

# Evaluación en un modelo físico del aporte de sedimentos y de las políticas de operación del Dique Los Molinos (Jujuy).

*Nicolás F. Guillén<sup>1,2</sup>, Carlos M. García<sup>1,2</sup>, Gerardo Hillman<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>CETA. Centro de Estudios y Tecnología del Agua- Universidad Nacional de Córdoba-Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales., Universidad Nacional de Córdoba, Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.

<sup>2</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

E-mail: nfguillen@hotmail.com

## RESUMEN

El dique Los Molinos, construido en el año 1972, está ubicado sobre el Río Grande, a pocos kilómetros al oeste de la ciudad de San Salvador de Jujuy, ciudad capital de la provincia de Jujuy. El objetivo de la obra existente es la generación de una toma de derivación de agua para riego. Debido a las problemáticas existentes en la actualidad con esta obra, en este trabajo se evalúan y proponen medidas estructurales (infraestructura) y no estructurales (normas de operación de las estructuras de evacuación) para mitigar estos inconvenientes y refuncionalizar el dique. Una vez diseñadas las medidas estructurales y no estructurales, un modelo físico tridimensional a escala fue requerido para evaluar su diseño; el cual se construyó en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, de la Universidad Nacional de Córdoba. Este modelo físico se utilizó para realizar gran parte del trabajo aquí presentado.

En este trabajo se caracterizan hidráulicamente las estructuras de descarga con la nueva configuración diseñada y se proponen 2 metodologías a implementar en el futuro para la operación de las compuertas del dique ante la presencia de una crecida. A estas políticas se las evaluaron sin y con aporte de sedimentos, analizando las diferencias entre ambos casos. El aporte de sedimentos al curso fluvial se implementó de dos formas diferentes: en forma semidiscreta y en forma continua con el empleo de tolvas vibratorias.

## INTRODUCCIÓN

*Descripción general del modelo físico. Área de influencia.*

El modelo físico tridimensional utilizada respeta los lineamientos impuestos por el Criterio de Semejanza de Froude, con capacidad para llevar a cabo experimentos tanto a Fondo Rígido como a Fondo Móvil. Para ello se dispone de un sector del modelo donde se pueden ejecutar indistintamente: un fondo rígido conformado según la topografía relevada del lugar; un fondo móvil (arena) que permite analizar los procesos erosivos.

A partir de la observación temporal de imágenes satelitales se ha inferido que la máxima zona activa por la llamada de las obras de descarga se desarrolla en un dominio próximo de 200m x 200m en el prototipo, por lo que se ha dispuesto en el modelo, de un fondo móvil respetando el área mencionada (ver Figura 1). En el

sector identificado se reemplazó el fondo fijo por arena de granulometría cuasi uniforme en el rango 0,6 - 1mm de diámetro.

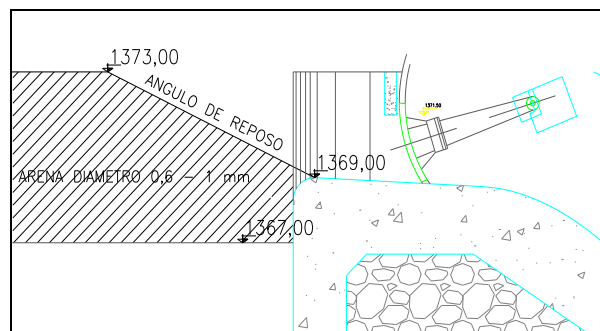


**Figura 1.-** Área de estudio con lecho erosionable (fondo móvil).

La zona de ingreso de flujo al modelo permanece con lecho fijo y entre la zona inmediatamente adyacente al dique y el lecho fijo, se colocó material de transición de tamaño 1 – 5mm para evitar un cambio abrupto de la rugosidad y la aparición de efectos parásitos indeseados.

Aguas abajo del dique móvil se construyó una tolva que permitió retener sedimentos y medir el volumen sólido que haya pasado por las estructuras móviles.

En cuanto al perfil longitudinal inicial, previo a cada ensayo, se niveló el fondo móvil de arena a la cota de descarga de cada estructura, manteniendo hacia aguas arriba el ángulo de reposo del material hasta alcanzar la cota del dique fijo (1.373,00) (Figura 2).



**Figura 2.-** Perfil longitudinal al inicio de cada ensayo.

Como se indicó precedentemente, los ensayos que en este informe se presentan, contemplan la incorporación de sedimentos, como una tasa variable de aporte, asociada al caudal líquido que ingresa al modelo.

La tasa de sedimento fue analizada, estimada y definida, a partir de la formulación de Meyer Peter Müller.

## OBJETIVOS

El objetivo de los ensayos realizados fue el siguiente:

*Verificar y optimizar las consignas de operación de las estructuras de control, a los fines de regular los procesos hidrosedimentológicos presentes en las proximidades de la presa aguas arriba. Esta evaluación se llevó a cabo para las condiciones de flujo relevantes (descarga de las crecidas frecuentes en todo el sistema, descarga máxima en vertedero fijo y descarga máxima en vertedero móvil y canal moderador).*

Se ha definido como caudal de referencia  $600\text{m}^3/\text{s}$ , considerado un evento de recurrencia ordinaria y compatible con las posibilidades reales de operación de los órganos de evacuación móviles (según los criterios de operación actuales). Se advierte que la totalidad del caudal puede ser evacuado por la estructura del dique móvil y canal moderador.

Partiendo de este caudal de referencia se planificaron dos conjuntos de ensayos a fondo móvil: **sin aporte de material** y **con aporte de material** aguas arriba de la zona de estudio.

Los ensayos **sin aportes**, han permitido analizar, aspectos hidrodinámicos del flujo en las inmediaciones de la obra y el impacto morfológico en el cauce aguas arriba, resultante de distintas combinaciones o alternativas de apertura de compuertas.

Las múltiples combinaciones posibles fueron evaluadas sobre la perspectiva de tres aspectos funcionales fundamentales: 1- La capacidad de remoción de sedimentos aguas arriba de la obra; 2 - La configuración del cauce aguas arriba de la obra una vez finalizado el evento; y 3 - La configuración del cauce en las inmediaciones de la obra de toma.

En virtud de la respuesta observada para las distintas alternativas de operación, se propusieron criterios generales de operación y manejo, los cuales quedaron plasmados a modo de **política de operación**.

Definidos los criterios de políticas de operación, se procedió a la representación de las mismas, con la incorporación de sedimentos aguas arriba (ensayos **con aportes**). Esta tarea se realizó en dos secuencias, una manual, con aportes discretos de caudal sólido y otra de manera automática, a través de una tolva diseñada específicamente para asegurar una tasa de aporte de sedimentos continua durante el ensayo.

El objetivo específico de todo el trabajo es la definición de las políticas de operación de las estructuras móviles. Estas políticas deben responder a: minimizar la erosión aguas abajo del canal moderador, minimizar la remoción de material al pie del muro insumergible que separa el dique móvil del canal moderador) y favorecer la formación de un canal de llamada hacia la obra de toma luego de la creciente.

## TÉCNICAS EXPERIMENTALES

### *Descripción de las tolvas aportadoras de sedimento. Principio de funcionamiento.*

Como se comentó anteriormente, se utilizaron 2 tolvas vibratorias (una chica y una grande) para realizar el aporte de sedimentos de manera continua en el modelo físico. Las mismas están compuestas por:

- Recipiente de forma trapezoidal (donde se carga sedimento). El largo de la tolva chica es de 1,20m, y el de la tolva grande es de 2,00m. Estos recipientes poseen en la parte inferior y lateral, una plancha de metal desplegado el cual se compone de orificios de 2mm de diámetro por donde cae el sedimento.

- Mecanismo de nivelación. Cada tolva dispone de cuatro roscas sinfín para nivelarla horizontalmente, asegurando la distribución uniforme del material.
- Motor de vibración eléctrico conectado a un circuito trifásico. Dispone de una excentricidad regulable que permite corregir la velocidad de vibración.
- Dos soportes de hierro de dos patas cada uno, los cuales son regulables en altura para que apoyen en forma uniforme sobre la superficie.
- Celdas de carga: Cada tolva permite incorporar dos de ellas, con el objeto de pesar la cantidad de sedimento disponible en la tolva. La misma se utilizó durante el proceso de calibración de las mismas.

El principio de funcionamiento de las tolvas es mediante la vibración del recipiente en el cual se encuentra el sedimento de aporte. El armado consiste en colocar las tolvas en sus soportes, nivelarlas en forma longitudinal y transversal mediante los tornillos sinfín y un nivel de mano y por último fijarlas con contratuercas de manera que no pierda rendimiento el motor durante su funcionamiento. En la Figura 3 se muestra una de las tolvas lista para ser utilizada en el modelo.



**Figura 3.-** Tolva chica previa a ser utilizada en el modelo físico.

### *Calibración de las tolvas*

Para determinar cómo suministrar los caudales sólidos necesarios durante los ensayos, se procedió a calibrar las tolvas. Este procedimiento se realizó de la misma manera en ambas tolvas. Los caudales sólidos necesarios fueron estimados y definidos a partir de la formulación de Meyer Peter Müller.

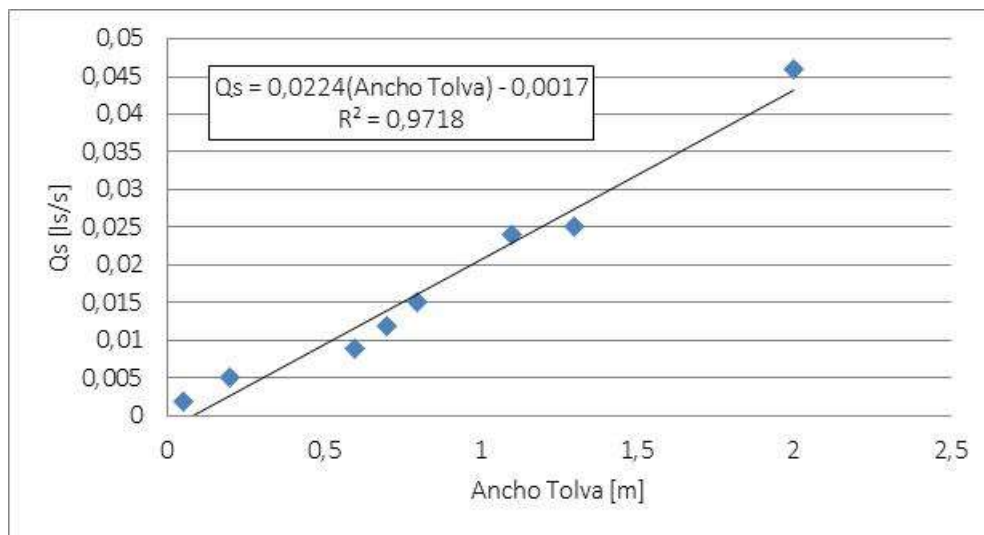
La calibración consistió en disponer una cierta cantidad de arena y cuantificar el volumen pasante por el tamiz de la tolva en un tiempo determinado. Para analizar la sensibilidad de erogación de la tolva en el tiempo, se cuantificó el volumen pasante a través de la misma para 1, 2, 3, 5 y 10 minutos. En cada caso se colectó la arena caída y se midió su altura (h) en un recipiente de diámetro conocido ( $d = 0,24\text{m}$ ) para luego calcular el volumen de sedimento erogado. Luego, conociendo la cantidad pasante en cierto tiempo se determinó el caudal sólido (l/s).

En primera instancia se utilizó arena con humedad natural. Al ir obteniendo los caudales sólidos con esta arena, se verificó que el orden de magnitud de los mismos era cercano a los necesarios para los ensayos, por lo que se continuó el estudio con el material en esta condición.

Lo primero que se realizó es el cálculo del caudal sólido máximo erogable por cada una de las tolvas. Se determinó que el caudal sólido que eroga la tolva chica resulta hasta 0,013 l/s, mientras que la grande 0,046 l/s. En ambos casos, usando la arena con humedad natural.

Al distinguir que el caudal máximo erogable por la tolva chica era insuficiente para aportar al Río Reyes ( $Q_{s_{max}} = 0,025$  lt/s), se decidió ajustar esta tolva al río Grande. Como los caudales sólidos necesarios en el río Grande son: 0,022; 0,018; 0,017; 0,016 y 0,014 l/s; los caudales que faltan calibrar en esta tolva son los 4 mayores; y la alternativa más sencilla para lograr esto consiste en hacer variar la humedad de la arena. Por ello se usó arena un poco menos húmeda para alcanzar dichos caudales sólidos.

En el caso del Río Reyes, como el caudal máximo erogable por la tolva grande es excesivo (el caudal máximo necesario es 0,025 l/s), se buscó alcanzar los caudales sólidos necesarios limitando el ancho efectivo de la tolva. Para tal efecto se utilizó un separador de polipropileno de ½" de espesor. Luego de varias pruebas, se pudo evaluar la variación del caudal sólido con el ancho aportante de las tolvas y así se fueron obteniendo los diferentes caudales sólidos buscados. La relación entre la abertura de la tolva y el caudal de sólido erogado por la tolva grande se puede ver en la Figura 4.



**Figura 4.-** Gráfico Ancho de tolva grande Vs Caudal sólido

Para calcular el peso específico de la arena utilizada en los ensayos se utilizaron las celdas de carga anteriormente mencionadas. Se calculó el peso específico de la arena con humedad natural y el peso específico saturado de dicho material. Los resultados encontrados se muestran a continuación:

$$\gamma_{\text{arena natural}} = 1197 \text{ Kg/m}^3$$

$$\gamma_{\text{arena saturada}} = 1727 \text{ Kg/m}^3$$

#### *Elección de la fórmula de transporte de sedimentos adecuada*

Para poder llevar a cabo las políticas de operación de compuertas en el Dique Los Molinos con aporte de sedimentos, se estudiaron tres fórmulas empíricas, para luego compararlas y seleccionar la que mejor

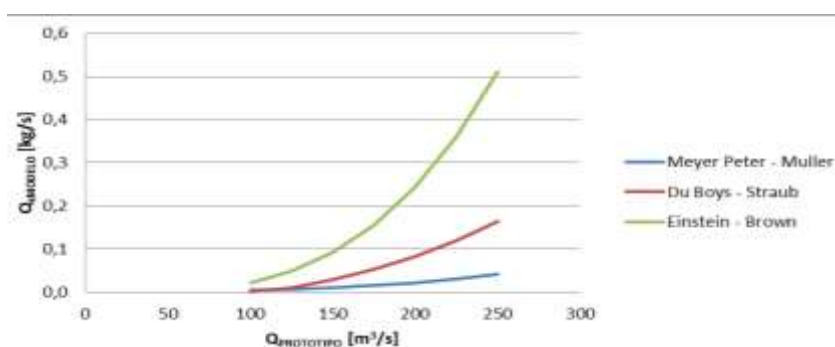
representara el comportamiento real de nuestro modelo. Es importante mencionar que en este trabajo solo se consideró el transporte de sedimentos de fondo y no el de lavado.

Las fórmulas de transporte de fondo analizadas fueron:

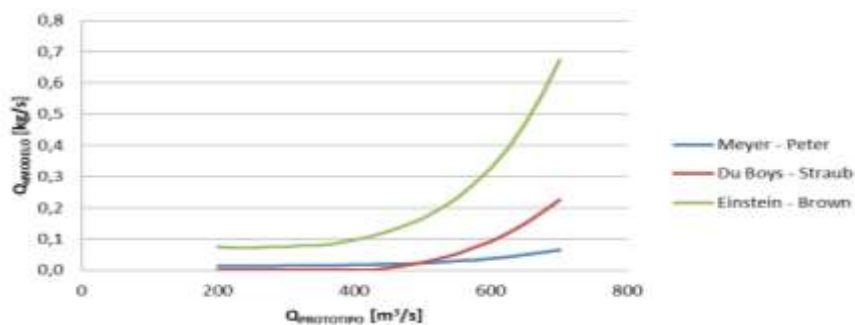
- Ecuación de Meyer – Peter y Müller.
- Ecuación de Du Boys – Straub.
- Ecuación de Einstein – Brown.

No se aplicaron las fórmulas de Shields debido a las limitaciones de la fórmula con respecto al diámetro mínimo del sedimento.

La utilización de las fórmulas empíricas que cuantifican el transporte de sedimento requirió la determinación, tanto de parámetros del cauce como del sedimento. De cada fórmula se obtuvo un caudal sólido para cada río asociado a diversos caudales líquidos, obteniéndose los resultados mostrados en la Figura 5 y Figura 6:



**Figura 5.-** Comparación de las fórmulas de transporte para el Río Reyes



**Figura 6.-** Comparación de las fórmulas de transporte para el Río Grande

A partir de las figuras presentadas, se pueden observar las discrepancias entre las fórmulas, por lo que hubo que evaluar un criterio para poder elegir la que más representativa de nuestro caso y tipo de estudio.

En este sentido, para seleccionar la fórmula de transporte a utilizar, se ensayaron las dos políticas propuestas sin aporte de sedimentos y se relevó el volumen de arena removido. Luego se estimó el transporte de sedimento con las fórmulas antes mencionadas (Figura 5 y Figura 6) y se contrastó este resultado con el observado en el modelo, para escenarios sin aportes. En la Tabla 1 y Tabla 2 se resume la capacidad de transporte de sedimentos calculada para ambos ríos mediante cada fórmula según las dos políticas de manejo de compuertas y en la última columna, el sedimento removido durante el ensayo sin aportes.

**Tabla 1.-** Tabla resumen transporte de sedimentos Política de esperar la crecida con compuertas cerradas

Política de esperar la crecida con compuertas cerradas				
	Meyer Peter - Müller [l]	Du Boys - Straub [l]	Einstein - Brown [l]	Sin aporte [l]
Rio Reyes	30,0	58,0	171,7	145,0
Rio Grande	52,5	0,0	287,4	
<b>TOTAL</b>	82,5	58,0	459,1	

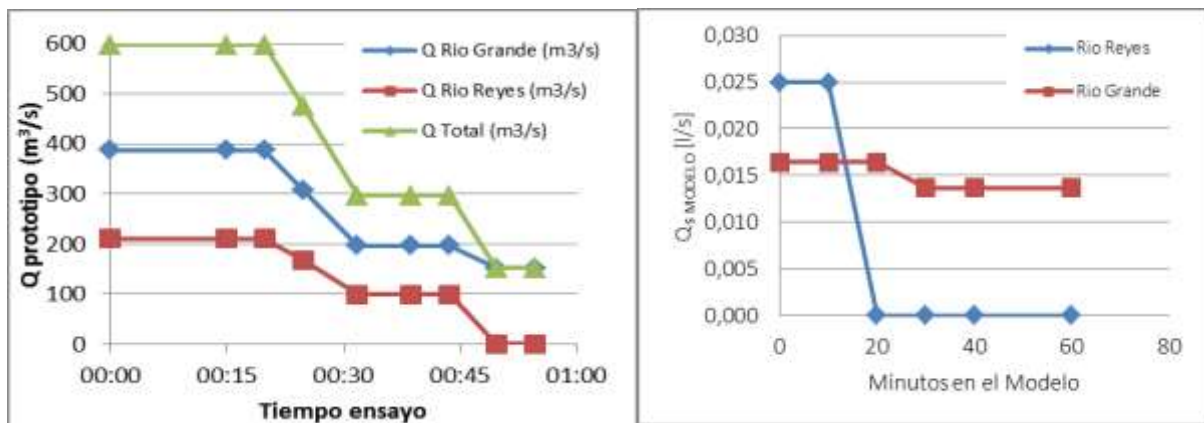
**Tabla 2.-** Tabla resumen transporte de sedimentos Política de esperar la crecida con compuertas abiertas

Política de esperar la crecida con compuertas abiertas				
	Meyer Peter - Müller [l]	Du Boys - Straub [l]	Einstein - Brown [l]	Sin aporte [l]
Rio Reyes	38,4	129,5	408,0	115,0
Rio Grande	53,6	0,0	291,4	
<b>TOTAL</b>	92,0	129,5	699,4	

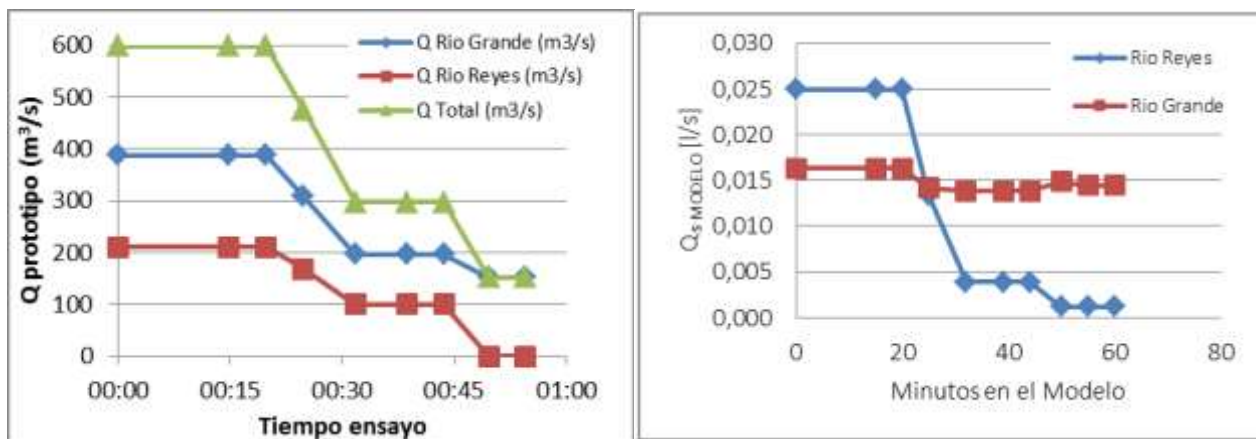
A partir de los resultados obtenidos y presentados en las tablas precedentes, se destaca que la formulación que más se aproxima es la de Meyer Peter – Müller, quedando la misma seleccionada para la estimación de caudales sólidos a aportar al modelo.

### CAUDALES SÓLIDOS NECESARIOS

Partiendo de los hidrogramas de ensayo, se calcularon los flujogramas asociados (Figura 7 y Figura 8).



**Figura 7.-** Hidrograma medio anual y flujograma asociado si se espera la crecida con compuertas cerradas



**Figura 8.-** Hidrograma medio anual y flujograma asociado si se espera la crecida con compuertas abiertas

Se puede observar que en ambos casos el río Reyes tiene un transporte de sedimento mayor que el del río Grande, por más que el caudal de agua aportado sea mayor en este último. Esta particularidad es debido a que la tensión de corte crítica  $\tau_0$  que genera el flujo de fondo es proporcional a la pendiente longitudinal del cauce, siendo la del río Reyes (Pendiente de 1,90%) mayor que la del río Grande (Pendiente de 1,30%).

## RESULTADOS

Se presentan a continuación los resultados obtenidos para las dos políticas de operación planteadas para la espera de la crecida: con las compuertas cerradas y con las compuertas abiertas. A su vez, cada ensayo se realizó para los siguientes casos: 1 - Sin aporte de sedimentos; 2 - Con aporte de sedimentos de forma manual y semidiscreta; y 3 - Con aporte de sedimentos de forma continua (mediante el empleo de las tolvas).

### *Política de Operación 1: Esperar la crecida con las compuertas cerradas*

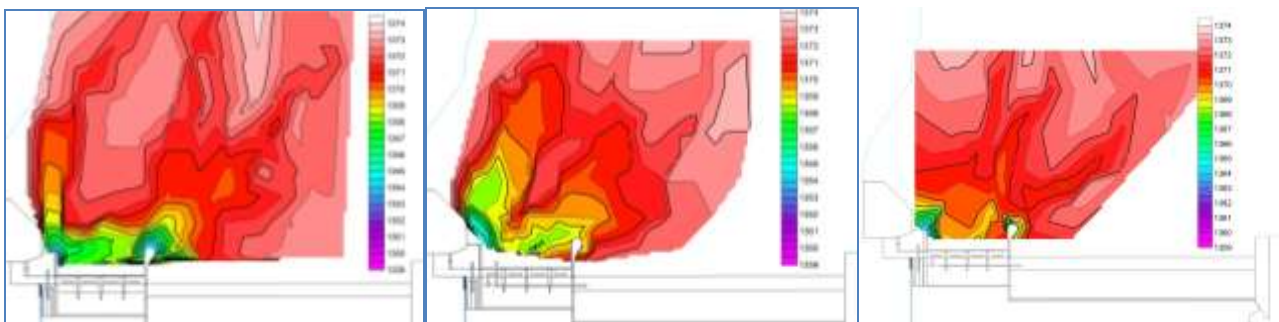
En la Tabla 3 se muestra a modo de síntesis este procedimiento. Vale aclarar que se denomina DF al dique fijo, CM a los canales moderadores y DM a los diques móviles y se numeran desde margen derecha a izquierda respectivamente.

**Tabla 3.-:** Resumen del procedimiento con compuertas cerradas.

Etapa	% de apertura							Q en prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Cota sup. agua Margen Der. DF (m)	Cota sup. agua Margen Izq. DM(m)	Cota sup. agua Margen Der. DM (m)	Observaciones
	DM1	DM2	DM3	DM4	CM1	CM2	Toma					
1	-	-	-	-	-	-	-	600	1374,2	1374,6	1374,6	Se hace pasar el agua totalmente por el DF
2	10%	10%	10%	10%	-	-	-	600	1374,2	1374,6	1374,6	Orden de apertura: DM 3,2,4,1
3	20%	20%	20%	20%	-	-	-	250	1373,1	1373,9	1373,6	Orden de apertura: DM 3,2,4,1
4	50%	50%	50%	50%	100%	100%	-	225	1373	1372,6	1372,2	Orden de apertura: DM 3,2,4,1 - CM1,2
5	-	-	-	-	-	-	100%		-	-	1369	Cierro CM. Abro toma hasta cargar desrripador. Abro CM hasta evacuar flujo. Repito pasos.

Bajo esta política, antes de realizar la etapa 4 del ensayo (donde se abren al 100% los canales moderadores y al 50% los diques móviles) no se aprecian grandes erosiones en la zona aguas arriba de la obra; mientras que luego de esta etapa la erosión del lecho cambia significativamente con respecto a la configuración inicial del ensayo.

Para los 3 ensayos se relevaron puntos y se digitalizaron las superficies obtenidas (Figura 9).

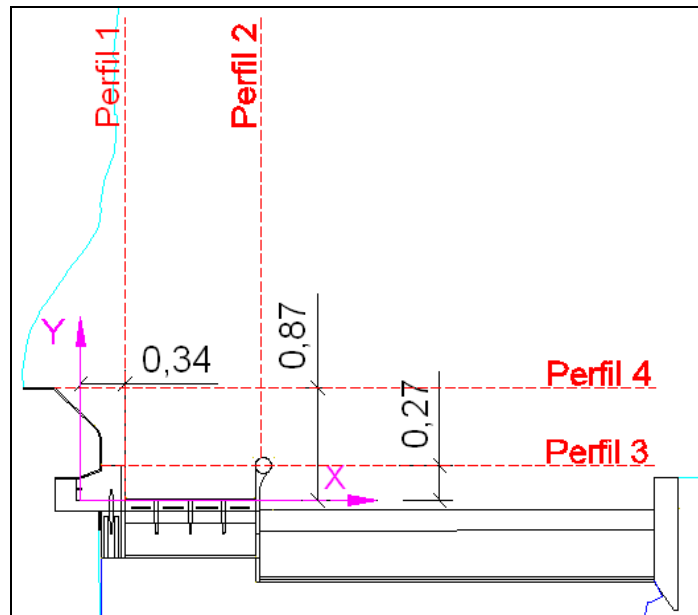




**Figura 9.-** Superficie digital del modelo cuando se espera la crecida con las compuertas cerradas sin aporte de sedimentos, con aporte de sedimentos manual y con aporte de sedimentos continuo respectivamente.

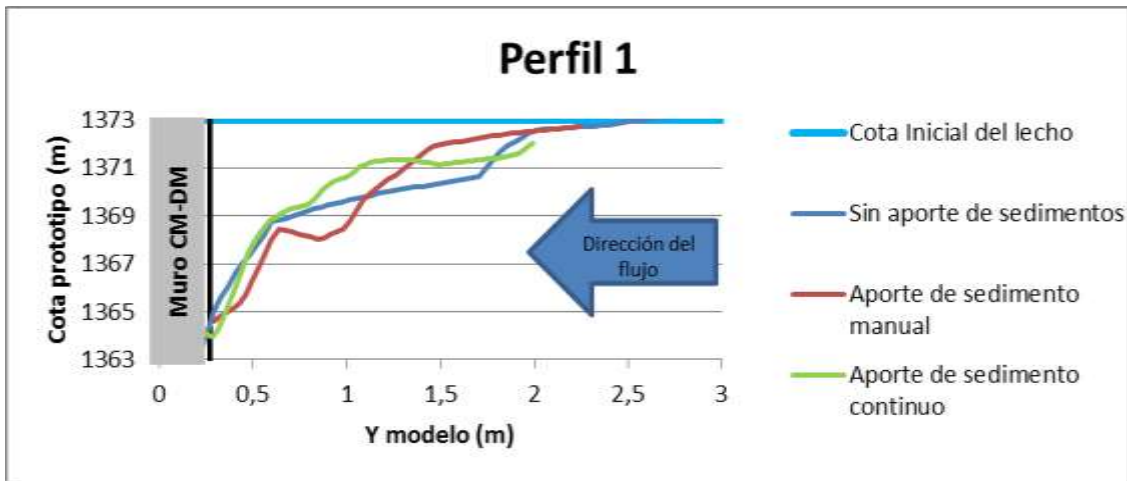
Las superficies generadas en los tres ensayos muestran formas de fondo similares. En el caso sin aporte los tres canales de llamada se notan claramente, mientras que con aporte están menos acentuados, pero la cota de fondo es de 1371 m aproximadamente. Al aproximarse a la zona del canal moderador su cota disminuye a 1364 m. Además, se puede apreciar la formación de un canal de cota 1367 m (color verde en las imágenes) que se encuentra paralelo a la obra en la zona del dique móvil. Por otro lado, se observa en la imagen del ensayo sin aporte de sedimentos (Figura 9) la gran erosión local en la zona entre el dique fijo y dique móvil generada por la presencia de la guitarra.

A partir de las superficies digitales presentadas, se obtuvieron 4 perfiles (Figura 10), con el fin de poder comparar los resultados obtenidos en los tres casos analizados. Se realizaron dos perfiles longitudinales al curso fluvial (uno donde se separa el canal moderador del dique móvil y el otro donde se divide el dique móvil del dique fijo) y dos transversales (uno a 20 metros en prototipo del labio del dique móvil y el otro a 60 metros).



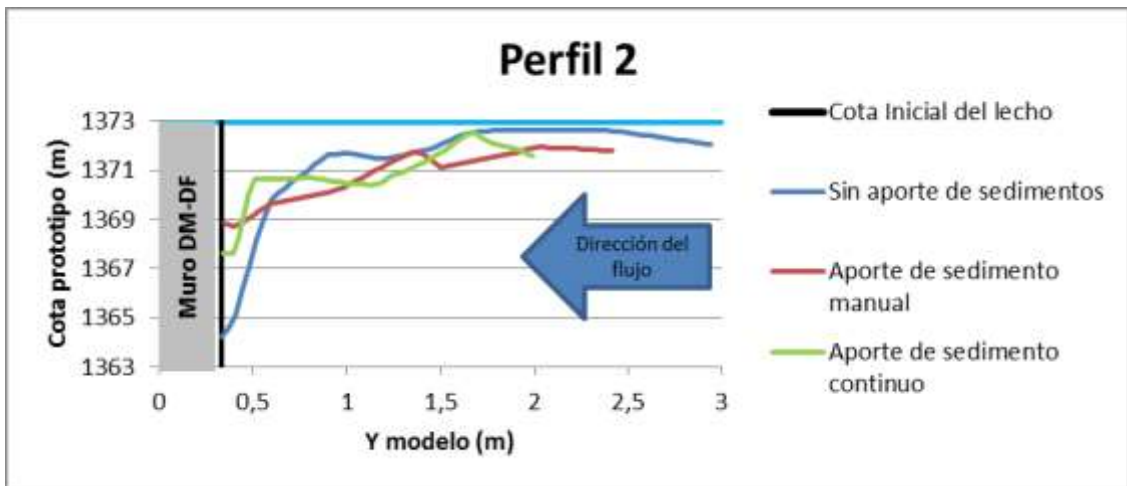
**Figura 10.-** Ubicación de perfiles analizados

Los perfiles obtenidos para los tres casos analizados se presentan a continuación. En color celeste se distingue la cota al iniciar cada ensayo (1373 m), en color azul se puede ver el lecho del ensayo sin aporte de sedimentos, en color rojo el del ensayo con aporte manual y en verde el del ensayo con aporte continuo de sedimentos.



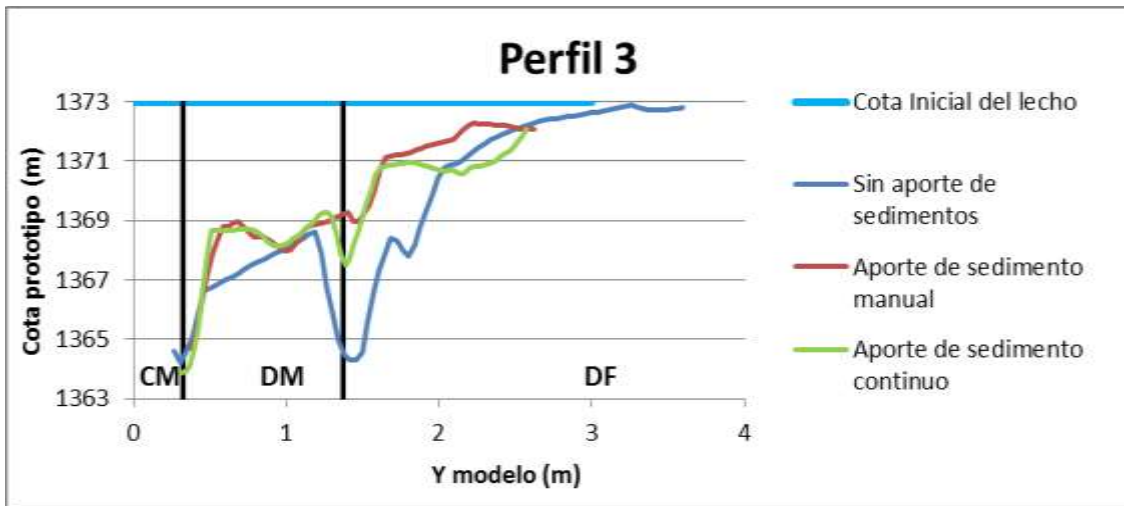
**Figura 11.-** Perfil 1. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas cerradas

Se puede notar que en el perfil 1 no se observan cambios significativos entre los tres casos analizados. En este perfil se distingue la cota mínima observada, en correspondencia con la ubicación del muro que separa el canal moderador del dique móvil y en los tres casos es aproximadamente 1365 m.



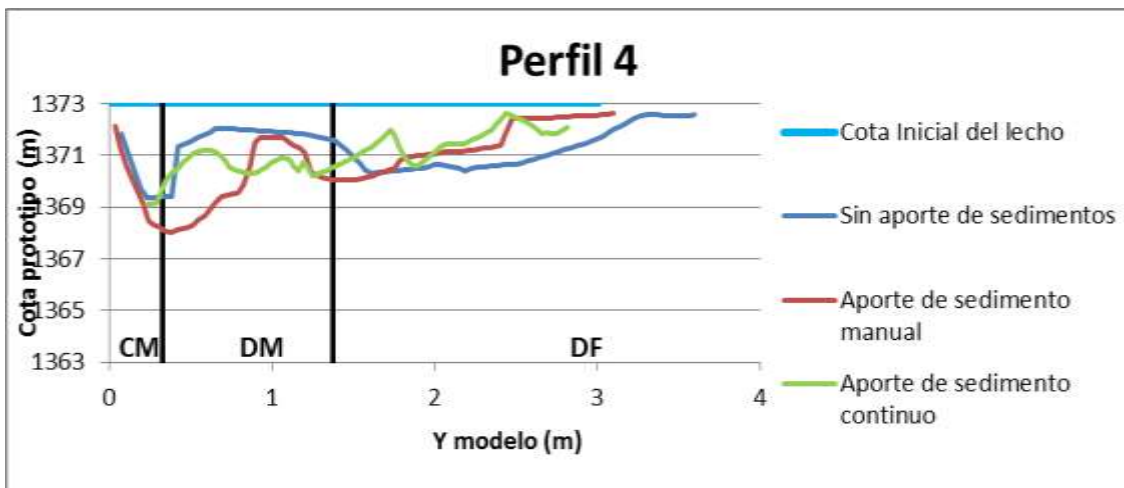
**Figura 12.-** Perfil 2. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas cerradas

El perfil 2 muestra que en el ensayo sin aporte de sedimentos, se observa mayor remoción, inmediatamente aguas arriba de la guitarra que separa el dique fijo del dique móvil. La cota observada en el caso sin aporte es de 1364m, mientras que con aporte, varía entre 1368m y 1369m; por lo que la diferencia entre las cotas observadas ronda los 3 y 4 metros. Si bien cerca de la guitarra se observó esta diferencia, la erosión generalizada aguas arriba de esta estructura, es similar en los tres casos.



**Figura 13.-** Perfil 3. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas cerradas

Analizando el perfil 3 se vuelve a observar un comportamiento similar al del perfil 2. En el caso sin aporte, la magnitud de la erosión es mayor que en los casos con aporte; pero en los tres casos se presenta un patrón similar en la forma de fondo. Lo interesante en este perfil es que se manifiesta, para todos los casos, las cotas mínimas observadas; muestra la erosión local que ocurre en la guitarra que separa el dique fijo del dique móvil (cuya diferencia de resultado se explicó en el perfil 2) y la que ocurre en el muro que separa el canal moderador del dique móvil (que para los tres casos fue muy similar). También permite distinguir e inferir que las formas y fondos de los canales que se forman, son similares en todos los casos. Resaltando que en el ensayo sin aporte de sedimentos las cotas son menores, generando canales de llamada más marcados (con diferencia de hasta 3 y 4m entre los ensayos sin y con aporte).



**Figura 14.-** Perfil 4. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas cerradas

En el perfil 4 se pueden observar los canales de llamada hacia la obra, conformados a unos 60m de la misma. En este caso no existe una gran diferencia de las formas del lecho entre los tres casos.

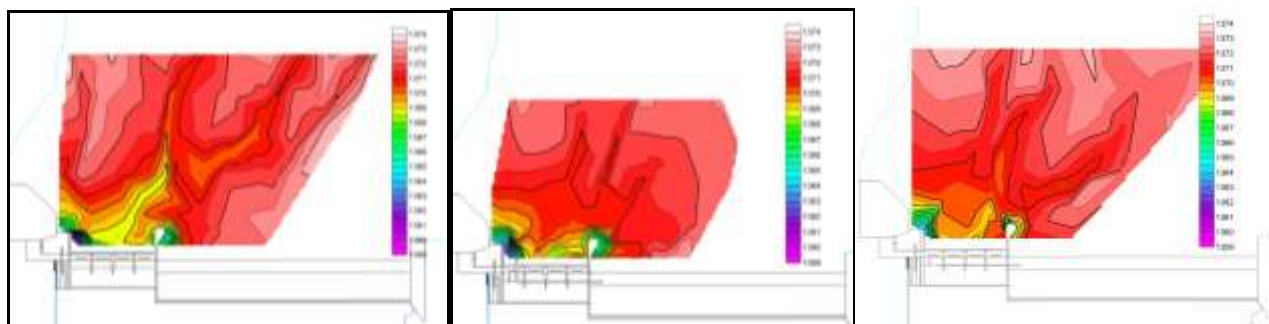
*Política de operación 2: Esperar la crecida con las compuertas abiertas*

En la Tabla 4 se muestra a modo de síntesis este procedimiento.

**Tabla 4.-:** Resumen del procedimiento con compuertas abiertas.

Etapa	% de apertura							Q prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Cota sup. agua margen izquierda DM (m)	Observaciones
	DM4	DM3	DM2	DM1	CM2	CM1	Toma			
1	100%	100%	100%	100%	-	-	-	600	1372,5	Orden de apertura: DM 3,2,4,1
2	100%	100%	100%	100%	100%	100%	-	600	1372,5	Orden de apertura: CM1,2 - Abro solo para la limpieza de la zona de toma y luego cierro nuevamente
3	-	100%	100%	100%	-	-	-	450	1372	Cierro DM4. No vierte agua por DF
4	-	-	100%	100%	-	-	-	300	1372	Cierro DM3. No vierte agua por DF
5	-	-	100%	100%	100%	100%	-	300	1372	Orden de apertura: CM1,2 - Abro solo para la limpieza de la zona de toma y luego cierro nuevamente
6	-	-	-	100%	-	-	-	150	1371,5	Cierro DM2. No vierte agua por DF
7	-	-	-	-	100%	100%	-	100	1369	Cierro DM1. Orden de apertura: CM1,2
8	-	-	-	-	-	-	100%			Cierro CM. Abro toma hasta cargar desripiador. Abro CM hasta evacuar flujo. Repito pasos.

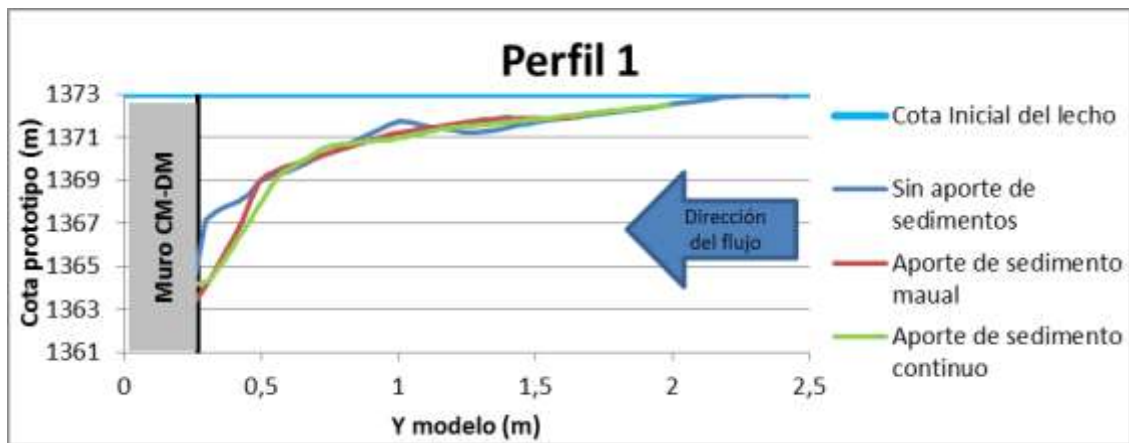
Bajo esta política, antes de proceder a la apertura del canal moderador (etapa 3), en sus proximidades se observa sedimento acumulado que, después de la apertura de estas compuertas, es arrastrado de manera eficaz y rápida. Análogamente a lo realizado para la política anterior, en este caso también se procedió a digitalizar las superficies obtenidas al final de cada ensayo. En la Figura 15 se presentan los resultados de los ensayos sin aporte, con aporte manual y aporte continuo respectivamente.



**Figura 15.-** Superficie digital del modelo cuando se espera la crecida con las compuertas abiertas sin aporte de sedimentos, con aporte de sedimentos manual y con aporte de sedimentos continuo.

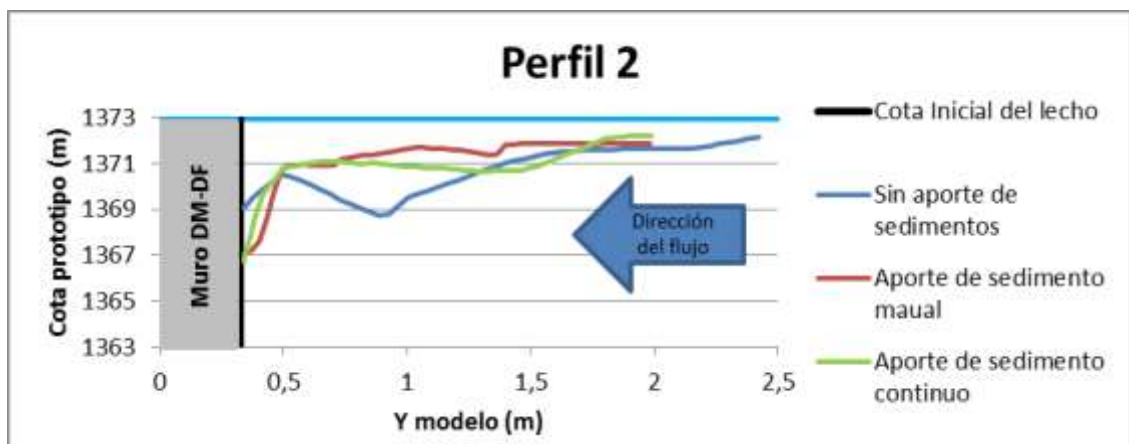
Comparando las superficies digitales de los ensayos, las cuales están en la misma gama de colores para la representación de las cotas, se puede distinguir que en los tres casos se conforman 3 canales de llamada hacia la obra con cotas aproximadas de 1371 m. En las inmediaciones de la obra se tiene una disminución de las cotas del lecho siendo la cota mínima observada, 1364 m en la zona del muro entre el canal moderador y el dique móvil. También se observa gran remoción en la cercanía de la guitarra que separa el dique fijo del dique móvil.

A continuación se presentan los perfiles generados mediante las superficies digitales:



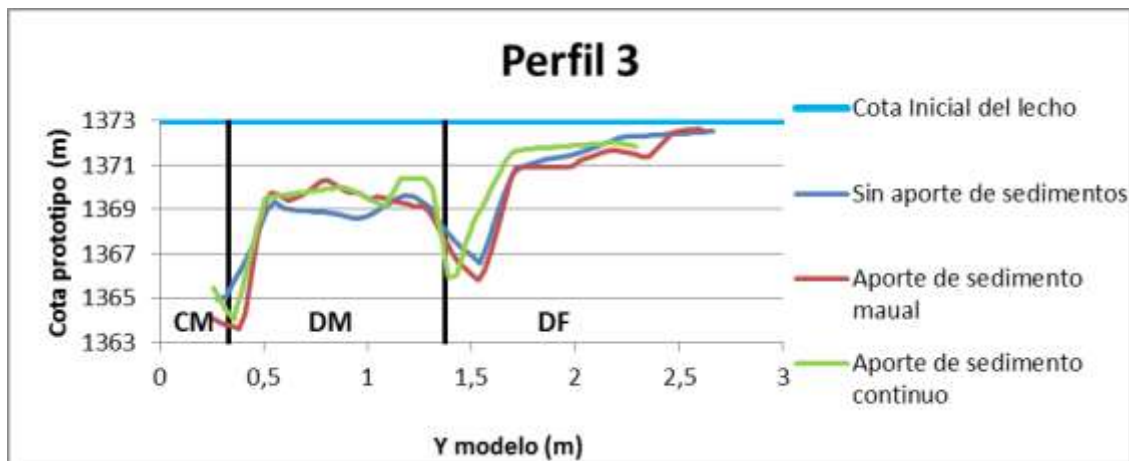
**Figura 16.-** Perfil 1. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas abiertas

En el perfil 1 no se observan grandes diferencias entre los tres casos. La mayor erosión local, como era de esperar, se da cerca del muro que separa canal moderador y dique móvil. En este perfil se grafica la cota mínima generada aguas arriba de este muro y en los tres casos ronda los 1364 m.



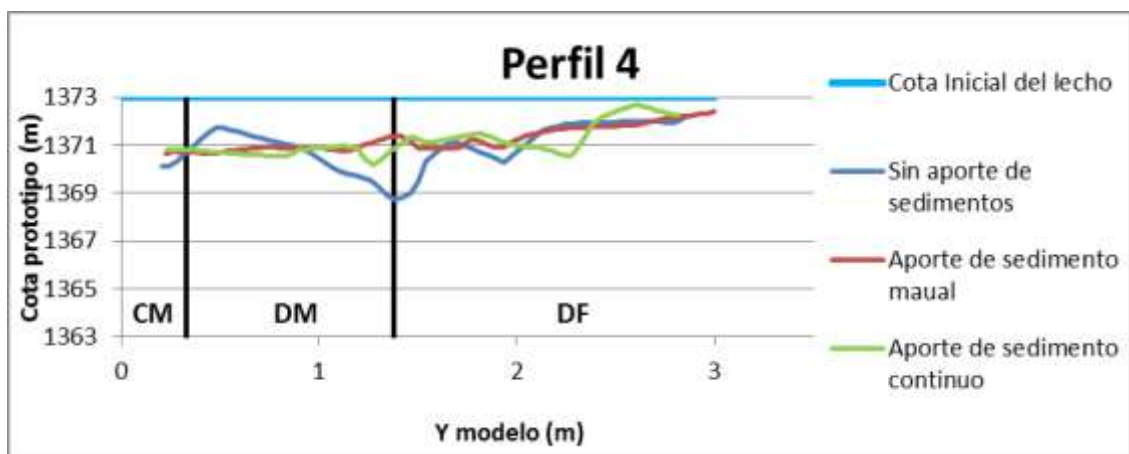
**Figura 17.-** Perfil 2. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas abiertas

Al analizar el perfil 2 se puede distinguir que la conformación general del lecho es similar, pero en el caso sin aportes de sedimentos, el canal de llamada hacia el canal moderador es más marcado, con una profundidad casi 2m mayor con respecto a los casos con aporte. No se distingue gran erosión en la guitarra ya que al ir avanzando el ensayo, se va realizando el cierre de las compuertas del dique móvil en forma progresiva desde la margen izquierda hacia la margen derecha y como en el final del ensayo solo permanece abierta la compuerta del dique móvil más alejada de la guitarra, no hay tanto efecto de la erosión local en este punto como ocurre con el ensayo con compuertas cerradas.



**Figura 18.-** Perfil 3. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas abiertas

Se puede observar que el perfil 3 casi no manifiesta grandes variaciones al realizar aportes de sedimentos. Los canales de llamada son muy similares y las cotas mínimas observadas, tanto en el muro que separa el canal moderador del dique móvil como en la guitarra que separa el dique móvil del dique fijo, son análogas (cerca de 1364 m y 1367 m respectivamente).



**Figura 19.-** Perfil 4. Ensayos en los que se espera la crecida con compuertas abiertas

En el perfil 4 se observan canales de llamada con la misma forma en los tres casos. En el caso sin aporte, el canal de llamada se halla más marcado que en los casos con aporte. La erosión generalizada es similar.

## CONCLUSIONES

En primer lugar, mediante la realización de esta etapa de trabajo, se confirmó que las dos políticas de operación analizadas cumplen los requerimientos y objetivos buscados a la hora de su desarrollo. Los tres aspectos funcionales fundamentales fueron:

- La capacidad de remoción de sedimentos aguas arriba de la obra.
- La configuración del cauce aguas arriba de la obra una vez finalizado el evento.
- La configuración del cauce en las inmediaciones de la obra de toma.

Se observó que en general las formas de fondo al final de cada ensayo son similares en los casos sin aporte de sedimentos, con aporte manual y con aporte continuo, tanto cuando se espera la crecida con las compuertas cerradas, como con las compuertas abiertas.

Se pudo apreciar una disminución en los canales de llamada formados para los casos con aportes de sedimentos, pero el lecho, a nivel general permanece similar al caso sin aportes. Lo mismo sucede cerca del canal moderador, y esto es importante de destacar ya que en esa zona se encuentra la obra de toma hacia el canal derivador, que debe estar limpia de sedimentos para la derivación de caudales. Teniendo en cuenta que este es uno de los objetivos del estudio realizado, se puede concluir que ambas metodologías de operación de compuertas analizadas obtuvieron resultados aceptables.

Luego de haber realizado un estudio del transporte de sedimentos en la cuenca y haber seleccionado la fórmula de Meyer – Peter y Müller como la más representativa del caso en estudio; se calcularon los caudales sólidos necesarios para los ensayos de las políticas de operación y se desarrolló una metodología experimental para la realización de los mismos. Al calcular el peso específico de la arena utilizada en el modelo mediante el empleo de las celdas de carga, se obtuvieron valores muy cercanos al utilizado para el cálculo del transporte de sedimentos, por lo que los caudales sólidos obtenidos teóricamente pudieron ser bien representados.

Al ensayarse los procedimientos con aporte de sedimentos de manera continua se obtuvieron resultados casi análogos respecto a los ensayos realizados con aporte manual; por lo que se concluye que la sensibilidad del lecho del modelo a la manera de realizar los aportes es poco significativa y en términos cualitativos ambos resultados son comparables.

Finalmente, es importante mencionar que el estudio realizado con aportes de sedimentos, es cualitativo. Que el fenómeno de transporte no puede ser representado bajo estas condiciones de similitud y que los resultados obtenidos solo permiten comparar ligeramente un extremo (sin aportes) y otro (con aportes), distinguiendo que los órdenes de magnitud de los fenómenos de remoción observados son similares y la configuración final del cauce, una vez aplicada cualquier política de operación, resulta de similares configuraciones en planta.