

EVALUACIÓN DE EROSIONES EXPERIMENTALES EN SALTOS ESQUÍ – DIQUE LOS MOLINOS (JUJUY)

**Matías Eder¹, Gerardo Hillman¹, Andrés Rodríguez¹, Nicolas Guillén¹, Paolo Gyssels¹,
Gonzalo Moya¹, Mariana Pagot¹, Carlos M. García¹, Mariano Corral¹, Leticia Tarrab¹,
H. Daniel Farias².**

¹Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEfyN), Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA). Av Filloy s/n, Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina.

²IRHi-FCEyT, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Santiago del Estero, Argentina.
E-mail: matiaseder2@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se presentan estudios experimentales realizados en el modelo físico del dique Los Molinos (Jujuy), construido en el Laboratorio de Hidráulica de la FCEfyN – UNC, el cual consiste en un modelo físico tridimensional (escala 1:65) con similitud de Froude, en el cual se presenta la caracterización de las erosiones locales aguas abajo de las distintas estructuras de descarga de la presa. Se presentan las técnicas y metodologías experimentales utilizadas para realizar los ensayos y la medición de las variables. Posteriormente se presentan las curvas de descarga de cada una de las estructuras y las relaciones observadas entre la profundidad máxima de erosión h_s y las principales variables involucradas en las expresiones empíricas (q y H). Finalmente, se comparan los resultados observados en un gráfico adimensional con datos observados en obras prototipo y curvas empíricas.

ABSTRACT

This work presents an experimental work on the physical model of the Los Molinos dam (Jujuy) built at Hydraulics Laboratory, FCEfyN – UNC, which consists of a 3D physical model (1:65 scale) designed using a Froude similarity. Estimates of local scour depths are reported downstream of the dam discharge. First experimental techniques and methodologies used for testing and measurement of variables. Subsequently the discharge curves (H - Q) of each of the structures and the observed relationships between the maximum depth of erosion (h_s) and the main variables of the empirical expressions arise (q and H). Finally, the results observed in a dimensionless graph data observed in prototype construction and empirical curves are compared.

INTRODUCCIÓN

El dique Los Molinos está ubicado sobre el Río Grande, pocos kilómetros aguas arriba de la ciudad de San Salvador de Jujuy y aproximadamente 1 Km aguas abajo de su confluencia con el Río Reyes. El objetivo de esta obra es derivar parte del caudal del río hacia una obra de toma que se ubica sobre la margen derecha y se utiliza para riego artificial.

La presa está constituida por tres estructuras de descarga, un vertedero con cota de descarga a nivel fijo, 1373msnm, (Dique Fijo, DF), un vertedero controlado por cuatro compuertas de sección circular (Dique Móvil, DM) y un canal de limpieza sobre la margen derecha de la presa (Canal Moderador, CM).

Desde su construcción hasta la actualidad la obra produjo un corte del flujo de sedimentos desde el sector aguas arriba hacia el sector aguas abajo, esto generó por un lado la colmatación del vaso de la presa y por otro dio lugar a un descenso generalizado del nivel del cauce aguas abajo de la presa, aproximadamente 8 m. Esta nueva situación se aparta de las condiciones de diseño originales y se manifiesta en un funcionamiento anómalo de las estructuras de descarga y de disipación. Por este motivo se proyectaron obras de re-funcionalización con el objetivo de adaptar la infraestructura existente a la nueva condición.

Una vez diseñadas las obras de re-funcionalización de la presa se construyó en el Laboratorio de Hidráulica de la FCEfyN de la UNC un modelo físico 3D para evaluar su funcionamiento hidráulico.

OBJETIVO

Se plantea como *objetivo general* de este estudio “estudiar procesos de erosión local aguas abajo de estructuras hidráulicas con saltos esqui” analizando particularmente el caso del Dique de Derivación Los Molinos (Jujuy).

Como *objetivos específicos* se propone:

- Estudiar el funcionamiento hidráulico de las estructuras de descarga,
- Caracterizar el flujo de aproximación a las estructuras,
- Analizar los resultados experimentales de la máxima profundidad de erosión y su relación con las principales variables que intervienen,
- Comparar los resultados observados en el modelo físico con los presentados por otros autores en casos similares.

MATERIALES Y MÉTODOS

El Modelo Físico fue diseñado para evaluar el funcionamiento hidráulico de las obras proyectadas. El cual consiste en un Modelo Tridimensional (3D), realizado en Escala no Distorsionada ($EL=1:65$), con Similitud de Froude y Fondo Mixto (fondo fijo en las márgenes y móvil en el cauce).

Con el objeto de definir los niveles de restitución a aplicar en el modelo físico para los diferentes escenarios hidrológicos, se realizó un modelo numérico con el programa de cálculo unidimensional HEC-RAS en régimen permanente. Se recurrió a esta herramienta debido a que no existe información histórica de niveles aguas abajo de la presa.

Con el objeto de analizar las variables que intervienen en los procesos de erosión, se realizó la caracterización hidráulica de las estructuras de descarga y del flujo de aproximación. Para lo cual se utilizó la técnica de Velocimetría por Seguimiento de Partículas (PTV) para determinar las velocidades, la distribución transversal y la dirección del flujo aguas arriba de las obras. Para el análisis de las imágenes se utilizó el software desarrollado en Matlab denominado PTVLab (Patalano et al, 2013).

Para determinar las curvas H-Q de cada una de las estructura de descarga. Se debe medir el caudal erogado por la estructura y la altura de energía H sobre la cresta del vertedero. Para ello, el modelo físico cuenta con escalas graduadas al milímetro, ubicadas en las márgenes derecha e izquierda de cada una de las obra de descarga (Figura 1). Por otro lado, para medir el caudal, el modelo físico cuenta con dos canales de aforo que permiten medir en forma independiente el caudal que ingresa por el río Grande y por el río Reyes. Además, antes del retorno del agua a la cisterna, en el modelo se construyó un tanque de aforo volumétrico que permite medir el caudal total que sale del mismo.



Figura 1.- Ubicación de escalas graduadas en DM y CM.

Para medir las erosiones locales en el modelo físico aguas abajo de la presa, se utilizó un nivel óptico y una escala graduada al milímetro, y se relevaron 3 perfiles paralelos al eje de la presa, (Figura 2):

“Perfil 1” al pie de la presa,

“Perfil 2” en el fondo del foso de erosión,

“Perfil 3” en el borde superior de la barra de sedimentos.

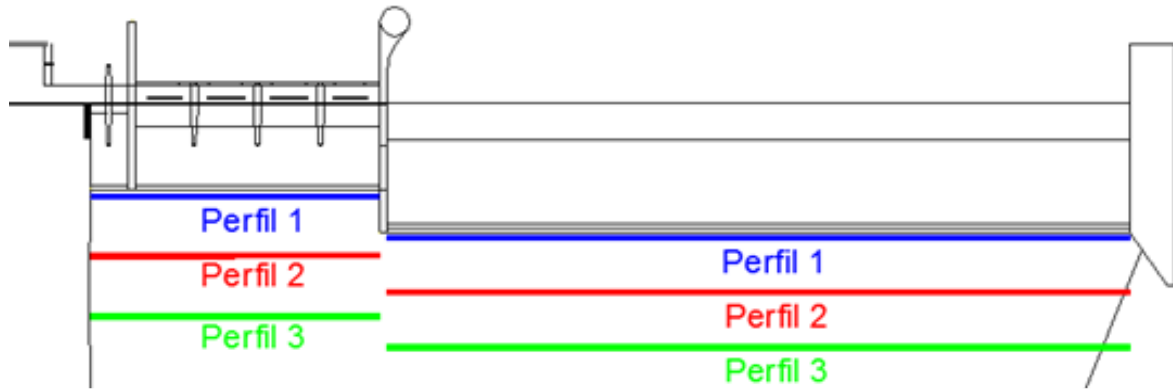


Figura 2.- Ubicación de perfiles paralelos al eje de la presa.

EVALUACIÓN DE RESULTADOS

La evaluación hidráulica de las estructuras de descarga permitió determinar las curvas H-Q para el CM (Figura 3), DM (Figura 4) y DF (Figura 5). Se observa que las curvas de descarga del CM y DM presentan un punto de inflexión, que corresponde al instante a partir del cual las compuertas comienzan a trabajar a presión.

En la Figura 6 se presentan las líneas de trayectorias medias aguas arriba del DM y CM para los caudales de 3200, 1800, 1400 y 600 m³/s obtenidas con la técnica PTV.

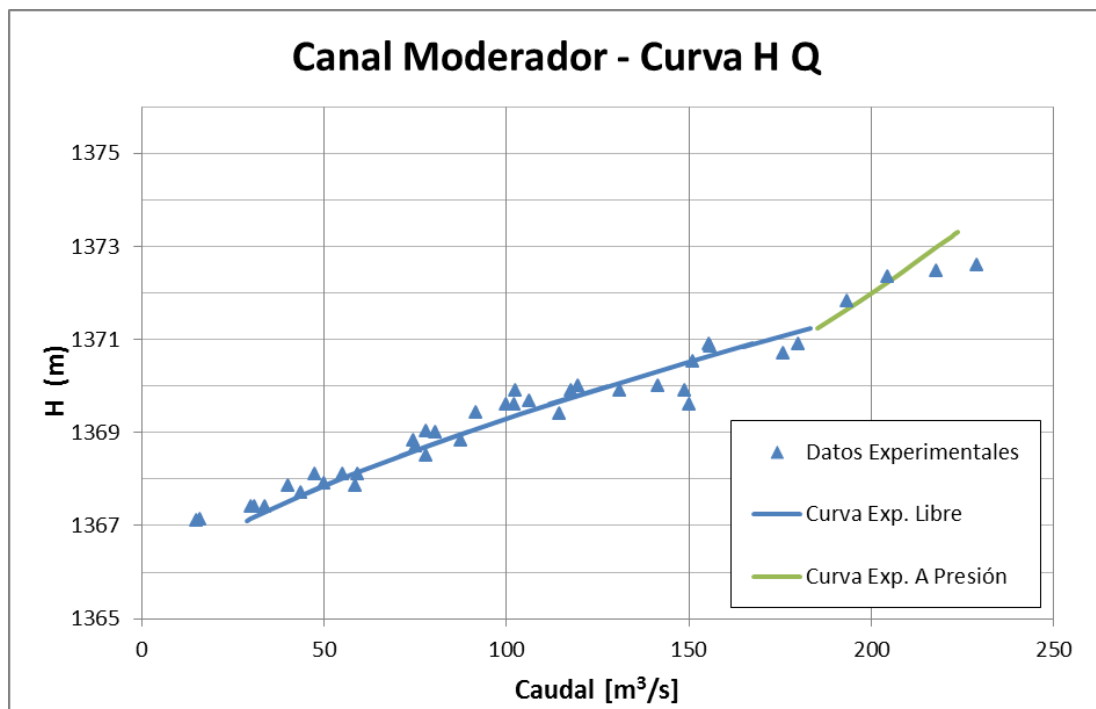


Figura 3.- Curvas H-Q del Canal Moderador.

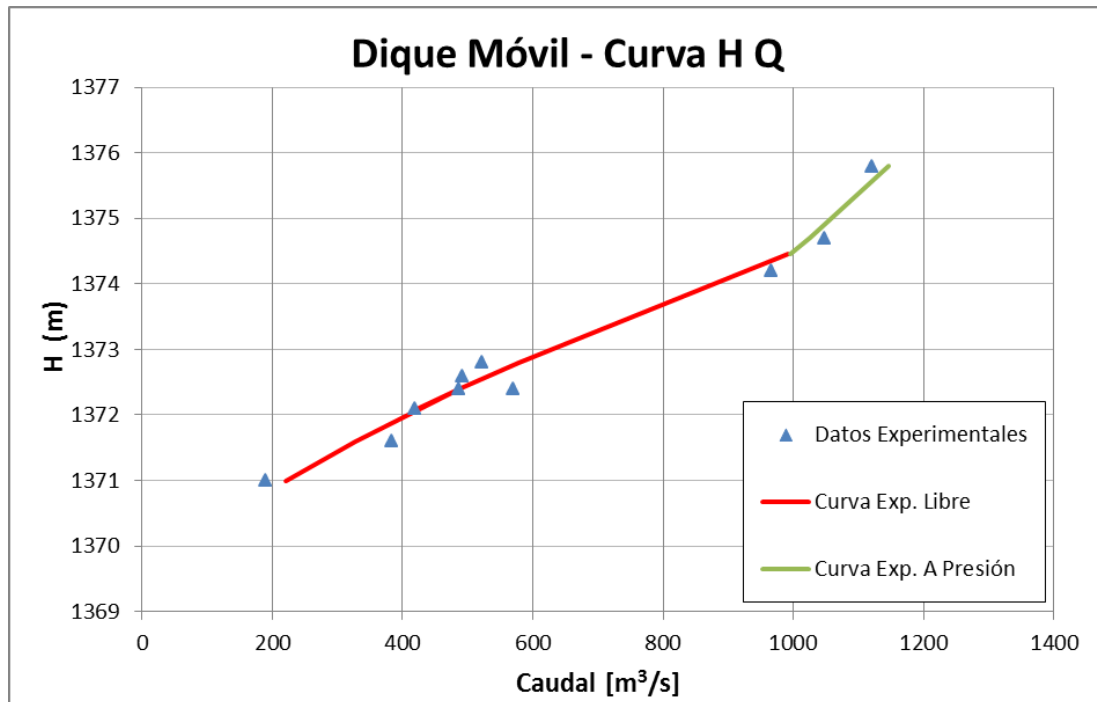


Figura 4.- Curvas H-Q del Dique Móvil.

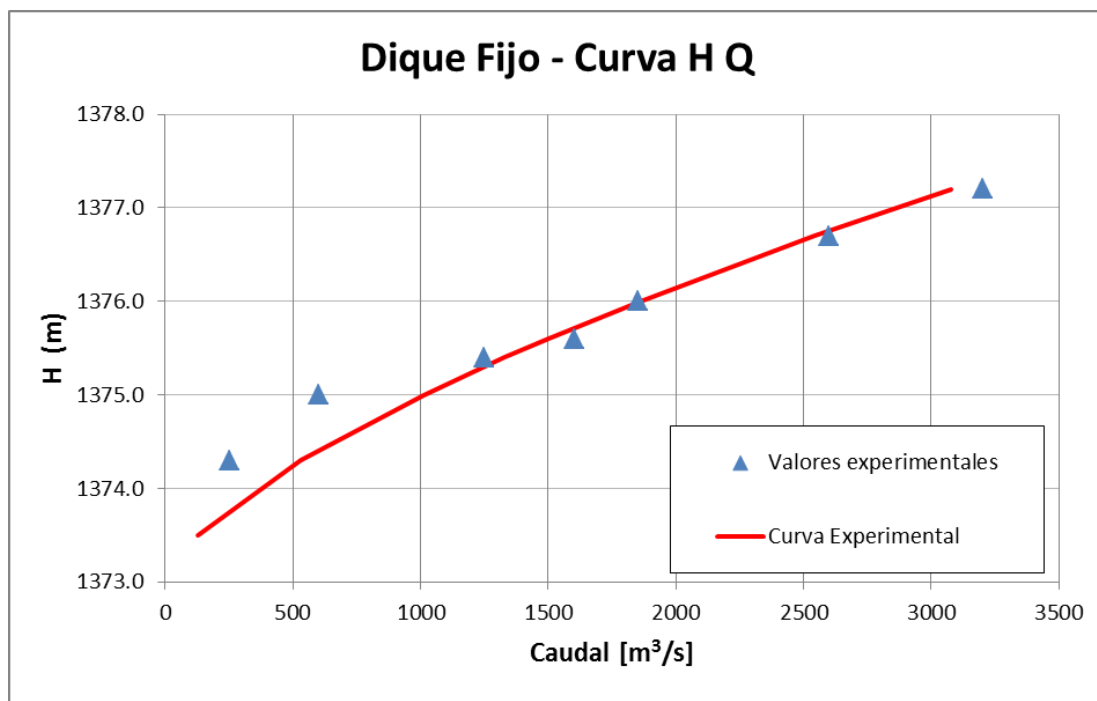


Figura 5.- Curvas H-Q del Dique Fijo.

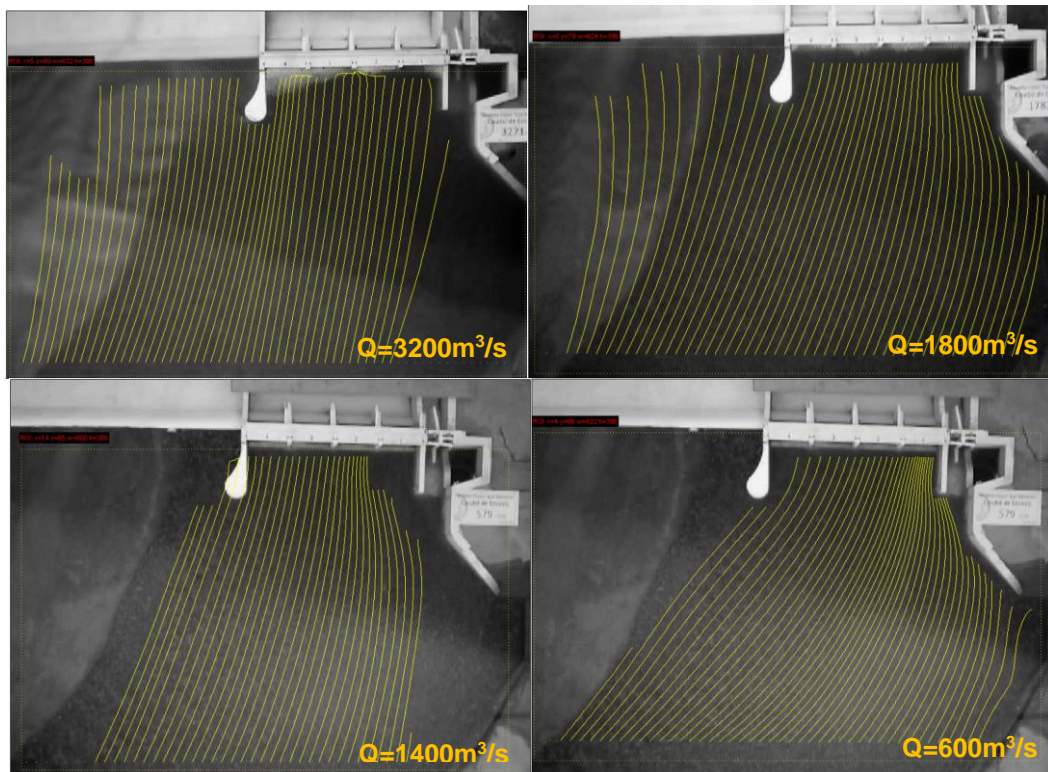


Figura 6.- Línea de trayectorias medias aguas arriba del DM y CM.

En la Figura 7 y 8 se presentan las relaciones observadas entre la máxima profundidad de erosión “hs” y los principales parámetros que intervienen en las fórmulas de erosión local aguas abajo de saltos esquí. Estos parámetros son el caudal específico “q” y la altura de energía “H” (diferencia entre el nivel de energía aguas arriba y aguas abajo de la presa).

Se observa que, para el rango de caudales ensayados, el DF presenta un comportamiento normal, es decir, muestra que al incrementar los valores de los parámetros q y H la profundidad de erosión (hs) aumenta. Sin embargo al analizar el DM y el CM se observa un comportamiento anómalo de las relaciones q-hs y H-hs.

Este comportamiento puede atribuirse a que las estructuras modifican su funcionamiento general a partir de un determinado valor de los parámetros analizados.

Se consideraron dos posibles “Motivos” por los cuales se produce este cambio en las relaciones analizadas:

Motivo 1: Se produce un cambio en la dirección con la cual el flujo ingresa a las estructuras de descarga. En la Figura 6 se puede observar que para caudales menores a $900 \text{ m}^3/\text{s}$ (nivel agua arriba menor a 1373 msnm) el flujo no escurre por el DF e ingresa al DM y CM en forma oblicua. Al incrementarse el caudal comienza a escurrir por el DF y las líneas de trayectoria se ubican en forma perpendicular al eje de la presa.

Motivo 2: Se produce un cambio en la ley de descarga de la estructura (Curva H-Q). En la fig 8 se puede ver que se produce un cambio en esta relación cuando las estructuras de descarga (compuertas) trabajan a pelo libre ó a presión.

A partir de las curvas H-Q se determinó el caudal que escurre por en Dique Móvil y Canal Moderador correspondiente a un nivel de pelo libre aguas arriba de las estructuras de 1373 msnm (Motivo 1), por otro lado se determinó para cada estructura el caudal para el cual las

compuertas comienza a funcionar a presión (Motivo 2). Por otro lado se determinó para el caudal total el nivel de restitución, la velocidad media aguas arriba de cada una de las estructuras y se calculó la altura de energía (H) correspondiente a cada uno de los motivos y estructuras analizadas.

En la Tabla 1 se presenta el caudal (Q) escurriendo por cada una de las estructuras, su correspondiente caudal específico (q) y la altura de energía (H) para los dos motivos analizados.

En la Figura 7 se puede observar que el cambio en la relación q-hs para el Canal Moderador y en Dique Móvil se dan para caudales específicos de aproximadamente 15 y 18.5 m²/s respectivamente. Esto muestra que el Motivo 2 tienen un efecto significativo, no se observa en este grafico un efecto apreciable debido al Motivo 1, cuyos caudales específicos son 22.5 y 10.8 m²/s.

En la Figura 8 se puede observar la relación entre hs y H, para esta situación el cambio en el comportamiento se da para valores de H entre 12.3 y 13.5 m para ambas estructuras. En este rango de valores se encuentran tanto el Motivo 1 como el Motivo 2, es decir que el cambio en la relación H-hs puede atribuirse tanto al Motivo 1 como al Motivo 2.

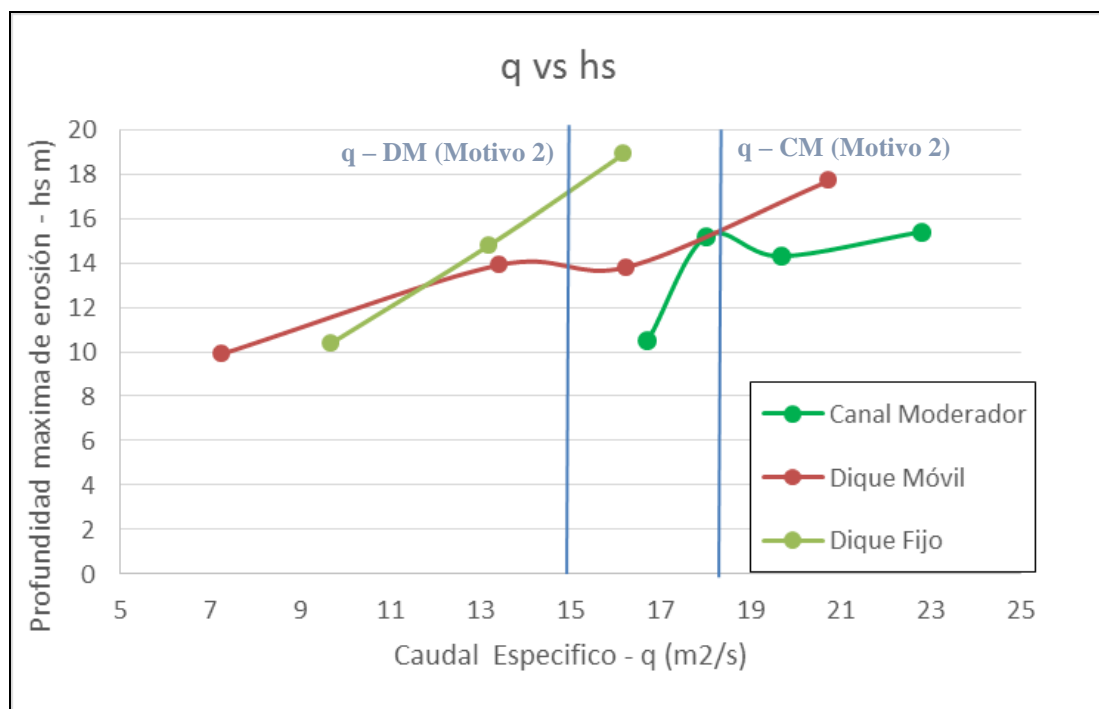


Figura 7.- Relación experimental q-hs para el CM, DM y DF.

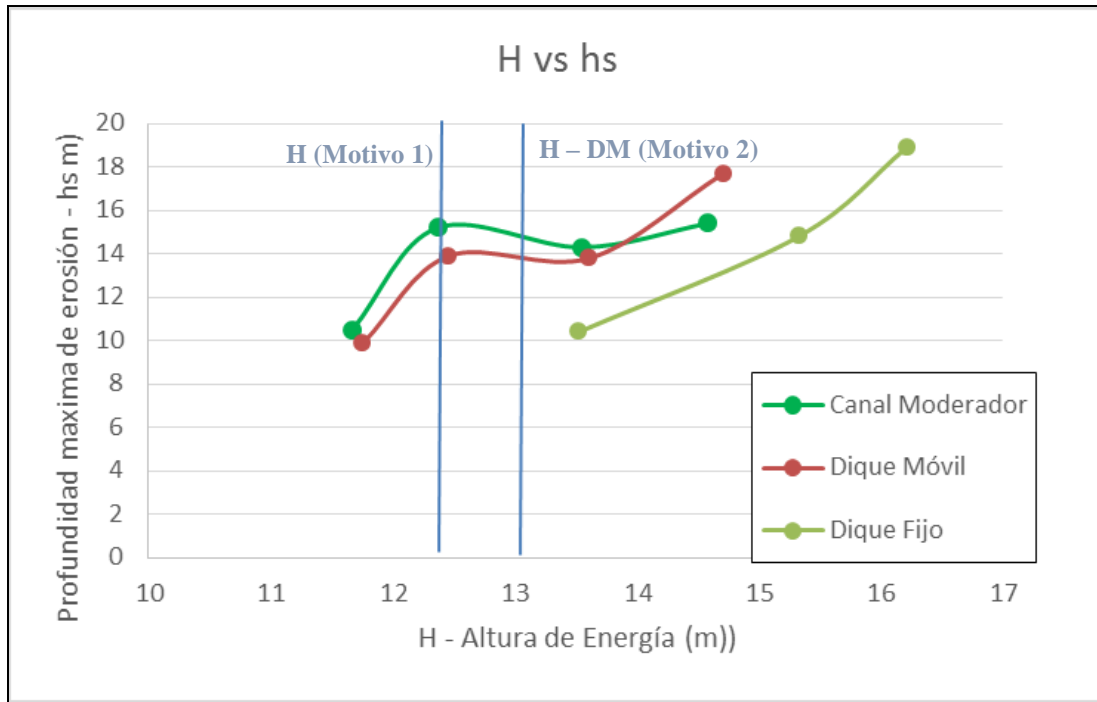


Figura 8.- Relación experimental H-hs para el CM, DM y DF.

Tabla 1.- Valores de q y H para los 2 motivos de cambio de funcionamiento de las estructuras.

Motivo 1			Motivo 2		
Estructura	Q (m ³ /s)	q (m ² /s)	Estructura	Q (m ³ /s)	Q (m ² /s)
CM	225	22.5	CM	180	18
DM	650	10.8	DM	900	15
Estructura	Cota msnm	H m	Estructura	Cota msnm	H m
CM	1373	12.3	CM	1371.5	11.8
DM	1373	12.3	DM	1374	13

Con el fin de comparar los resultados de erosiones máximas h_s observados para las diferentes estructuras con resultados expuestos en casos similares, se utilizó el gráfico presentado por Lopardo (2005) en el cual se relacionan las variables analizadas en un gráfico adimensionalizando. En la Figura 8 se presenta dicho gráfico el cual nos permite apreciar las curvas correspondientes a la expresión del INCYTH, los puntos experimentales de erosiones en obras prototipo (Ptos exp.), la envolvente dada en la expresión de diseño propuesta por Lopardo y los resultados obtenidos en este trabajo para cada una de las estructuras.

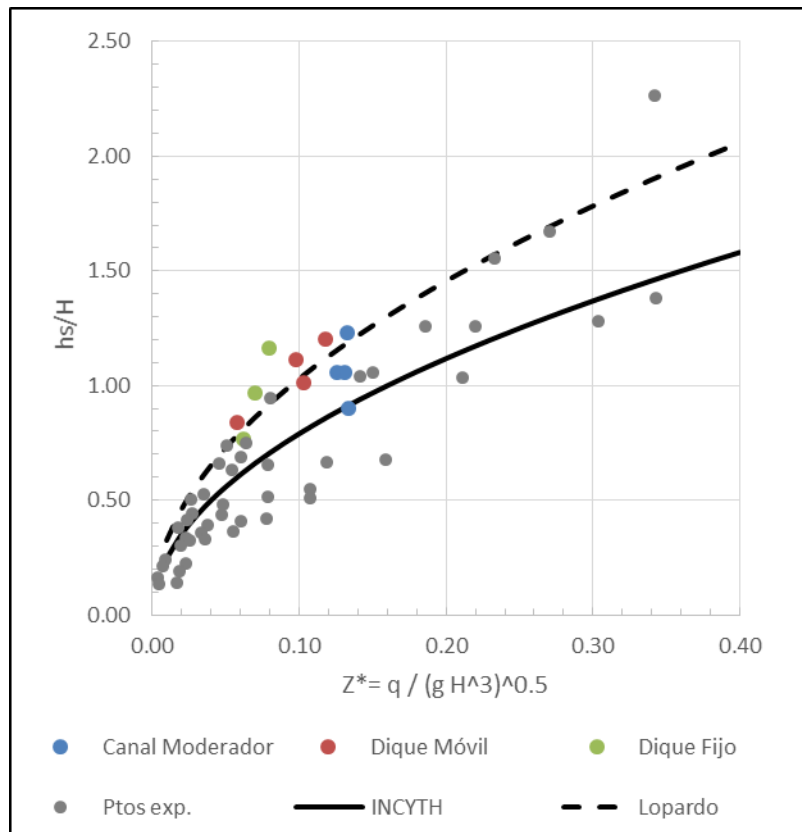


Figura 9.- Gráfico adimensional de las variables consideradas.

CONCLUSIONES

Se concluye que la profundidad máxima de erosión (h_s) no solo depende de los valores del caudal específico (q) y de la altura de energía (H) sino también de las condiciones del flujo de aproximación, es decir de la distribución del flujo a lo largo de las estructuras y de la dirección con la cual ingresa las mismas.

Al comparar los resultados obtenidos en el gráfico adimensionalizado de la Figura 9 con puntos experimentales en obras prototipo, se observa que los puntos medidos en el modelo físico del Dique Los Molinos (Jujuy) se encuentran próximos a la envolvente propuesta por Lopardo y en algunos casos la relación h_s/H es superior. Esto se atribuye a la tridimensionalidad del flujo en la zona de aproximación a las obras y al cambio en la relación $H-Q$ por trabajar las compuestas como orificios. A partir de este instante la altura H presenta grandes incrementos con menores variaciones de Q y dado que Z^* varía con H elevado a un exponente de 1.5 estas relaciones también se modifican.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Patalano, A. (2013). "PTVlab, una herramienta gráfica para el procesamiento digital en velocimetría por seguimiento de partículas" - *III simposio sobre métodos experimentales en hidráulica, Santa Fe, Argentina.*

Lopardo, R. (2005). "Erosión local aguas abajo de estructuras hidráulicas", *Curso sobre: Hidráulica Experimental Aplicada a Estructuras*, Ciudad Real, España.