,712
7.3	0,265	0,91	7,08	0,053	0,182	1,416

*Se puede observar el reporte de calados superiores a 1.20 m (Prototipo) al final de la primera rápida.

Otro aspecto sobresaliente que se ha observado gracias a la experimentación es la acumulación de agua en la primera rápida al momento que el vertedero no se encuentra

funcionando, esto debido a la elevad contrapendiente implementada. Esto confirma aún más el deshecho de esta alternativa.

Alternativa 2-5

A partir de los resultados obtenidos en la Alternativa 2-4, se plantea disminuir el porcentaje de la contrapendiente en busca de un mejor desempeño hidráulico. Se ha considerado implementar una con el 1.5% como se observa en la Figura 23.

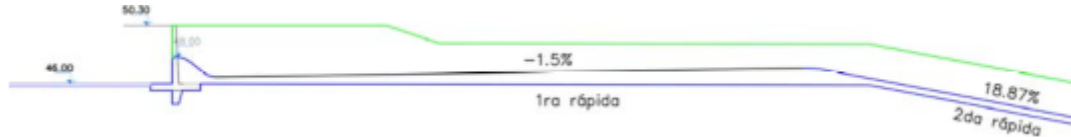


Figura. 14 Contrapendiente (1.5%) en rápida 1. Alternativa 2-5

En términos de la sumergencia del resalto y del vertedero, se establece que aún se presentan estos inconvenientes, detallados en las tablas (20 – 21) a continuación donde se indican los calados y velocidades al final de primera rápida.

Tabla 20 Registro de velocidades medidas en laboratorio. Alternativa 2-5

ABSCISA	VELOCIDAD(m/s)	
	MODELO PROTOTIPO	
	Centro	Centro
4.1	0.58	2.61

Tabla 21. Registro de calados en modelo y prototipo debidos a la experimentación en la Alternativa 2-5

ABSCISA	CALADOS					
	MODELO (cm)			PROTOTIPO (m)		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
4.1	6,4	6,21	5,92	1,28	1,24	1,18
6.1	0,6	2,202	4,3	0,12	0,44	0,86
7.3	0,34	0,69	6,9	0,07	0,14	1,38

En comparación con la alternativa anterior se observa que hay mínimas variaciones, por lo que tampoco se ha validado esta alternativa.

Alternativa 2-6

Debido a que el resalto continúa sumergido en la Alternativa 2-5, se ha considerado evaluar la primera rápida con un contrapendiente del 1%, consiguiendo producir el resalto hidráulico en condiciones adecuadas, además que los calados se presentan elevados a comparación de las alternativas anteriores, así como las velocidades al final de la primera rápida se han reducido mejorando notablemente el funcionamiento hidráulico en toda la estructura. Se indica su geometría y el registro fotográfico a continuación.



Figura. 15 Contrapendiente (1%) en rápida 1. Alternativa 2-6



Figura. 16. Resalto Hidráulico al pie del Creager. Alternativa 2-6

Siendo esta alternativa considerada como óptima en la rápida 1, se toman los datos de velocidades y calados en las abscisas próximas a la curvatura con el objetivo de evaluar la rápida en curva.

Tabla 22 Registro de velocidades medidas en la experimentación. Alternativa 2-6

ABSCISA	VELOCIDAD (m/s)					
	MODELO			PROTOTIPO		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
4.1		0.61			2.72	
4.9	1,62	1,70	1,61	7,248	7,617	7,194
5.3	1,82	1,87	1,85	8,140	8,347	8,271
7.3			2.56			11.46
8.1		1.29	2.82		5.67	12.65

3.3. Tercer escenario – Alternativas de diseño en rápida 2

En función de los resultados obtenidos en la segunda fase del presente estudio destinado a la optimización del diseño de la estructura de evacuación de caudales de excesos de la presa Mocache, se ha procedido a implantar adecuaciones necesarias con el fin de obtener condiciones adecuadas del funcionamiento en la rápida en curva.

La transición del peralte fue la alternativa que mejores resultados ha presentado en esta experimentación. Una vez realizado el primer ensayo ya con la transición del peralte instalado y al no obtener los resultados esperados se contempló aumentar el peralte, con esta adecuación se consiguió un mejorar los resultados, pero aún no se alcanzaron los resultados óptimos. Por lo que, se optó por alargar la zona de peralte constante como una nueva alternativa. Donde se reportó una mejor distribución del caudal a lo largo del canal y una buena distribución de flujo al final de la rápida, mejorando el funcionamiento del cuenco disipador. El detalle del diseño del peralte, así como las adecuaciones implementadas se encuentra detallado en los acápite siguientes.

Alternativa 3-1

Contrapendiente del 1% en la rápida 1 e implantación del peralte del 7.3% en la rápida 2.

Como se ha indicado en la metodología, para el vertedero Mocache se ha optado por una transición del peralte respecto al borde interno, es decir, se ha dado la elevación al borde externo mientras que el interno se mantiene fijo.

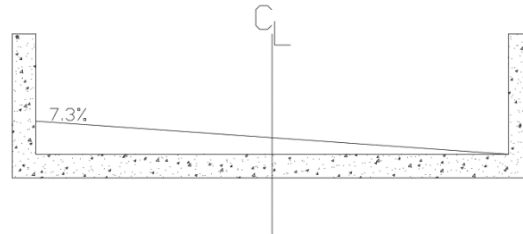


Figura. 17. Sección transversal del peralte con pendiente 7.3%. Alternativa 3-1

En la Tabla 23 se indican los principales parámetros hidráulicos considerados en el diseño. Se recalca que los datos de velocidad y del tirante aguas arriba de la curva fueron tomados de la Alternativa 2-6, los demás datos corresponden al diseño original.

Tabla 23 Datos obtenidos en la experimentación para el diseño de transición de peralte. Alternativa 3-1

TRANSICIÓN DE PERALTE			
Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Ancho	b	10	m
Rugosidad	n	0.015	-
Talud	z	0	-
Caudal	Q	30.95	m ³ /s
Pendiente	s	0.19	m/m
Radio de curvatura	Rc	75	m
Angulo de Deflexión	θ	49.53	°
Tirante aguas arriba de la curva	y1	0.56	m
Velocidad antes de la curva	V1	7.35	m/s

Partiendo de la Ecuación 18 se ha podido constatar que la condición establecida no se cumple; es decir que para que este diseño sea aplicable se requiere de un radio de curvatura mayor al del diseño original. Para evitar cambiar el alineamiento del vertedero y evitar elevar los costos, se ha optado por la alternativa de la transición del peralte como solución válida para estabilizar el flujo a lo largo del canal y obtener una mejor distribución en la aproximación al cuenco disipador. En la Tabla 24 se presenta el perfil de flujo obtenido.

Tabla 24. Perfil de flujo. Alternativa 3-1

Pared exterior				Pared interior				ΔY	ΔY
θ°	Fr (6-7)	y (m) (6-8)	y (m) (6-9)	θ°	Fr (6-7)	y (m) (6-8)	y (m) (6-9)		
0	3.147	0.557	0.557	0	3.147	0.557	0.557	0	0
5	2.663	0.729	0.71	-5.000	3.781	0.407	0.42	0.322	0.29
10	2.277	0.923	0.879	-10.000	4.661	0.279	0.302	0.643	0.577
20.914	1.632	1.422	1.295	-20.914	8.857	0.082	0.109	1.339	1.186
20.914	1.632	1.422	1.295	-20.914	8.857	0.082	0.109	1.339	1.186

Al aplicar la Ecuación (22) tenemos que $S_t = 0.073$, es decir que la pendiente transversal del peralte será de 7.3%.

De la observación, al evaluar para el caudal máximo de diseño, se resalta la presencia de flujos predominantes en la rápida curva, así como se muestra en la Figura 27. El primer flujo predominante empieza aproximadamente en la sección 5.3 desde izquierda a derecha; el siguiente en la abscisa 7.7 en sentido contrario; lo que muestra una distribución del flujo no adecuada en las aproximaciones al cuenco disipador. (Figura 28). Debido a estos fenómenos el cuenco trabaja de manera ineficiente, presentándose socavación en la margen derecha del canal de restitución aguas abajo del umbral de salida.



Figura. 18. Patrones de flujo predominantes en rápida 2. Alternativa 3-1



Figura. 19. Funcionamiento ineficiente del cuenco disipador. Alternativa 3-1

En las siguientes tablas (25 -26) se detalla las velocidades en las zonas de interés, empleadas posteriormente para comparaciones.

Tabla 25. Registro de velocidades medidas en laboratorio. Alternativa 3-1

ABSCISA	VELOCIDAD (m/s)					
	MODELO			PROTOTIPO		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
5.3	1,78	1,7	1,59	7,97	7,59	7,11
7.3	1,7	1,71	2,38	7,59	7,64	10,66
8.5	1,82	1,72	2,63	8,14	7,69	11,75

También se ha medido la carga sobre el Creager la cual fue igual a 6.35 cm (modelo) y 1.27 m (prototipo), con este valor se controla que el vertedero esté trabajando libre, es decir que no se han alterado los niveles en el embalse.

Debido a la socavación presentada en el canal de restitución, y los patrones de flujo predominantes en la rápida 2, se considera no válida esta alternativa.

Tabla 26. Registro de calados en modelo y prototipo. Alternativa 3-1

ABSCISA	CALADOS					
	MODELO (cm)			PROTOTIPO (m)		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
4,1	6,38	6,41	6,35	1,28	1,28	1,27
4,5	3,91	3,79	3,78	0,78	0,76	0,76
4,9	3,19	2,70	2,15	0,64	0,54	0,43
5,3	2,80	3,01	2,17	0,56	0,60	0,43
5,7	1,93	2,44	2,60	0,39	0,49	0,52
6,1	1,65	2,53	3,70	0,33	0,51	0,74
6,5	1,18	1,90	4,49	0,24	0,38	0,90
6,9	1,18	2,13	4,44	0,24	0,43	0,89
7,3	1,14	2,70	5,22	0,23	0,54	1,04
7,7	1,17	1,70	3,81	0,23	0,34	0,76
8,1	1,29	1,52	4,49	0,26	0,30	0,90
8,5	1,33	1,25	4,16	0,27	0,25	0,83

Alternativa 3-2

Por las fallas evidentes en la alternativa anterior, se ha considerado aumentar el peralte al doble, debido que se considera muy pequeño por estar en función del radio de curvatura del diseño original además porque el calado máximo se redujo a la mitad en el ensayo de la alternativa 7. Con esto se espera que los calados tomen la configuración mostrada en la Figura 29. Es decir que se compense el calado máximo y el mínimo hasta obtener calados semejantes en las dos márgenes de la rápida.

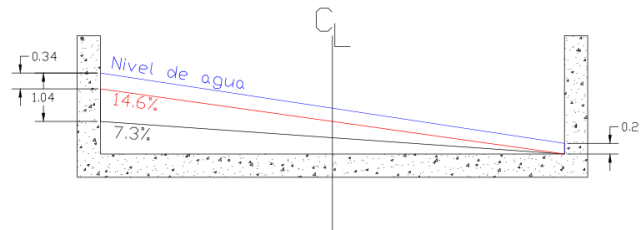


Figura. 20 Sección transversal de la rápida 2, abscisa 7.3, peralte 14.6. Alternativa 3-2

Se observa que existe una mejor estabilización del flujo, es decir, se puede evidenciar que los patrones de flujo ya no son tan pronunciados hacia la margen derecha. Pero el cuenco disipador no trabaja de manera óptima, donde se puede evidenciar aun la presencia de socavación en la margen derecha del canal de restitución.

Los patrones del flujo evidenciados en la Figura 30 deben ser corregidos para conseguir el funcionamiento adecuado del cuenco disipador. En la Figura 31 se evidencian los patrones de flujo y el funcionamiento del cuenco disipador, además de la presencia de un vórtice o zona de recirculación de agua al lado izquierdo, lo que provoca turbulencia en el margen derecho, por consiguiente, presencia de socavación, que, aunque menor a la Alternativa 3-1 sigue resultando insatisfactorio.



Figura 21. Patrones de flujo predominante a lo largo de la rápida 2. Alternativa 3-2



Figura 22. Funcionamiento del cuenco disipador, presencia de turbulencia. Alternativa 3-2

Se han registrado velocidades y calados en las abscisas de control, descritos en las Tablas 27 y 28 respectivamente.

Tabla 27 Registro de velocidades medidas en laboratorio. Alternativa 3-2

ABSCISA	VELOCIDAD (m/s)					
	MODELO			PROTOTIPO		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
4,9		1,6			7,15	
5,3	1,73	1,74	1,41	7,73	7,77	6,31
7,3	1,87	1,96	2,01	8,35	8,77	9
8,5	1,93	2	2,51	8,63	8,96	11,24

Tabla 28. Registro de calados en modelo y prototipo. Alternativa 3-2

ABSCISA	CALADOS					
	MODELO (cm)			PROTOTIPO (m)		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
4,1	6,09	6,33	6,60	1,22	1,27	1,32
4,5	3,79	3,82	3,87	0,76	0,76	0,77
5,3	2,36	2,42	2,17	0,47	0,48	0,43
6,9	1,76	2,35	2,82	0,35	0,47	0,56
7,3	1,45	2,07	3,68	0,29	0,41	0,74

De los datos observados se puede evidenciar la compensación de calados y velocidades para la alternativa presentemente implementada.

Además, se han medido las velocidades al final del canal de restitución siendo aproximadamente de $1.42m/s$ (prototipo), la cual constituye una velocidad adecuada para entregar caudal al río.

Se ha registrado también la velocidad de flujo de aproximación al vertedero Creager igual a 1.07 m/s , la cual se encuentra próxima a la velocidad de aproximación esperada en el diseño (0.94 m/s).

Alternativa 3-3

Con el objetivo de estabilizar el flujo a la entrada del cuenco disipador para lograr el funcionamiento adecuado del mismo, se ha procedido a implementar una prolongación del peralte constante de 10 a 18.7m (prototipo).



Figura. 23 Implementación de la prolongación del peralte. Alternativa 3-3

Esta prolongación se realiza con el objetivo de corregir los patrones de flujo que se han presentado desde la abscisa 7.3, con una dirección predominante hacia la margen derecha del canal. Ahora se ha evidenciado que existe un patrón predominante en la sección 5.3 que dirige el flujo hacia la derecha. Entre las secciones 6-9 y 7-7 el flujo se presenta estable de manera adecuada. Terminando con un patrón de izquierda a centro del canal.



Figura. 24. Patrones de flujo predominantes en la rápida 2. Alternativa 3-3

El flujo en la entrada del cuenco disipador se presenta uniforme al igual que en el canal de restitución, observando que ya no existe turbulencia, ni socavación como en las alternativas anteriores.

Al registrar las velocidades en las secciones principales se puede observar que estas se distribuyen de mejor manera, y que notablemente se han disminuido. Tabla 29

Se observa una mejora también en los calados registrados, siendo menores los del margen derecho y compensando con calados mayores en el izquierdo. Tabla 30



Tabla 29. Registro de velocidades medidas en experimentación. Alternativa 3-3

ABSCISA	VELOCIDAD (m/s)					
	MODELO			PROTOTIPO		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
4,1		0,58			2,59	
5,3	1,56	1,57	1,56	6,97	7	6,97
6,9	1,66	1,89	2,17	7,41	8,47	9,72
7,3	1,78	1,92	2,1	7,94	8,61	9,41
8,5	1,87	1,99	2,29	8,35	8,92	10,23

Tabla 30. Registro de calados en modelo y prototipo debidos a la implementación de la alternativa 3-3

ABSCISA	CALADOS					
	MODELO (cm)			PROTOTIPO (m)		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
4,1	6,39	6,65	6,40	1,28	1,33	1,28
4,5	3,81	4,01	4,00	0,76	0,80	0,80
4,9	3,08	2,57	2,36	0,62	0,51	0,47
5,3	2,90	2,56	2,07	0,58	0,51	0,41
5,7	2,00	2,43	2,77	0,40	0,49	0,55
6,1	1,85	2,31	3,10	0,37	0,46	0,62
6,5	1,45	2,37	3,60	0,29	0,47	0,72
6,9	1,91	2,50	2,82	0,38	0,50	0,56
7,1	1,89	2,46	2,61	0,38	0,49	0,52
7,3	1,70	2,43	2,77	0,34	0,49	0,55
7,7	2,60	1,94	2,51	0,52	0,39	0,50
8,1	2,55	1,90	2,47	0,51	0,38	0,49
8,5	1,66	1,92	2,62	0,33	0,38	0,52

Alternativa 3-4

Con el propósito de obtener un funcionamiento del cuenco dissipador adecuado se ha planteado una prolongación mayor de la zona del peralte, como se indica en la Figura 34

Al realizar los ensayos para esta alternativa, al ver que para caudales mayores se obtenía excelentes resultados, se procede a probar los siguientes caudales de interés siendo desfavorable la estructura para caudales bajos, presentando una acumulación de flujo en la margen izquierda, por lo que se invalida esta alternativa.

- Con un caudal de $12.52 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondiente a un período de retorno de 25 años en prototipo, se observa que el flujo se dirige a la margen izquierda por la variación geométrica que se ha hecho, con velocidades no suficientes para vencer las fuerzas gravitacionales y alcanzar la margen derecha. Figura 34
Además, se observa que el cuenco dissipador no funciona correctamente, presentando socavación en la margen izquierda del canal de restitución. Figura 35



Figura. 25. Comportamiento del flujo debido a 12.52 m³/s. Alternativa 3-4



Figura. 26 Socavación en el canal de restitución. Caudal 12.52 m³/s. Alternativa 3-4

Se han registrado velocidades y calados en las abscisas de control, descritos en las Tablas 31 y 32 respectivamente.

Tabla 31 Registro de velocidades medidas en laboratorio para caudal de 12.52 m³/s. Alternativa 3-4

ABSCISA	VELOCIDAD (m/s)					
	MODELO			PROTOTIPO		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
4,10		0,31			1,39	
5,30	1,55	1,33	1,32	6,95	5,94	5,91
6,90	1,29	1,54	1,46	5,78	6,89	6,54
7,30	1,77	1,86	0,00	7,92	8,33	0,00
8,50	1,79	1,58	0,00	8,01	7,09	0,00

- Se presenta un comportamiento similar para los caudales de 50 y 100 años de período de retorno. Se adjunta un registro fotográfico.
- Para el caudal máximo de diseño de 30.95 m/s (prototipo), se ha podido observar que el flujo es prácticamente uniforme hacia el cuenco, lo que ocasiona su adecuado funcionamiento; se presenta un vórtice pequeño en dirección antihorario en la margen izquierda del cuenco. Figura 36
- No se presenta socavación en el canal de restitución.

Tabla 32. Registro de calados en modelo y prototipo debidos a caudal de 12.52 m³/s. Alternativa 3-4

ABSCISA	CALADOS					
	MODELO (cm)			PROTOTIPO (m)		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
2,9	5,47	5,95	5,90	1,09	1,19	1,18
3,3	5,00	5,06	5,21	1,00	1,01	1,04
3,7	4,34	4,47	4,77	0,87	0,89	0,95
4,1	3,90	3,87	3,92	0,78	0,77	0,78
4,5	1,81	1,79	1,95	0,36	0,36	0,39
4,9	1,42	1,23	0,99	0,28	0,25	0,20
5,3	1,30	1,35	1,00	0,26	0,27	0,20
5,7	1,00	1,41	1,36	0,20	0,28	0,27
6,1	1,06	1,37	1,12	0,21	0,27	0,22
6,5	1,12	1,58	0,99	0,22	0,32	0,20
6,9	1,78	1,40	0,52	0,36	0,28	0,10
7,3	2,03	1,36	0,2	0,41	0,27	0,04
7,7	2,63	1,22	0,0	0,53	0,24	0,00
8,1	2,55	0,93	0,0	0,51	0,19	0,00
8,5	2,18	1,00	0,0	0,44	0,20	0,00



Figura. 27 Vórtice formado en el cuenco dissipador debido a caudal máximo de diseño, 30.95 m³/s, Alternativa 3-4

- Las velocidades registradas se correlacionan con la Alternativa 3-3 , incrementándose solamente en 0.2 m/s en la abscisa 8.5 del modelo en la margen derecha.

Tabla 33 Registro de velocidades medidas en laboratorio para Qmax. Alternativa 3-4

ABSCISA	VELOCIDAD (m/s)					
	MODELO			PROTOTIPO		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
5,3	1,794	1,837	1,721	8,022	8,215	7,698
6,9	1,900	1,842	2,083	8,497	8,239	9,317
7,3	1,853	1,900	2,179	8,287	8,497	9,745
8,5	1,864	1,931	2,402	8,334	8,635	10,741



Se observa además una mejor distribución de los calados en comparación con la Alternativa 3-4.

Tabla 34. Registro de calados en modelo y prototipo para Qmax. Alternativa 3-4

ABSCISA	CALADOS					
	MODELO (cm)			PROTOTIPO (m)		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
3,3	8,000	8,140	8,410	1,600	1,628	1,682
3,7	7,570	7,630	7,770	1,514	1,526	1,554
4,1	6,480	6,500	6,630	1,296	1,300	1,326
4,5	4,010	3,950	4,070	0,802	0,790	0,814
4,9	3,300	2,810	2,450	0,660	0,562	0,490
5,3	2,900	2,930	2,210	0,580	0,586	0,442
5,7	1,840	2,500	2,830	0,368	0,500	0,566
6,1	1,780	2,300	3,110	0,356	0,460	0,622
6,5	1,410	1,900	3,740	0,282	0,380	0,748
6,9	1,770	2,570	3,040	0,354	0,514	0,608
7,3	1,640	2,310	2,160	0,328	0,462	0,432
7,7	2,550	2,060	2,470	0,510	0,412	0,494
8,1	2,500	1,970	2,470	0,500	0,394	0,494
8,5	2,110	2,150	2,370	0,422	0,430	0,474

En el canal de restitución se presentan velocidades altas a comparación de las de la Alternativa 3-3, en el medio del eje del canal exclusivamente.

Tabla 35. Registro de velocidades en canal de restitución. Qmax. Alternativa 3-4

ZONA	VELOCIDAD(m/s)	
	MODELO	PROTOTIPO
	Centro	Centro
Medio	0.512	2.291
Final	0.423	1.893

Alternativa 3-5

Al no obtener resultados deseados con todas las alternativas anteriores se ha optado por implementar una alternativa que constituya una solución para todas las solicitudes de la estructura, esta nueva alternativa se basa en la construcción de vanos curvos múltiples con los cuales la sobre elevación y el patrón de perturbación pueden reducirse mediante vanos concéntricos que dividen el ancho del canal en una serie de canales curvos angostos, como se ha indicado en la sección de metodología.

Se han construido 3 vanos concéntricos en la rápida curva, manteniendo la transición del peralte de la alternativa 10 y la contrapendiente del 1% en la rápida 1. Estos vanos serán construidos con 1 cm de alto y de 2 cm de anchos (modelo), desde la abscisa 4.9 hasta la 8.7, en función de los patrones de flujo y calados obtenidos con anterioridad.



Figura. 28 Construcción vanos concéntricos. Alternativa 3-5 (PROMAS, 2016)



Figura. 29. Implementación de la Alternativa 3-5

Para esta alternativa se evaluaron también los 4 caudales mencionados en la alternativa anterior, dando como resultado:

- Para el caudal de $12.52 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondiente a un periodo de retorno de 25 años, se puede observar una distribución adecuada en cada vano, lo que lleva un flujo uniforme hasta el cuenco disipador, generando un correcto funcionamiento del mismo; además que observa un trabajo independiente de cada vano concéntrico por lo que se espera un incremento de velocidad con respecto a las anteriores.

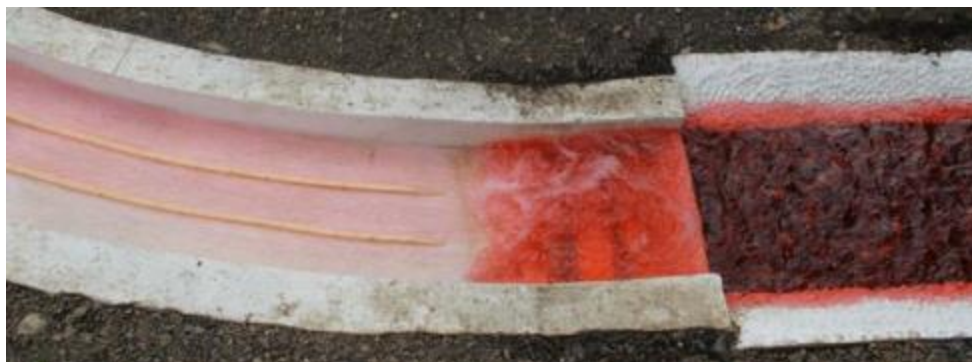


Figura. 30 Comportamiento del flujo en la rápida 2 para el caudal correspondiente a 25 años de período de retorno Alternativa 3-5

No se presenta socavación en el canal de restitución. Figura 40

Tabla 36 Velocidades en canal de restitución. Q=12.52 m3/s Alternativa 3-5

ZONA	VELOCIDAD(m/s)	
	MODELO PROTOTIPO	
	Centro	Centro
Medio	0.29	1.298
Final	0.319	1.427



Figura. 31 Canal de restitución sin socavación. Q: 12.52 m3/s Alternativa 3-5

Se verifican además las velocidades en el cuenco disipador.

Tabla 37. Velocidad en el cuenco disipador. Alternativa 3-5

ZONA	VELOCIDAD(m/s)	
	MODELO PROTOTIPO	
	Centro	Centro
Umbral de salida	0.498	2.227

Además, de las velocidades en las secciones de interés a lo largo de la curva, tomados en el centro de cada vano; presentándose mayores con respecto a la alternativa 3-4

Tabla 38 Registro de velocidades para caudal de 12.52m3/s. Alternativa 3-5

ABSCISA	VELOCIDAD (m/s)					
	MODELO			PROTOTIPO		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
4,1		0,2815			1,259	
5,3	1,553	1,687	1,772	6,947	7,543	7,924
6,9	1,986	2,156	1,675	8,881	9,644	7,491
7,3	2,068	2,110	2,054	9,249	9,438	9,185
8,5	2,129	2,276	2,237	9,521	10,178	10,003

La distribución de calados es homogénea y adecuada, como se aprecia en la Tabla 39 a continuación.

Tabla 39 Registro de calados en modelo y prototipo debidos a caudal de 12.52 m³/s Alternativa 3-5

ABSCISA	CALADOS					
	MODELO (cm)			PROTOTIPO (m)		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
4,1	3,50	3,51	3,52	0,70	0,70	0,70
4,5	1,74	1,90	1,89	0,35	0,38	0,38
4,9	1,42	1,20	1,14	0,28	0,24	0,23
5,3	1,24	1,50	1,12	0,25	0,30	0,22
5,7	1,10	1,09	0,89	0,22	0,22	0,18
6,1	1,28	1,00	1,05	0,26	0,20	0,21
6,5	1,12	1,40	1,22	0,22	0,28	0,24
6,9	1,01	1,05	0,98	0,20	0,21	0,20
7,3	1,30	1,30	1,20	0,26	0,26	0,24
7,7	1,10	1,04	1,00	0,22	0,21	0,20
8,1	1,12	1,28	1,10	0,22	0,26	0,22
8,5	1,10	1,00	0,98	0,22	0,20	0,20

- Para el caudal de 13.72 m/s, correspondiente a un período de retorno de 50 años, se puede observar que al igual que el ensayo anterior los resultados se presentan adecuados.



Figura. 32 Óptimo funcionamiento del cuenco disipador, no se presenta socavación en canal de restitución. Q=13.72 m³/s Alternativa 3-5

Se han registrado las velocidades a la salida del cuenco disipador, presentando una mejor disipación de energía. Tabla 40

Tabla 40. Velocidades a la salida del cuenco disipador. Q=13.72 m³/s Alternativa 3-5

ZONA	VELOCIDAD(m/s)	
	MODELO	PROTOTIPO
	Centro	Centro
Umbral de salida	0.375	1.677

Adicionalmente se han registrado las velocidades en el canal de restitución, que como se ha indicado sus máximos valores no producen socavación. Tabla 41

Tabla 41. Velocidades en el canal de restitución debidas a Q=13.72 m³/s Alternativa 3-5

ZONA	VELOCIDAD(m/s)	
	MODELO	PROTOTIPO
	Centro	Centro
Medio	0.285	1.275
Final	0.272	1.218

Se registran las velocidades a lo largo de la rápida 2, observando velocidades mayores que el ensayo anterior (Alternativa 3-4) Tabla 42

Tabla 42 Velocidades registradas en rápida 2. Alternativa 3-5

ABSCISA	VELOCIDAD (m/s)					
	MODELO			PROTOTIPO		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
5,3	1,496	1,645	1,415	6,688	7,359	6,327
6,9	1,895	2,096	1,710	8,474	9,375	7,646
7,3	1,941	2,124	2,039	8,680	9,500	9,121
8,5	2,280	2,310	2,183	10,197	10,331	9,765

Se evidencian para este caudal calados similares en cada vano, es decir una adecuada distribución del flujo a lo largo de la rápida 2. Tabla 43

Tabla 43 Registro de calados en modelo transformados a prototipo para la Alternativa 3-5

ABSCISA	CALADOS					
	MODELO (cm)			PROTOTIPO (m)		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
4,1	3,72	3,9	4,08	0,74	0,78	0,82
4,5	1,82	1,89	1,96	0,36	0,38	0,39
4,9	1,50	1,42	1,20	0,30	0,28	0,24
5,3	1,26	1,7	1,38	0,25	0,34	0,28
5,7	1,28	1,04	0,85	0,25	0,21	0,17
6,1	1,33	1,09	1,04	0,26	0,22	0,21
6,5	1,12	1,6	1,13	0,22	0,32	0,23
6,9	0,94	1,39	1,06	0,18	0,28	0,21
7,3	1,25	1,35	1,30	0,25	0,27	0,26
7,7	1,30	1,00	0,92	0,26	0,20	0,18
8,1	1,19	1,30	1,00	0,24	0,26	0,20
8,5	1,19	1,13	1,10	0,24	0,23	0,22

Para el caudal de 14.94 m³/s correspondiente a 100 años de período de retorno, se evidencian resultados parecidos a los dos ensayos anteriores, distribución

uniforme del flujo, calados y velocidades que guardan correspondencia. Un aspecto importante es la disminución de la velocidad a la salida del cuenco dissipador con respecto a los ensayos anteriores, esto se debe a que el flujo se distribuye de mejor manera, lo que permite un desempeño del cuenco dissipador más óptimo. Figura 42



Figura. 33 Comportamiento adecuado del flujo en cuenco dissipador, canal de restitución sin socavación. Q (100 años) =14.94 m³/s Alternativa 3-5

Tabla 44 Velocidades en el cuenco dissipador para Q (100 años) =14.94 m³/s Alternativa 3-5

ZONA	VELOCIDAD(m/s)	
	MODELO PROTOTIPO	
	Centro	Centro
Umbral de Salida	0.144	0.646

Con el mejor desempeño del cuenco dissipador al canal de restitución le corresponden velocidades más bajas (Tabla 45) lo que provoca que no haya socavación al igual que en los ensayos anteriores. Figura 42

Tabla 45. Velocidades registradas en el canal de restitución para Q(100 años) =14.94 m³/s Alternativa 3-5

ZONA	VELOCIDAD(m/s)	
	MODELO PROTOTIPO	
	Centro	Centro
Medio	0.312	1.393
Final	0.291	1.299

Se registran las velocidades y calados a lo largo de la estructura, descritos en las Tablas 46 y 47 respectivamente

Tabla 46 Registro de velocidades medidas en laboratorio debidas a Q (100 años) =14.94 m³/s Alternativa 3-5

ABSCISA	VELOCIDAD (m/s)					
	MODELO			PROTOTIPO		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
4,1		0,31			1,386	
5,3	1,669	1,766	1,597	7,465	7,899	7,142
6,9	2,010	1,991	1,941	8,991	8,903	8,680
7,3	2,015	2,115	1,783	9,013	9,459	7,973
8,5	2,152	2,192	2,228	9,623	9,805	9,964

Los calados registrados en este ensayo son menores que el caso anterior.

Tabla 47 Registro de calados debidos a Q (100 años) =14.94 m³/s Alternativa 3-5

ABSCISA	MODELO (cm)			PROTOTIPO (m)		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
4,1	4,16	4,33	4,39	0,832	0,866	0,878
4,5	2,26	2,3	2,64	0,452	0,46	0,528
4,9	1,82	1,55	1,45	0,364	0,31	0,29
5,3	1,6	2,16	1,85	0,32	0,432	0,37
5,7	1,27	1,3	1,08	0,254	0,26	0,216
6,1	1,4	1,17	1,17	0,28	0,234	0,234
6,5	1,33	1,63	1,26	0,266	0,326	0,252
6,9	1,24	1,39	0,97	0,248	0,278	0,194
7,3	1,19	1,36	1,24	0,238	0,272	0,248
7,7	1,74	1,47	1,11	0,348	0,294	0,222
8,1	1,57	1,32	1,25	0,314	0,264	0,25
8,5	1,32	1,5	1,235	0,264	0,3	0,247

- Para el caudal máximo de diseño evaluado en las alternativas anteriores, de 30.95 m³/s, se puede confirmar el óptimo adecuado de esta construcción, verificando que los vanos concéntricos funcionan adecuadamente debido a que distribuyen el flujo equitativamente para cada vano, observando en el vano derecho un pequeño incremento del calado debido a la fuerza centrífuga, así como un pequeño vórtice anti horario al finalizar la curva.



Figura. 34 Comportamiento de flujo para Qmax de diseño Alternativa 3-5



Figura. 35 Canal de restitución sin socavación debido a Qmax de diseño Alternativa 3-5

Como se estableció en el diseño, las velocidades en el umbral de salida del cuenco dissipador están en el orden de 2.21 m/s en prototipo, lo cual es alto pero no produce socavación. Tabla 48

Las velocidades a lo largo de la rápida en curva son mayores que para los tres ensayos anteriores, y mayores que para todos los ensayos de la alternativa 10, sin embargo, el incremento representa un porcentaje pequeño de la velocidad total, el mayor incremento se presenta en la margen derecha. Tabla 49



Tabla 48 Velocidades a la salida del cuenco disipador para Qmax de diseño Alternativa 3-5

VELOCIDAD(m/s)		
ZONA	MODELO PROTOTIPO	
	Centro	Centro
Umbral de Salida	0.495	2.215

Tabla 49 Registro de velocidades a lo largo de la estructura para caudal de 30.95 m³/s Alternativa 3-5

VELOCIDAD (m/s)						
ABSCISA	MODELO			PROTOTIPO		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
4,1		0,612			2,737	
5,3	1,986	1,915	1,816	8,881	8,566	8,119
6,9	2,143	2,120	2,170	9,582	9,479	9,704
7,3	2,241	2,228	1,981	10,023	9,964	8,859
8,5	2,798	2,482	2,466	12,513	11,100	11,029

Se observa que la distribución de calados a lo largo de la rápida en curva, es muy adecuada, se presentan calados similares en los 3 vanos. Tabla 50

Tabla 50 Registro de calados en modelo y prototipo debidos a caudal máximo de diseño Alternativa 3-5

CALADOS						
ABSCISA	MODELO (cm)			PROTOTIPO (m)		
	Izquierda	Centro	Derecha	Izquierda	Centro	Derecha
4,1	5,9	5,31	6,43	1,18	1,062	1,286
4,5	3,3	3,8	3,6	0,66	0,76	0,72
4,9	3,1	2,52	2,24	0,62	0,504	0,448
5,3	2,75	2,74	2,6	0,55	0,548	0,52
5,7	2,14	2,8	2,82	0,428	0,56	0,564
6,1	2	2,7	2,64	0,4	0,54	0,528
6,5	1,89	1,92	2,52	0,378	0,384	0,504
6,9	1,51	2,11	2,95	0,302	0,422	0,59
7,3	1,83	2,15	2,6	0,366	0,43	0,52
7,7	1,6	1,85	2,69	0,32	0,37	0,538
8,1	1,8	2,27	2,43	0,36	0,454	0,486
8,5	1,52	2,25	2,97	0,304	0,45	0,594

Al existir una distribución uniforme del flujo en la rápida en curva, este ingresa al cuenco de una forma uniforme, lo que permite una correcta disipación de energía en el cuenco, y por lo tanto el flujo ingresa al canal de restitución con velocidades bajas, de esta manera no se registra erosión en este canal. Tabla 51

Tabla 51 Velocidades medidas en canal de restitución para caudal máximo de diseño. Alternativa 3-5

ZONA	VELOCIDAD(m/s)	
	MODELO PROTOTIPO	
	Centro	Centro
Medio	0.372	1.662
Final	0.381	1.702

Alternativa 3-6

Al ser un estudio experimental y a pesar de que la alternativa anterior ha resultado adecuada y óptima en todos los aspectos, se ha decidido implementar un diseño empírico indicado como medida para flujos supercríticos en canales curvos en la sección de metodología.

Se indican los parámetros necesarios para el cálculo en la siguiente Tabla 9 en la sección de metodología.

Con la formulación indicada se han obtenido las dimensiones para implantar los obstáculos diagonales.

Tabla 52 Geometría definida para obstáculos diagonales Alternativa 3-6

Característica	Símbolo	Valor	Unidad
Obstáculo-Inicio Curva	L_{US}	0,38	m
Fin Curva-Obstáculo	L_{IS}	0,36	m
Borde-Obstáculo		0,08	m
Longitud de Obstáculo		0,68	m
Distancia entre Obstáculos		0,05	m

Al ser experimental no se ha indicado dimensionamiento tanto de ancho como de altura de cada obstáculo por lo que ha sido construido con dimensiones impuestas en base al área disponible, por lo que se usarán obstáculos de madera de 1cm de ancho y alto.

Además, al ser implementadas sobre los vanos concéntricos se ha optado por dimensionarlos de acuerdo al ancho de cada vano.

Se indican en las fotografías la construcción tanto en la rápida 1 como en la rápida curva.



Figura. 36 Implementación en rápida 1 y rápida 2 de Alternativa 3-6

Los resultados obtenidos en la experimentación de la Alternativa 3-6, han sido catalogados como ineficientes por simple observación, ya que el flujo presenta claras y predominantes líneas de corriente desde la rápida 1, y los golpes del flujo en la parte final de la curva generan elevaciones exageradas del calado en cada obstáculo, esto se genera puesto que la longitud de la curva del diseño original no es suficiente para el cálculo pero se procedió a implementar el diseño de manera experimental.

Además, se presenta resalto hidráulico luego de cada sección de obstáculos, fenómeno indeseable para el caso.

Se resalta también la presencia de socavación en la margen derecha del canal de restitución, debida a la dirección de flujo que indican los obstáculos.



Figura. 37 Líneas de corriente en rápida 1, resalto hidráulico en rápida dos, funcionamiento no adecuado del cuenco disipador



Figura. 38 Socavación en canal de restitución Alternativa 3-6

Al concluir la experimentación.

De acuerdo a los resultados presentados en las 12 alternativas, se define como óptimo el diseño 3-5, al presentar el mejor funcionamiento de la estructura, tanto en la formación del resalto hidráulico al pie del vertedero tipo Creager, las velocidades reducidas al final de la rápida 1, los calados similares en las márgenes de la rápida en curva, y las velocidades reducidas al inicio del cuenco disipador lo que provoca un adecuado funcionamiento del mismo así como evita la socavación del canal de restitución.



3. CONCLUSIONES.

Respetando la secuencia indicada en la experimentación se concluye:

- Se ha optado por la modelación física como una herramienta de optimización de diseño, ya que esta permite analizar el desempeño de la estructura diseñada en condiciones más reales de utilización, y de esta manera establecer procesos complejos que no se evidencian con las ecuaciones de diseño.
- Se ha construido un modelo hidráulico a escala reducida 1/20 no distorsionada, para representar los principales procesos de flujo de las obras contempladas en el diseño original del vertedero de excesos tipo Creager para la presa Mocache, de tal manera que permita analizar el comportamiento del flujo en el sistema, (vertedero de excesos, rápida en curva, disipador y canal de restitución).
- Se ha evaluado la capacidad de descarga del vertedero de excesos tipo Creager, se obtuvo un coeficiente de descarga promedio de 1.87
- El flujo de aproximación hacia la estructura de descarga presenta una distribución uniforme, con velocidades promedio de 0.24 m/s en modelo y 1.06 m/s en prototipo, para un caudal de descarga de aproximadamente 10.95 m³/s, lo cual corrobora la velocidad obtenida de 0.94 m/s
- Las velocidades medias al pie de la estructura de descarga alcanzan un promedio de 4.57 m/s para un caudal máximo de descarga, lo que no provocó la formación de resalto hidráulico en diseño original.
- Se observó que el cuenco disipador no trabaja de manera adecuada debido a que el flujo solo ingresa por la margen derecha provocando una zona de recirculación, lo cual hace que el cuenco no disipe la energía y el agua provoque socavación en el lado derecho del canal de restitución, por lo que se recomienda estabilizar el flujo antes de entrar al cuenco disipador, es decir lograr que el flujo tenga una altura uniforme en toda la sección antes del ingreso al cuenco disipador.
- Con el objetivo de producir un resalto hidráulico en la primera rápida se plantearon varias alternativas hasta definir la alternativa que produce el resalto hidráulico más adecuado siendo esta una contrapendiente de 1 % (Alternativa 2-7) Con este diseño se redujo las velocidades al final de la primera rápida de 4.86m/s a 2.72 m/s en prototipo, mientras que los calados sufrieron un incremento considerable del 100% aproximadamente, con respecto al ensayo en modelo físico del diseño original. De tal manera que para los ensayos consiguientes se mantuvo la condición de la contrapendiente en la rápida 1.
- Al implementar la transición del peralte se obtienen resultados relativamente buenos para caudales altos, pero para caudales bajos el cuenco disipador no funciona adecuadamente lo cual produce una fuerte socavación en el canal de restitución
- Para los caudales Q100, Q50, Q25, en la Alternativa 3-4, el flujo tiende hacia la margen izquierda, y el cuenco no trabaja correctamente, lo que provoca socavación en el canal de restitución para estos caudales (bajos), por lo que este diseño se descarta debido a que solo trabaja para caudales altos, mientras que para los caudales bajos presenta problemas de socavación en el canal de restitución.



- En la Alternativa 3-6 al garantizar el correcto funcionamiento del cuenco disipador para caudales altos y bajos, se asegura que no existirá socavación en el canal de restitución, para todo el rango de caudales, y se logrará entregar el flujo al río con velocidades menores a 1.7m/s. Debido a que la estructura funciona correctamente este diseño se recomienda su construcción en prototipo.
- La pendiente transversal es una solución costosa desde el punto de vista de diseño y construcción, esta se justifica solo en estructuras importantes, en sitios donde es necesaria una deflexión angular grande con longitudes de desarrollo cortas, como es el caso del vertedero de la presa Mocache. Al igual que los vanos concéntricos la implementación es necesaria para garantizar el funcionamiento del vertedero para los caudales permanentes.



4. BIBLIOGRAFÍA

- Bibliografía Citada.

Castro, S. (2015). *Evaluación del comportamiento hidráulico de obras de captación mediante modelamiento hidrodinámico del flujo en 1- D Y 2 - D*. Universidad de Cuenca.

Chanson, H. (2002). *Hidráulica del flujo de canales abiertos*. (J. Saldarriaga, Ed.) (McGRAW-HILL). Bogotá, Colombia.

Chow, V. Te. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. (M. Suárez, Ed.). Santafé de Bogotá, Colombia.

Knapp, R. T. (1951). segundo artículo simposio "High-velocity flow in open channels." "*Design of Channel Curves for Supercritical Flow*," 116(American Society of Civil Engineers), 296–325.

Novak, P., Moffat, A., & Nalluri, C. (2001). *Estructuras Hidráulicas* (2a Edición). McGRAW-HILL INTERAMERICANA S.A.

PROMAS. (2014a). *Informe Hidráulico - Presa Mocache, Diseño definitivo*.

PROMAS. (2014b). *Informe Hidrológico - Presa Mocache, Diseño definitivo*. Cuenca.

Shames, I. (1982). *Mechanics of fluids* (Vol 2). New York: McGRAW-HILL INTERAMERICANA S.A.

Sotelo, G. (n.d.). Apuntes de Hidráulica II. In F. de I. Universidad Nacional Autónoma de México (Ed.), *Hidráulica II*.

Tinoco, V. (2011). *Determinación Experimental De Las Variables Asociadas Al Control De Flujo En Modelo Físico Para Los Caudales De Diseño En La Estructura De Compuerta De La Derivadora Cañar*. Universidad de Cuenca.

- Bibliografía de referencia.

Bacchueg, J. (2014). "Medidas para la corrección del patrón de ondas cruzadas en un diseño singular de rápida de eje curvo." In *XXVI Congreso Latino Americano de Hidráulica Santiago de Chile*. Santiago de Chile.

Ippen, A. (1936). "*An analytical and experimental study of high velocity flow in curved sections of openchannels*." California Institute of Technology, Pasadena.

Knapp, R. T. (1951). "Design of channel curves for supercritical flow." *ASCE*, 116, 296–325.

Mao, Y. (2006). "Case Study of an S-Shaped Spillway Using Physical and Numerical Models." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 132. No. 9, 892 . 898.

Reinauer, R., & Hager, W. H. (1997). "Supercritical Bend Flow." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 123, No. 3, 208–218.

Rocha, A. (1998). *Introducción a la Hidráulica Fluvial*. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima - Perú.

Solórzano, M., & Vázquez, S. (2013). *Estudio en modelo físico de escala reducida para los procesos de barrido hidráulico del proyecto de generación hidroeléctrica Minas – San Francisco*. Universidad de Cuenca.

Vásquez, J. (2003). Modelación Numérica en la Hidráulica. Retrieved from <http://www.oocities.org/hidropiura/ModelNum.pdf>