

# **SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA**

## **XIX CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA**

### **OPTIMIZACIÓN MURO SEPARADOR DE LA BOCATOMA CHACAYES MEDIANTE MODELACIÓN FÍSICA**

**RODRIGO CARRASCO H.<sup>1</sup>**

**JULIO PINEDA A.<sup>2</sup>**

**RODRIGO PONCE S.<sup>3</sup>**

#### **RESUMEN**

La empresa Pacific Hydro Chile, para su proyecto hidroeléctrico Chacayes en la cuenca del río Cachapoal, en conjunto con el Instituto Nacional de Hidráulica desarrolló un estudio en modelo hidráulico de la bocatoma de la central Chacayes, actualmente en construcción. El modelo construido en escala 1:40, permitió entre otros aspectos verificar el comportamiento de las compuertas de la barrera, verificar la eficiencia del canal desripiador, evaluar la incidencia de la altura de un muro separador entre la poza y el canal desripiador en los caudales de captación, optimizar el diseño de los enrocados de protección al pie de la barrera principal y estudiar el proceso de arrastre de sedimentos hacia la toma.

El presente trabajo se refiere a la modelación y ensayos realizados para verificar la incidencia del muro separador, entre la poza y el canal desripiador, propuesto en la ingeniería básica. Se analiza la distribución de caudales y velocidades de ingreso a cada uno de los 4 canales de entrada al desarenador y la eficiencia en las labores de limpieza del desripiador, para diferentes alturas de muro.

En la modelación se verificaron tres alternativas de altura de muro, concluyéndose que en el diseño final debe reducirse su altura, ya que de esta forma se obtiene una distribución más uniforme de caudales entre cada canal de entrada al desarenador y consecuentemente de sus velocidades; además de mejorar la eficiencia del desripiado.

---

<sup>1</sup>Ingeniero Civil, Jefe Proyectos Área Hidráulica-Fluvial, Instituto Nacional de Hidráulica - mail: [rcarrasco@inh.cl](mailto:rcarrasco@inh.cl)

<sup>2</sup>Ingeniero Civil, Gerente de Ingeniería, Pacific Hydro Chile – mail: [jpineda@pacifichydro.cl](mailto:jpineda@pacifichydro.cl)

<sup>3</sup>Ingeniero Civil, Ingeniero de Proyectos, Pacific Hydro Chile – mail: [rponce@pacifichydro.cl](mailto:rponce@pacifichydro.cl)

## 1. INTRODUCCIÓN

Pacific Hydro Chile S.A. (PHC) está desarrollando el potencial hidroeléctrico de la cuenca alta del río Cachapoal a través de la construcción de la Central Hidroeléctrica Chacayes, para cuyo funcionamiento será necesario construir dos bocatomas, la Bocatoma Chacayes sobre el río Cachapoal y la Bocatoma Cipreses sobre el río Cipreses.

Como parte del proyecto de ingeniería, PHC solicitó al Instituto Nacional de Hidráulica (INH) que mediante dos modelos físicos, estudie el comportamiento hidráulico y los procesos de mecánica fluvial que se desarrollarán en ambas bocatomas.

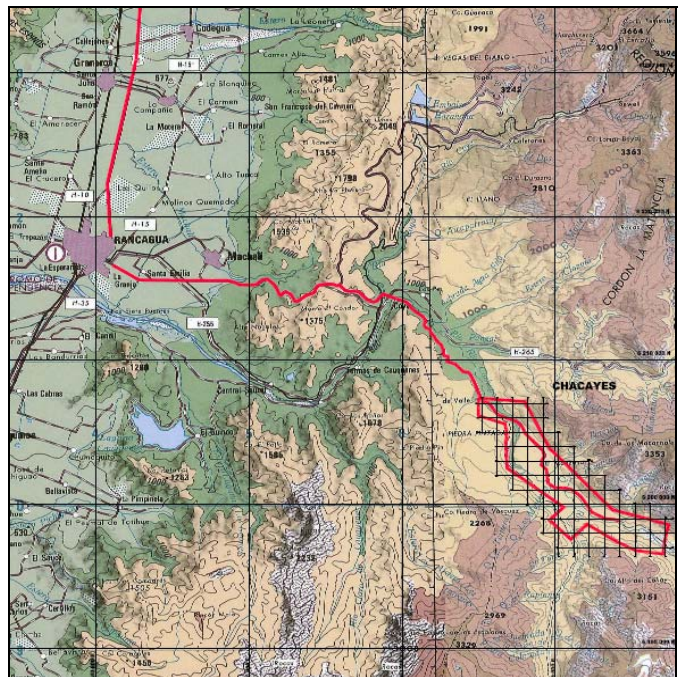
En este trabajo se abordan los estudios, resultados y conclusiones obtenidos de la modelación de la Bocatoma Chacayes, para verificar la incidencia de la altura de un muro separador de flujo, ubicado entre la poza y el canal desripador, frente a la obra de toma, propuesto en la ingeniería básica. Se analiza su influencia respecto de la distribución de caudales y velocidades de ingreso a cada uno de los 4 canales de entrada al desarenador y la incidencia del muro en las labores de limpieza del desripador. Se verifica y propone modificaciones respecto del diseño inicial que contribuyen a optimizar la captación de la bocatoma y la eficiencia en el control del ingreso de sedimentos a las obras de aducción de la Central Chacayes, y en la limpieza del canal desripador.

Se debe destacar que el estudio del modelo se basa en una ingeniería preliminar y que finalmente, dado el tipo de contrato (EPC: Engineering, Procurement and Construction), es el contratista que debe adoptar y hacer suyos las proposiciones de cambio en el diseño final.

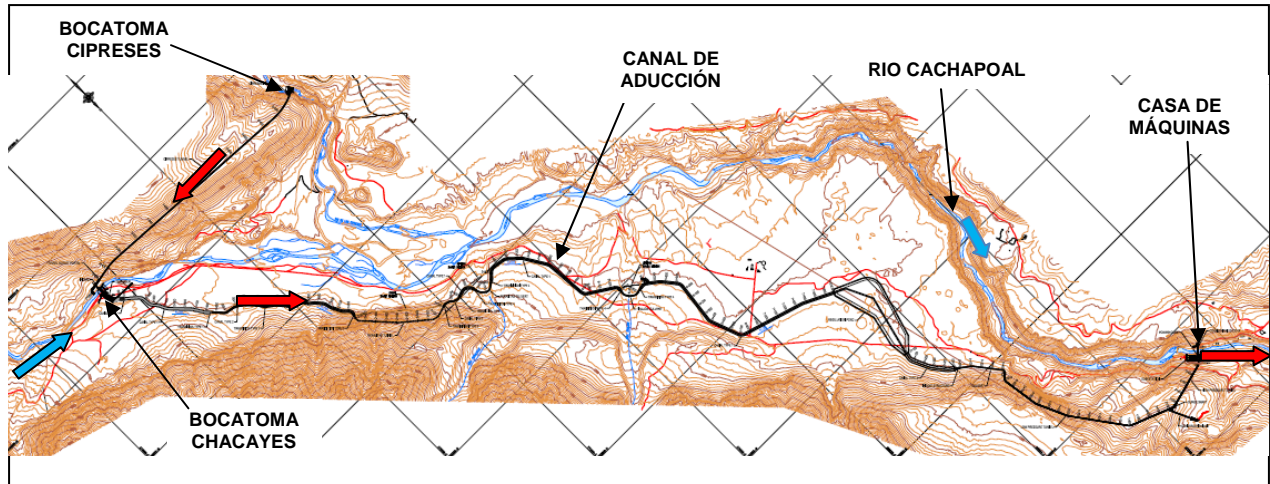
## 2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

La central Chacayes, es una central de pasada ubicada en el río Cachapoal, unos 20 km al interior de la localidad de Coya, en la VI Región (FIGURA 1). La potencia instalada de la central es de 110 MW, con un caudal de diseño de 72,5 m<sup>3</sup>/s, y una altura de caída neta de 160 m.

La central consta de dos bocatomas, una principal sobre el río Cachapoal y otra secundaria, sobre el río Cipreses, que desvía las aguas captadas mediante un túnel hacia la toma principal. El caudal de diseño de las bocatomas es de 72,5 m<sup>3</sup>/s y 20 m<sup>3</sup>/s respectivamente. La aducción de la central tiene un largo total de 7,5 km, con una combinación de canales y túneles, según las condiciones del terreno. La disposición general de la central puede verse en la FIGURA 2.



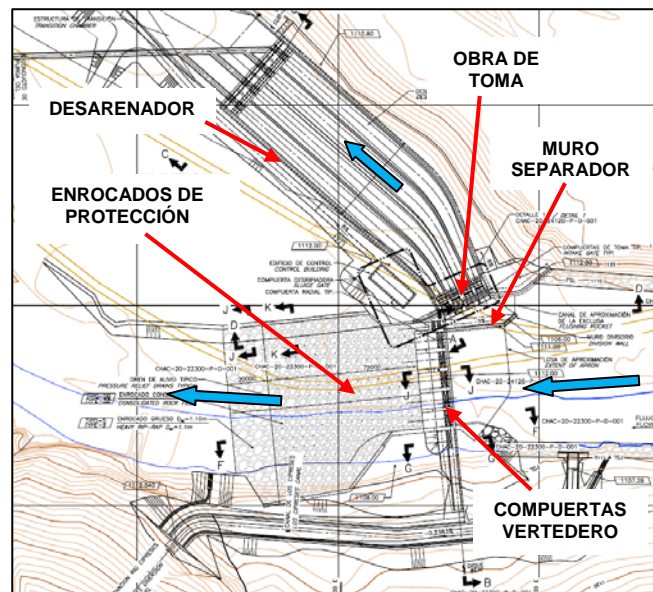
**FIGURA 1: UBICACIÓN PROYECTO CHACAYES**



**FIGURA 2: DISPOSICIÓN PROYECTO CHACAYES**

La bocatoma Chacayes es la principal obra de captación de la central Chacayes, está ubicada en el río Cachapoal, con una cota en la poza de 1.110,0 m.s.n.m. Comprende una barrera móvil de compuertas diseñada para un período de retorno de 1:500 ( $1.014 \text{ m}^3/\text{s}$ ), una obra de toma y un desarenador.

La barrera móvil es una estructura de hormigón 64 m de largo compuesta de cinco compuertas radiales evacuadoras de crecidas, de 8 m de ancho y 5.0 m de alto, y una compuerta desrapiadora con canal desrapiador de 4 m de ancho y 4 m de altura, ubicado en el costado derecho de la barrera. Entre la poza y el canal desrapiador se ha dispuesto de un muro divisorio. Aguas abajo de la barrera, se dispuso de una protección de enrocado consolidado (FIGURA 3).



**FIGURA 3: PLANTA GENERAL BOCATOMA CHACAYES**

La obra de toma, se ubica al costado derecho de la barrera. Es una toma lateral con un esviaje de  $20^\circ$ , respecto del eje de la barrera. Dispone de 4 vanos con sus respectivas compuertas y rejas, donde cada uno corresponde a cada una de las naves del desarenador, las que entregan sus aguas al canal de aducción Chacayes mediante un vertedero frontal de pared gruesa.

### 3. MODELO FÍSICO

En el modelo físico de esta bocatoma se realizaron principalmente los siguientes análisis:

- Diagnóstico del funcionamiento hidráulico de las obras de evacuación de crecidas y de toma.
- Control del ingreso de sedimentos a la obra de toma.
- Análisis de los fenómenos asociados al comportamiento mecánico fluvial de los cauces.

- d) Estudio de la socavación al pie de las obras proyectadas.
- e) Obras de protección del conjunto de obras de la bocatoma.
- f) Verificación de capacidad hidráulica en condiciones de crecida.
- g) Curvas de descarga de compuertas de vertedero y compuerta desripiadora.
- h) Verificación de incidencia de altura muro del separador entre la poza y canal desripiador, en la distribución de caudales de toma
- i) Verificación de incidencia de altura muro del separador entre la poza y canal desripiador, en la eficiencia del desripiador.

Como se señaló anteriormente en este trabajo se abordará la modelación de los puntos h) e i) del listado precedente.

### 3.1. ANÁLISIS DE SEMEJANZA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ESCALA DEL MODELO FÍSICO

Para determinar la escala del modelo hidráulico, se consideraron aspectos y/o restricciones propias de la modelación física de escurrimientos en superficie libre y arrastre de sedimentos, tales como: semejanza hidráulica, semejanza friccional, turbulencia del escurrimiento, condición de arrastre crítico, representación de la curva granulométrica, disponibilidad de capacidad de bombeo, otros factores (disponibilidad de espacio físico en laboratorio, facilidades para la experimentación, observación y medición de los ensayos y facilidad de la construcción, etc.)

Luego del análisis teórico correspondiente se concluye que las restricciones de escala establecen que  $\lambda_L \leq 54$  (Turbulencia) y  $\lambda_L \geq 36$  (Capacidad de Bombeo). La escala  $\lambda_L = 40$  satisface todas las restricciones y atiende a las sugerencias relacionadas con la disponibilidad de espacio, por lo que fue este valor el considerado para la construcción del modelo. Una vez establecida la escala geométrica y a partir de las relaciones que se desprenden del análisis de semejanza, se determinaron las escalas de las demás variables fundamentales.

Escala de	Unidad	Simbología	Relación	Valor
Longitud	[m]	$\lambda_L$	-	40
Tiempo	[s]	$\lambda_T$	$\lambda_T = \lambda_L^{1/2}$	6.324555
Velocidad	[m/s]	$\lambda_V$	$\lambda_V = \lambda_L^{1/2}$	6.324555
Superficie	[m <sup>2</sup> ]	$\lambda_S$	$\lambda_S = \lambda_L^2$	1600
Caudal	[m <sup>3</sup> /s]	$\lambda_Q$	$\lambda_Q = \lambda_L^{5/2}$	10119.29
Coefficiente de Manning	[m <sup>1/3</sup> /s]	$\lambda_n$	$\lambda_n = \lambda_L^{1/6}$	1.849311
N° Reynolds	[ ]	$\lambda_{Re}$	$\lambda_{Re} = \lambda_L^{3/2}$	252.9822

**TABLA 1: FACTORES DE ESCALA**

De esta forma, se pueden calcular con exactitud los valores de las variables involucradas en el análisis de semejanza:

- El acrílico (n = 0,009), material en el que fueron construidas las obras a escala, representa un material cuyo coeficiente de Manning equivalente es  $n \approx 0.017$ , valor adecuado para un hormigón como el que se utilizará en la realidad para la construcción de las obras.
- En el modelo, los valores de los adimensionales Re y Re\* fueron del orden de 40.000 y 150 respectivamente, asegurando las condiciones de turbulencia y arrastre crítico.

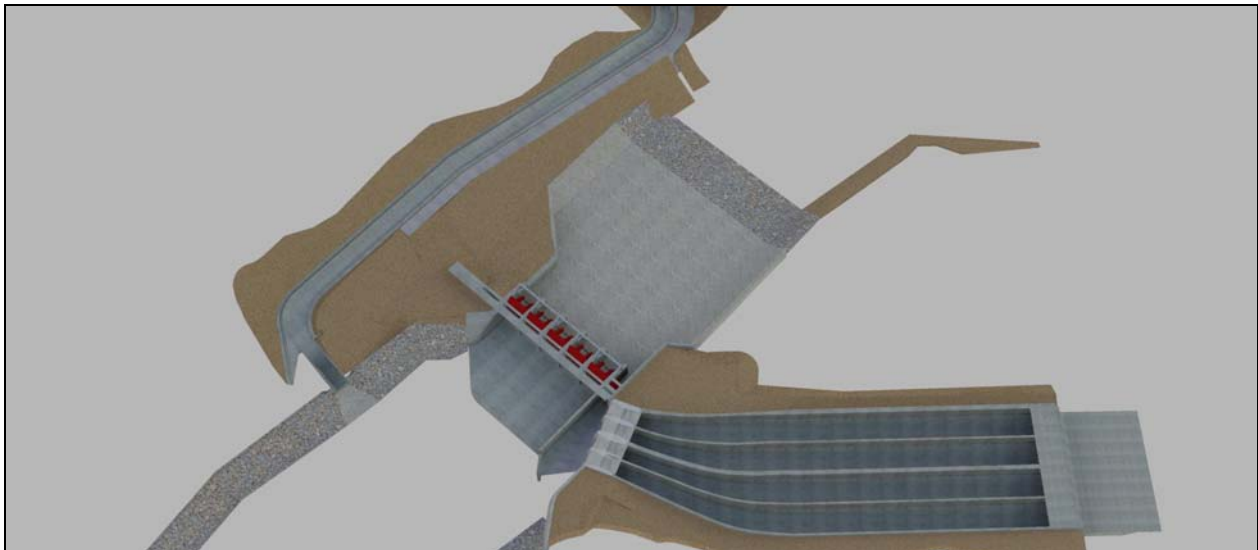
- Según la escala adoptada y considerando para el material fluvial del modelo un tamaño mínimo de grano de 0,1 mm, se pudo representar un 95,5% de la curva granulométrica.
- El caudal máximo de crecida en prototipo ( $Q = 1.176 \text{ m}^3/\text{s}$ ) quedó representado en el modelo por un caudal de aproximadamente 116 lt/s, valor inferior a la capacidad máxima de bombeo del laboratorio.

### 3.2. MODELO FÍSICO REDUCIDO

El modelo a escala reducida, 1:40, es de aproximadamente 24 m de longitud y 4,5 m de ancho, representando en lecho móvil un total de 550 y 180 m de largo y ancho del cauce respectivamente. El tramo de cauce en lecho móvil es representado mediante 15 perfiles transversales entre los cuales se dispone el material fluvial de modelo, el cual es rasado para una adecuada representación de la topografía del terreno.

En la ribera izquierda del río, aproximadamente 50 m aguas arriba de la barrera de la bocatoma, se contempla la entrega de las aguas captadas por la bocatoma Cipreses que son conducidas hasta la cuenca del río Cachapoal mediante un túnel de aproximadamente 3 km de largo.

Una vista general de la obra pueden verse en la siguiente fotografía obtenida de la modelación 3D. Esta modelación fue realizada como una herramienta de apoyo tanto para la interpretación de los planos en la etapa de conceptualización y construcción del modelo físico como para la presentación de los resultados en las etapas de explotación del modelo.



**FIGURA 4: MODELACIÓN 3D BOCATOMA CHACAYES**

### 3.3. CALIBRACION DEL MODELO

Con el lecho modelado se realizó la calibración hidráulica y sedimentológica para distintos gastos. La modelación hidráulica consideró verificaciones de sus ejes hidráulicos. Con esta calibración se garantiza la semejanza del resto de las variables del escurrimiento, tales como la distribución de velocidades, las velocidades de frotamiento en los granos, las presiones hidrostáticas, los cambios de dirección, la turbulencia, las ondas superficiales y las pérdidas de carga singulares, etc.

La calibración sedimentológica, basada en los estudios de sedimento realizados in situ, permitió simular en el modelo a escala el gasto sólido del cauce ante diferentes condiciones de crecida. Mediante pruebas iterativas con diferentes tasas de transporte sólido, se obtuvo un comportamiento en equilibrio tanto de los sedimentos que circulan por el cauce como de la morfología del lecho. El aporte de gasto sólido se simuló en el modelo con un equipo especial que entregó el material de arrastre al escurrimiento. La curva granulométrica del lecho y del sedimento transportado se construyó en la misma escala geométrica del modelo.



**FIGURA 5: MODELO FÍSICO BOCATOMA CHACAYES**

#### **4. DIAGNÓSTICO DEL PROYECTO ORIGINAL**

##### **4.1. CONDICIÓN A VERIFICAR**

El motivo principal de este trabajo tiene relación con el comportamiento esperado del muro que separa la barrera principal de la bocatoma con la zona de captación propiamente tal. La cota de diseño para el coronamiento de este muro es 1111.00 m.s.n.m. (FIGURA 6).

Ensayos de calibración determinaron que la presencia del muro afecta las líneas de flujo que ingresan a la zona de captación, ya que éstas se ven obligadas a curvarse bruscamente para ingresar a través del umbral de toma, como se aprecia en la FIGURA 7. Este fenómeno produce pérdidas de energía mayores a medida que el flujo va alcanzando la entrada de cada nave desarenadora.



**FIGURA 6: DISPOSICIÓN MURO SEPARADOR**



**FIGURA 7: DISTRIBUCIÓN LINEAS DE FLUJO EN LA TOMA**

Dicho efecto, podría afectar las velocidades y caudales de entrada en cada nave desarenadora, y podría incidir directamente sobre su eficiencia de desarenación. Además, se reafirma la necesidad de verificación experimental de la hipótesis de que el caudal de diseño de la toma se reparte equitativamente entre las 4 naves desarenadoras. Además de lo anterior, es posible que éste afecte la eficiencia del canal desripiador, lo que también será analizado en los ensayos.

## **4.2. VELOCIDADES DE DISEÑO EN EL DESARENADOR**

Del cálculo realizado por el proyectista, a partir del modelo HEC-RAS, se obtienen las siguientes velocidades para el eje hidráulico teórico en el desarenador:

<b>Ubicación Punto</b>	<b>Distancia [m]</b>	<b>Velocidad [m/s]</b>
Sección inicial curva transición	54,0	1,07
Sección media curva transición	87,0	0,59
Inicio desarenador	122,5	0,44
Fin desarenador	197,0	0,38

**TABLA 2: UBICACION DE PUNTOS DE CONTROL DESARENADOR**

De acuerdo con la bibliografía, Bouvard (1992), se acepta que las velocidades dentro del rango 0,38 y 1,07 m/s indicadas en la tabla anterior, constituyen valores válidos para efectos de la eficiencia de desarenación. Sin embargo, dado el diseño básico, lo anterior no asegura la distribución homogénea del caudal dentro de las naves desarenadoras, por tanto sus velocidades pueden variar en cada nave.

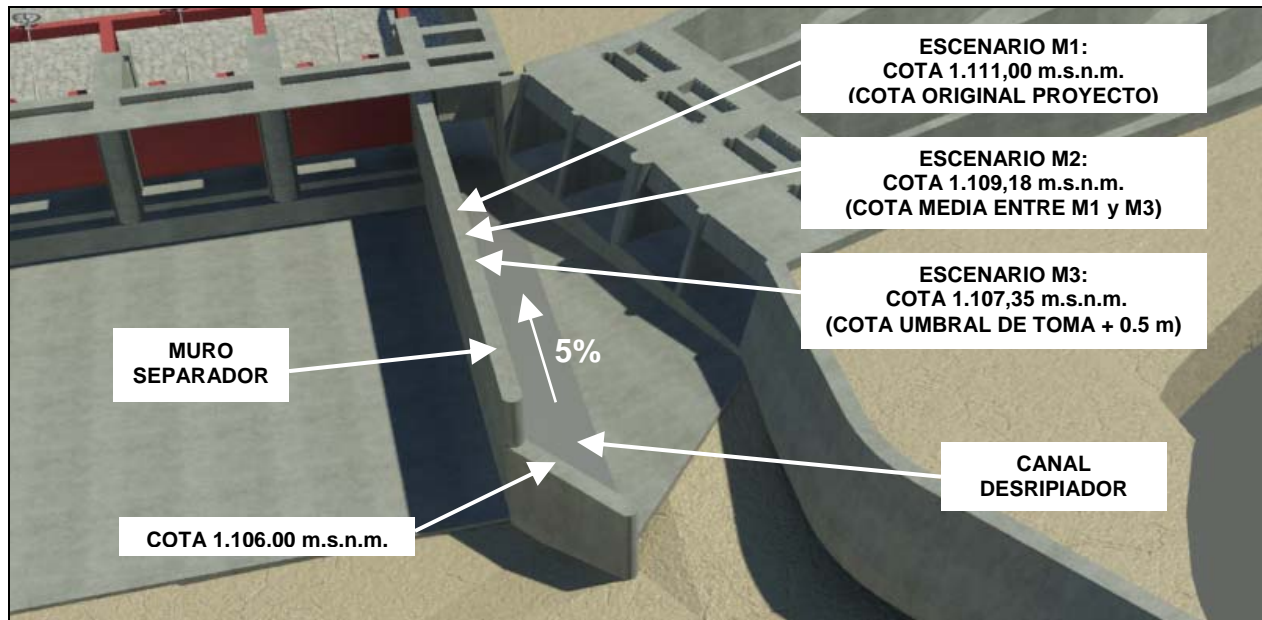
## **4.3. DESCRIPCION DE PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES**

### **4.3.1. DISTRIBUCIÓN DE CAUDALES ENTRE NAVES DESARENADORAS (EVALUACION INCIDENCIA DEL MURO SEPARADOR)**

Para realizar las verificaciones, se definió una serie de ensayos con diferentes condiciones de caudal de alimentación y con diferentes escenarios de modelación para la cota de coronamiento del muro separador barrera-toma.

Los caudales de alimentación fluctuaron en torno al caudal de diseño de la obra de toma (72,5 m<sup>3</sup>/s). El caudal mínimo ensayado fue de 20 m<sup>3</sup>/s. Para aquellos ensayos en que se incorporó el aporte de la aducción Cipreses, el caudal de ésta se mantuvo constante e igual a 20 m<sup>3</sup>/s.

Se definieron 3 escenarios de modelación para la cota de coronamiento del muro separador barrera-toma, los cuales se muestran en la FIGURA 8. Las condiciones de caudal y altura de muro para cada ensayo se resumen en la TABLA 3.



**FIGURA 8: ESQUEMA DE UBICACIÓN Y ALTURA DEL MURO**

Nombre del Ensayo	Caudal [m <sup>3</sup> /s]	Cota Muro Separador [m.s.n.m.]
Ch1-20- M1	20	1.111.00
Ch1-20- M2	20	1.109.18
Ch1-20- M3	20	1.107.35
Ch1-52,5- M1	52,5	1.111.00
Ch1-52,5- M2	52,5	1.109.18
Ch1-52,5- M3	52,5	1.107.35
Ch1-72,5- M1	72,5	1.111.00
Ch1-72,5- M2	72,5	1.109.18
Ch1-72,5- M3	72,5	1.107.35
Ch1-72,5C- M1 (*)	72,5	1.111.00
Ch1-72,5C- M2 (*)	72,5	1.109.18
Ch1-72,5C- M3 (*)	72,5	1.107.35
Ch1-88- M1	72,5	1.111.00
Ch1-88- M2	72,5	1.109.18
Ch1-88- M3	72,5	1.107.35
Ch1-88 C- M3	72,5	1.111.00
Ch1-88 C- M3	72,5	1.109.18
Ch1-88 C- M3	72,5	1.107.35

**TABLA 3: CONDICIONES DE CADA ENSAYO**

(\*) Nota: Estos ensayos incluyen la captación Cipreses aportando un caudal de 20 m<sup>3</sup>/s.

En cada uno de los ensayos definidos en la tabla anterior, se determinó la distribución del caudal entre las 4 naves desarenadoras. Para tales efectos, cada ensayo contempló la realización de aforos de caudal a la entrada de cada una de las naves.



El equipo instrumental utilizado para la medición de las velocidades se compone de un Molinete marca Nixon Flowmeters, modelo “Streamflo 430” y su respectivo contador digital de revoluciones.). La calibración se efectuó para un rango de velocidades entre 0,04 y 1,21 m/s.

Finalmente, en cada uno de los ensayos de la TABLA 3 se realizó medición de alturas de escurrimiento en varios puntos de los desarenadores de manera de determinar el área de escurrimiento en esos puntos y, a partir del valor del caudal determinado por el aforo, calcular la velocidad media de escurrimiento. Los puntos de medición de velocidades son los mismos que se definieron en la TABLA 2, para que de esta forma, puedan tener valores comparables entre sí.

#### **4.3.2. DIAGNÓSTICO DE COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE DESRIPIADO (EVALUACION INCIDENCIA DEL MURO SEPARADOR)**

El canal desripiador es un canal de sección variable, de 4 m de ancho en su base, y 5% de pendiente longitudinal, ubicado entre el muro separador y la obra de toma (ver FIGURA 8). Se espera que este canal capte el sedimento de fondo que sea arrastrado a la toma, impidiendo que dicho material ingrese a las naves desarenadoras. En el extremo de aguas abajo del canal se ubica una compuerta de sector de 4 m de ancho por 4 m de altura, la que será accionada en forma periódica para proceder a la limpieza del canal, aprovechando el efecto flushing del rápido que se produce.

Con el objeto de analizar la incidencia del muro separador en la eficiencia del canal desripiador, se procedió de la siguiente manera:

- Primeramente se determinó la curva de descarga de la compuerta desripiadora para diferentes niveles de apertura.
- Los ensayos se realizan, con la poza en su nivel máximo, con la bocatoma operando a su capacidad de diseño.
- Se analizan dos escenarios de altura de muro: M1 (1.111,0 m.s.n.m.) y M3 (1.107,35 m.s.n.m.)
- Con esta información, se procedió a realizar, por cada escenario del muro que separa la barrera principal de la zona de captación, 5 ensayos de diagnóstico del desripiado ante aperturas del 10%, 30%, 50%, 70% y 90% de la compuerta desripiadora. La apertura del 90% de la compuerta desripiadora, corresponde aproximadamente a su máxima efectiva.
- Previo al inicio de cada ensayo se dispuso material de arrastre llenando el canal desripiador, rasado a la misma cota que el umbral de captación (1.106,4 m.s.n.m) y sin compactación. El material de arrastre utilizado para estas pruebas es el mismo material constituyente del lecho móvil del modelo, al cual se le removió aproximadamente el 15 % más grueso de su banda granulométrica, según como se definió a partir de los ensayos de calibración sedimentológica.
- La duración de los ensayos se definió a partir de un ensayo de prueba en el cual se verificó que después de aproximadamente 3 horas de apertura de la compuerta desripiadora (30 minutos de ensayo) ésta ya no tiene poder de succión sobre el material dispuesto en el canal desripiador. De esta forma, se decidió que una duración del ensayo de 1 hora (aproximadamente 6 horas en prototipo) es suficiente para asegurar el correcto desarrollo del fenómeno a observar.

#### 4.4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES EXPERIMENTALES

A continuación se presentan los principales resultados y conclusiones obtenidas a partir de los ensayos realizados:

##### 4.4.1. DISTRIBUCIÓN DE CAUDALES

Luego de realizar los aforos descritos en el punto 4.3.1, para los diferentes escenarios se obtuvieron los caudales de captación en cada nave desarenadora. Los resultados se presentan en la TABLA 4.

Nombre del Ensayo	Q captado [m <sup>3</sup> /s]	Caudal naves desarenadoras [m <sup>3</sup> /s]					
		Nave 1	Nave 2	Nave 3	Nave 4	$\Delta_{\max}$	% var
Ch1-20- M1	20	4,285	5,031	5,426	5,258	1,140	26.6
Ch1-52,5- M1	52,5	11,074	13,070	13,648	14,708	3,634	32.8
Ch1-72,5- M1	72,5	16,267	17,887	18,556	19,790	3,523	21.7
Ch1-72,5 C- M1(*)	72,5	15,131	17,030	19,901	19,632	5,307	35.1
Ch1-88 - M1	72,5	14,998	17,718	20,152	19,632	5,154	34.4
Ch1-80 C- M1(*)	72,5	15,166	17,774	19,289	20,271	5,105	33.7
Ch1-20- M2	20	4,285	5,031	5,428	5,258	1,140	26.6
Ch1-52,5- M2	52,5	12,024	12,024	14,002	14,347	2,322	19.3
Ch1-72,5- M2	72,5	18,407	18,407	17,997	19,087	2,077	11.3
Ch1-72,5 C- M2(*)	72,5	18,285	17,182	17,553	19,480	2,298	12.6
Ch1-88- M2	72,5	17,982	16,894	18,901	18,724	2,007	11.9
Ch1-88 C- M2(*)	72,5	18,047	16,776	17,668	20,010	3,234	19.3
Ch1-20- M3	20	4,171	4,614	5,791	5,424	1,620	38.8
Ch1-52,5- M3	52,5	12,227	12,316	13,626	14,331	2,104	17.2
Ch1-72,5- M3	72,5	17,198	18,074	18,795	18,433	1,749	10.2
Ch1-72,5 C- M3(*)	72,5	17,266	17,319	19,062	18,853	1,796	10.4
Ch1-88- M3	72,5	17,198	18,074	18,795	18,433	1,597	9.3
Ch1- 88 C- M3(*)	72,5	17,258	17,848	18,746	18,648	1,488	8.6

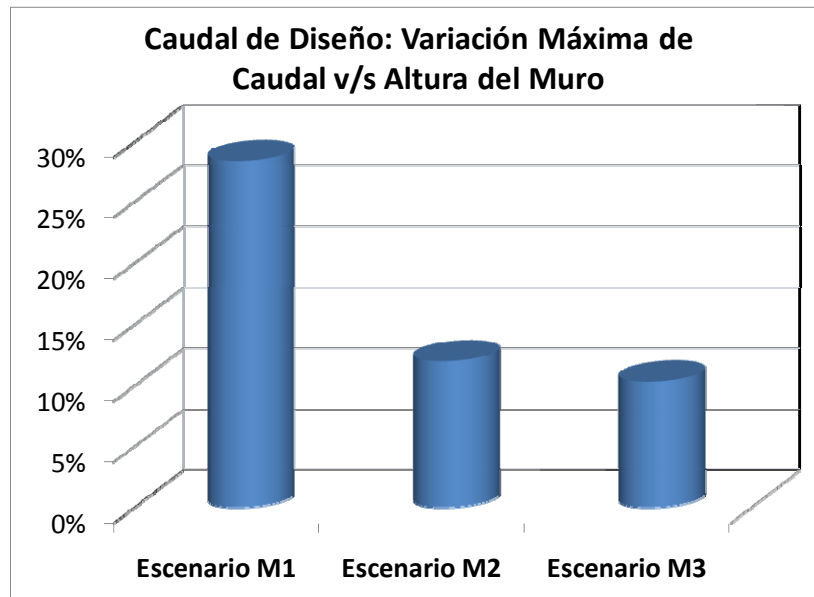
**TABLA 4: VARIACIÓN DE CAUDAL EN NAVES DESARENADORAS EN FUNCIÓN DE LA ALTURA DEL MURO**

(\*) Nota: Estos ensayos incluyen la captación Cipreses aportando un caudal de 20 m<sup>3</sup>/s.

De la TABLA 4 y la FIGURA 9 se puede apreciar lo siguiente:

- En ninguno de los ensayos el caudal se reparte en forma equitativa entre las cuatro naves desarenadoras. Sin embargo, a medida que disminuye la altura del muro y aumenta el caudal, el comportamiento general de la captación mejora y la distribución se hace más uniforme entre las naves, especialmente para el caudal de diseño.
- El ensayo Ch1-72.5-M1, que tiene las mismas condiciones con las que se calculó el eje hidráulico teórico, presentó una alta diferencia entre los caudales de cada nave.
- En el escenario M1, la diferencia máxima promedio, para el caudal de diseño, es del orden del 30%, diferencia que disminuye a medida que se baja la altura del muro (FIGURA 9).
- Las distribuciones más homogéneas entre naves se logran el escenario M3, donde para el caudal de diseño la mayor diferencia promedio de caudal captado es del orden del 10% y aun menores para caudales afluentes superiores al caudal de diseño.

- Para el menor caudal ensayado, el efecto del muro se mantiene en forma independiente de la altura del muro. Sin embargo, no es de preocupación, ya que por los caudales de toma la velocidad de desarenación será igualmente baja, no incidiendo en su eficiencia.
- No se observa una incidencia relevante de los caudales provenientes de Cipreses en el comportamiento de la bocatoma.



**FIGURA 9: VARIACIÓN DE CAUDAL ENTRE NAVES PARA EL CAUDAL DE DISEÑO, EN FUNCIÓN DE LA ALTURA DEL MURO.**

De acuerdo con lo anterior, se verifica que a menor altura de muro la distribución de caudales es más uniforme entre las naves desarenadoras.

#### **4.4.2. DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES**

Se analizó también la distribución de velocidades en las diferentes secciones de las naves desarenadoras y entre las diferentes naves. En la Tabla N° 4 se presenta la distribución de velocidad por cada nave desarenadora, con los valores obtenidos en las diferentes secciones de control indicadas en la TABLA 5.

De la tabla se aprecia que:

- La tendencia general de los perfiles de velocidades es a comportarse de forma muy similar al perfil teórico definido en la TABLA 2, es decir, se verifican velocidades mayores en la entrada y curva de transición de los desarenadores y velocidades menores en el tramo de desarenación propiamente tal.
- Las velocidades de escurrimiento tienden a ser menores cuanto más cercana se dispone la entrada de la nave a la compuerta desripiadora.
- Las velocidades en la entrada y en la curva de transición de los desarenadores (secciones 1 y 2) superan los valores teóricos, mientras que las velocidades dentro del tramo de desarenación (secciones 3 y 4) son inferiores a los teóricos, salvo en el caso ensayos con muro M1 y caudal de diseño, donde se tiende a superar los valores teóricos, en el sector del desarenador.

- En el escenario M3, las velocidades en los desarenadores se mantienen siempre por debajo de los valores teóricos. De este modo, el escenario M3 el que favorece en mayor medida la eficiencia de desarenación.

NOMBRE DEL ENSAYO	Caudal de Captación [m³/s]	Velocidad desarenador 1				Velocidad desarenador 2				Velocidad desarenador 3				Velocidad desarenador 3			
		Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4
Ch1-20- M1	20	0.400	0,193	0.101	0.093	0.480	0.226	0.119	0.109	0.619	0.242	0.128	0.117	0.607	0.235	0.124	0.113
Ch1-52,5- M1	52,5	0.920	0.461	0.240	0.222	1.113	0.535	0.283	0.262	0.135	0.556	0.296	0.271	1.459	0.593	0.317	0.292
Ch1-72,5- M1	72,5	1.256	0.626	0.336	0.308	1.404	0.684	0.365	0.340	1.660	0.705	0.375	0.351	1.811	0.738	0.395	0.367
Ch1-72,5 C- M1	72,5	1.180	0.588	0.312	0.291	1.363	0.657	0.348	0.324	1.820	0.765	0.407	0.379	1.927	0.780	0.418	0.384
Ch1-88- M1	72,5	1.153	0.576	0.309	0.287	1.409	0.674	0.363	0.335	1.744	0.761	0.408	0.380	1.818	0.740	0.396	0.368
Ch1-88 C- M1	72,5	1.189	0.591	0.318	0.292	1.417	0.689	0.368	0.339	1.777	0.742	0.399	0.366	1.883	0.770	0.410	0.381
Ch1-20- M2	20	0.400	0.193	0.101	0.093	0.480	0.226	0.119	0.109	0.619	0.242	0.128	0.117	0.607	0.235	0.124	0.113
Ch1-52,5- M2	52,5	1.002	0.491	0.263	0.238	1.041	0.495	0.262	0.242	1.364	0.568	0.303	0.277	1.449	0.581	0.308	0.283
Ch1-72,5- M2	72,5	1.423	0.707	0.376	0.348	1.375	0.655	0.347	0.322	1.648	0.692	0.367	0.341	1.794	0.728	0.393	0.361
Ch1-72,5 C- M2	72,5	1.413	0.701	0.375	0.346	1.368	0.666	0.356	0.325	1.630	0.680	0.366	0.336	1.823	0.753	0.400	0.368
Ch1-88- M2	72,5	1.397	0.695	0.372	0.344	1.354	0.657	0.351	0.327	1.729	0.741	0.391	0.363	1.762	0.728	0.388	0.590
Ch1-88 C- M2	72,5	1.406	0.705	0.374	0.347	1.353	0.658	0.347	0.322	1.658	0.692	0.366	0.339	1.892	0.773	0.411	0.382
Ch1-20- M3	20	0.394	0.188	0.099	0.089	0.462	0.208	0.110	0.101	0.631	0.261	0.138	0.127	0.576	0.244	0.129	0.117
Ch1-52,5- M3	52,5	1.012	0.494	0.262	0.242	1.047	0.497	0.263	0.243	1.250	0.553	0.294	0.268	1.317	0.582	0.310	0.285
Ch1-72,5- M3	72,5	1.362	0.674	0.360	0.333	1.427	0.685	0.367	0.337	1.783	0.739	0.393	0.366	1.763	0.662	0.379	0.351
Ch1-72,5 C- M3	72,5	1.335	0.667	0.354	0.324	1.386	0.666	0.356	0.330	1.762	0.735	0.392	0.364	1.799	0.726	0.389	0.359
Ch1-88- M3	72,5	1.340	0.665	0.356	0.327	1.450	0.701	0.372	0.343	1.748	0.724	0.384	0.355	1.764	0.714	0.382	0.351
Ch1-88 C- M3	72,5	1.343	0.663	0.358	0.331	1.421	0.685	0.368	0.340	1.743	0.722	0.386	0.357	1.779	0.723	0.384	0.358

**TABLA 5: PERFILES DE VELOCIDAD, EN CADA NAVE DESARENADORA**

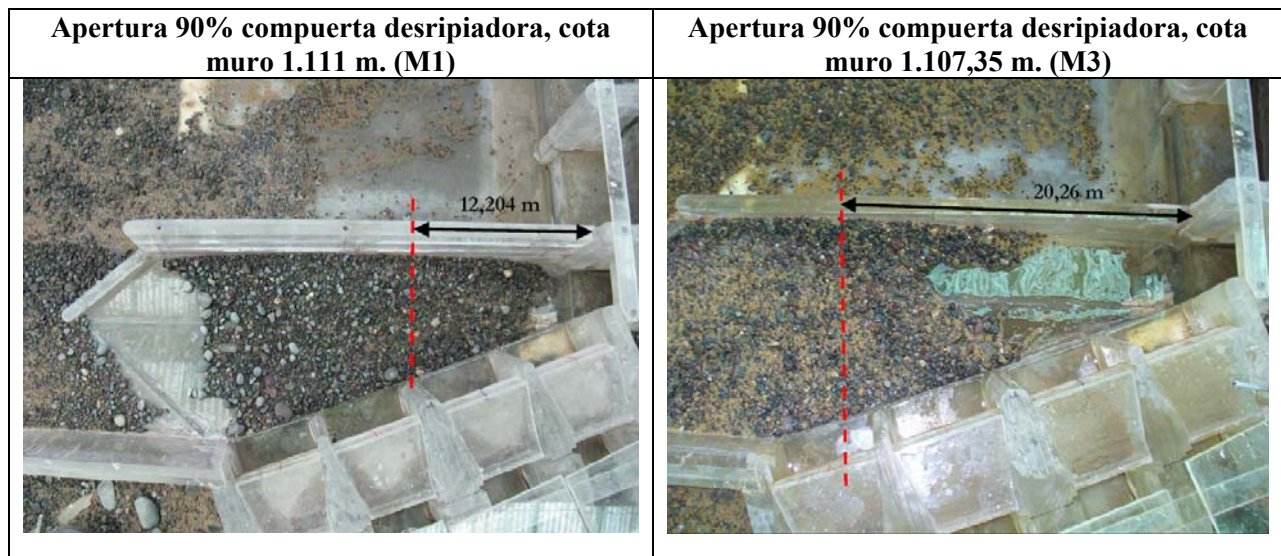
#### 4.4.3. EFICIENCIA DEL CANAL DESRIPIADOR

De acuerdo con el procedimiento definido en el punto 4.3.2, se determinó el efecto de vaciado (flushing) producido por la compuerta desripiadora en consideración de los dos escenarios de la cota de coronamiento del muro que separa la barrera principal de la zona de captación. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

	Apertura [m]	0.34	1.02	1.70	2.38	3.06
	% Apertura	10%	30%	50%	70%	90%
	Caudal de Captación [m³/s]	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5
Cota Muro M1: 1111 [m]	Caudal Evacuado [m³/s]	11.271	29.159	59.856	69.375	73.007
	Alcance Flushing [m]	2.540	3.972	6.320	6.840	12.204
	% Remoción Volumétrica	8.47%	13.24%	21.07%	22.80%	40.68%
Cota Muro M3: 1107.35 [m]	Caudal Evacuado [m³/s]	12.258	27.845	54.722	61.984	67.951
	Alcance Flushing [m]	4.632	8.116	14.248	17.900	20.260
	% Remoción Volumétrica	15.44%	27.05%	47.49%	59.67%	67.53%

**TABLA 6: REMOCIÓN DE MATERIAL CANAL DESRIPIADOR PARA ALTURA DE MURO M1 Y M3 Y DIFERENTES APERTURAS DE COMPUERTA**

En la FIGURA 10, se muestran fotos comparativas del efecto de limpieza para la apertura de 90%, donde se puede ver el alcance hacia aguas arriba del efecto flushing, durante el tiempo de duración de los ensayos.



**FIGURA 10: EFECTO DE DESRIPIADO PARA 90% DE APERTURA DE COMPUERTA**

A partir de los resultados mostrados en la TABLA 6, y lo observado en los ensayos se puede concluir lo siguiente:

- Para todas las condiciones de apertura de la compuerta desripiadora, se logran mejores eficiencias de limpieza bajo el escenario M3 del muro que separa la barrera principal de la obra de toma, escenario que define su coronamiento en la cota 1.107,35 m.s.n.m.
- Para la apertura máxima el efecto de flushing, con el muro en la altura M3, tiene un alcance un 66% superior en distancia hacia arriba. (de 12,204m a 20,26m).

- La condición más favorable para el proceso de desripiado la constituye la apertura completa de la compuerta desripiadora (3.06 m o 90% de apertura). Aperturas iguales o inferiores al 50% no logran la efectividad esperada del proceso.
- Es conveniente mantener abierta la compuerta desripiadora durante períodos de crecidas importantes. Además, se recomienda que cuando se verifiquen caudales de crecidas menores (anual y bianual), estas crecidas sean evacuadas a través de la compuerta desripiadora.
- Pruebas preliminares confirmaron que el comportamiento del desripiado aumenta al disminuir el ancho del canal aguas arriba y quedar como canal rectangular. Se recomienda implementar modificaciones en el diseño del canal desripiador orientadas a disminuir su ancho en su extremo de aguas arriba.

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES**

A partir de los ensayos y los análisis de sus resultados se concluye que el comportamiento de la captación mejora con una altura de muro según el escenario M3 de la experimentación (cota 1.107.35 m.s.n.m.). Con esta altura del muro separador se tiene una distribución más uniforme de los caudales que ingresan a cada nave desarenadora, con un ingreso de volumen de sedimentos y una distribución de velocidades similares en cada canal, en concordancia con los cálculos teóricos realizados.

Por otra parte, la disminución de altura del muro, también permite efectuar una faena de limpieza del canal desripiador más eficiente, donde el efecto del flushing aumenta su alcance de 12 m a 20 m hacia aguas arriba del canal, para un 90% de apertura de la compuerta. Este efecto aumenta al modificar la sección del canal, haciéndolo de sección uniforme en toda su longitud.

Como conclusión final, se puede señalar que los ensayos anteriores permitieron modificar el diseño básico de las obras. Principalmente, se bajó la cota del muro a los niveles recomendados por la experimentación y se modificó la forma del canal desripiador, quedando de sección rectangular y uniforme en toda su longitud.

La experimentación en modelo físico demostró ser un gran aporte para el diseño de las obras hidráulicas, ya que permite predecir y verificar comportamientos y/o efectos hidrodinámicos que son muy difíciles de evaluar y calcular mediante modelación matemática. Además, brinda la posibilidad de estimar en forma precisa variables que habitualmente no pueden ser calculadas mediante fórmulas.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al profesor Alejandro Lopez, con quien iniciamos este trabajo, en el INH.

## **REFERENCIAS**

Bouvard, M. 1992. Mobile Barrages and Intakes on Sediment Transporting Rivers.

Instituto Nacional de Hidráulica, 2008. Modelo Físico – Hidráulico Bocatoma Chacayes. Chile.