

# Cuantificación de erosiones aguas abajo del modelo físico de la presa Los Molinos (Jujuy)

*Matías Eder<sup>1</sup>, Mariano Corral<sup>1</sup>, Gerardo Hillman<sup>1</sup>, Mariana Pagot<sup>1</sup>, Paolo Gyssels<sup>1</sup>, Carlos M. García<sup>1</sup>, Andrés Rodríguez<sup>1</sup>, Gonzalo Moya<sup>1</sup>, José M. Díaz Lozada<sup>1</sup>, Lucas Quiroga<sup>1</sup>, Nicolás Guillén<sup>1</sup>, H. Daniel Farías<sup>2</sup>.*

<sup>1</sup> Centro de Estudios y Tecnología del agua (CETA), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina

<sup>2</sup>IRHi-FCEyT, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Santiago del Estero, Argentina.

Mail de contacto: 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 FCEyN – UNC, el cual consiste en un modelo físico tridimensional (escala 1:65) con similitud de Froude, los estudios tienen como objetivo la caracterización de erosiones locales aguas abajo de la presa para diferentes escenarios de modelación.

En primera instancia se realiza una descripción de la presa y de sus estructuras de descarga (Dique Fijo, Dique Móvil y Canal Moderador). Posteriormente se presentan las características del modelo físico y el método de selección del material granular del fondo móvil, describiendo las consideraciones realizadas para garantizar la correcta representación del fenómeno en el modelo.

Se describen las dos técnicas de medición de erosión utilizadas durante la ejecución de los ensayos y finalizados los mismos. Por un lado, se utilizó la medición tradicional, que consiste en relevar las erosiones con nivel óptico y escala milimétrica y por otro, se utilizó una nueva técnica digital de medición a partir del relevamiento de las profundidades medidas con una cámara RGB-D, Kinect de Microsoft.

Finalmente se presenta la comparación de los resultados obtenidos en los ensayos experimentales con los obtenidos de aplicar diferentes formulaciones matemáticas presentes en la literatura.

## INTRODUCCIÓN

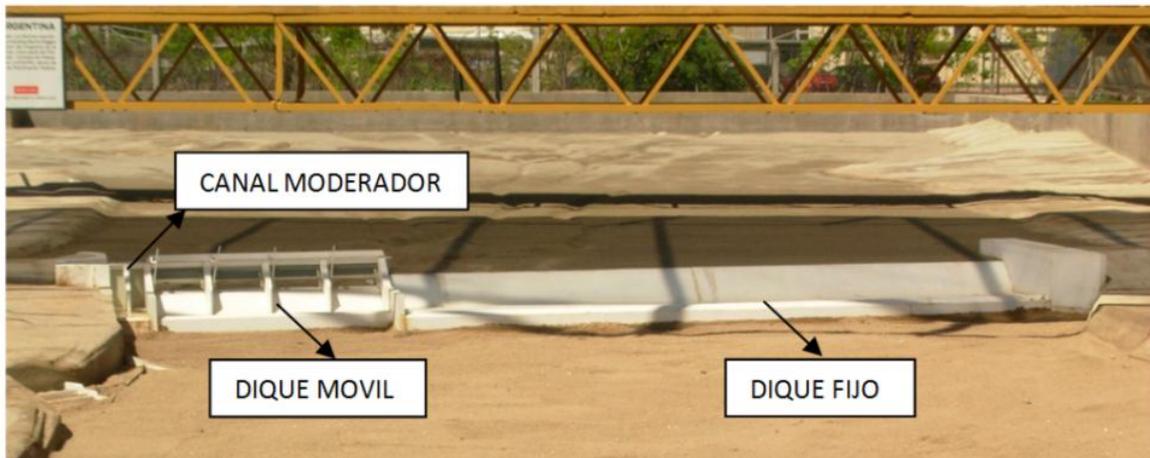
La presa de derivación Los Molinos está ubicada sobre el Río Grande, pocos kilómetros aguas arriba de la ciudad de San Salvador de Jujuy y aproximadamente 1 Km aguas abajo de la confluencia con el Río Reyes. Su principal finalidad es la derivación de agua hacia el canal Río Grande que se utiliza para riego artificial.

La presa está constituida por tres estructuras de descarga, un vertedero con cota de descarga a nivel fijo (Dique Fijo “DF”) de 200 m de longitud, un vertedero controlado por cuatro compuertas de tipo segmento circular (Dique Móvil “DM”) de 70 m de longitud y un canal de limpieza adjunto a este sobre la margen derecha (Canal Moderador “CM”) de 10 m de longitud.

La interposición de la presa de derivación Los Molinos en el Río Grande ha originado un corte del flujo de sedimentos desde el sector aguas arriba de la presa hacia el sector aguas abajo. Esto generó la colmatación

del vaso de la presa y complementariamente dio lugar a un proceso de erosión generalizada del lecho aguas abajo de aproximadamente 3 a 4 m. Esta nueva situación se aparta de las condiciones de diseño de la obra original, lo cual se traduce en un comportamiento anómalo de las estructuras hidráulicas.

Por lo expuesto se proyectaron obras de re-funcionalización de las estructuras de descarga y para evaluar el diseño propuesto se construyó en el Laboratorio de Hidráulica de la FCEfyN - UNC un modelo físico tridimensional (escala 1:65) con similitud de Froude (Figura 1).



**Figura 1.-** Modelo Físico de la Presa Los Molinos (Jujuy).

## CONDICIONES EXPERIMENTALES ENSAYADAS

Para caracterizar la erosión local crítica se definieron diferentes escenarios de modelación. Estos se pueden clasificar en ensayos de caudales máximos y ensayos de despegue, se analizaron además dos caudales intermedios.

A continuación se describen los escenarios ensayados en el modelo físico:

### 1. Ensayos de caudales máximos:

- Caudal de  $900 \text{ m}^3/\text{s}$  (período de retorno TR menor a 5 años) que corresponde al máximo caudal que pueden evacuar el Dique Móvil y Canal Moderador antes de que el agua comience a escurrir por el dique fijo.
- Caudal de  $3200 \text{ m}^3/\text{s}$  (TR de aproximadamente 500 años) con compuertas totalmente cerradas y pasante solo por el Dique Fijo.
- Caudal de  $4200 \text{ m}^3/\text{s}$  (TR de 10000 años) con las compuertas del Dique Móvil y Canal Moderador totalmente abiertas.

2. Ensayos de despegue, corresponden a los caudales mínimos que generan la separación del chorro de agua de la estructura de descarga, los cuales pueden generar erosiones locales al pie de la presa mayores a las

producidas por los caudales máximos:

- Caudal de 90 m<sup>3</sup>/s escurrido solo por el Canal Moderador (con las compuertas del Dique Móvil cerradas).
- Caudal de 220 m<sup>3</sup>/s solo por Dique Móvil con todas sus compuertas abiertas y las del Canal Moderador completamente cerradas.
- Caudal de 600 m<sup>3</sup>/s por el Dique Fijo con todas las compuertas del Dique Móvil y Canal Moderador cerradas, al realizar el ensayo se observó que la separación del flujo solo se daba sobre la margen derecha donde se concentra el mayor caudal específico, se atribuye este fenómeno a la tridimensionalidad del flujo de aproximación a la presa.

3. Ensayos de caudales intermedios, correspondientes a caudales con recurrencias bajas:

- Caudal de 1600 m<sup>3</sup>/s escurriendo por el Canal Moderador, Dique Móvil y Dique Fijo (con todas las compuertas abiertas), TR aproximadamente 20 años.
- Caudal de 600 m<sup>3</sup>/s escurriendo solo por el Canal Moderador y Dique Móvil (con todas las compuertas abiertas), TR de 2 años.

**Tabla 1.-** Escenarios ensayados.

Ensayo		Caudal Total (m <sup>3</sup> /s)	Caudal Grande (m <sup>3</sup> /s)	Caudal Reyes (m <sup>3</sup> /s)	Motivación
Ensayos de Caudales Máximos	N°1	900	594	306	Caudal Máximo Dique Móvil (DM) y Canal Moderador (CM)
	N°2	3200	1088	2112	Caudal Máximo Solo Dique Fijo (DF)
	N°3, 7, 9	4200	2772	1428	Caudal para Periodo de Retorno T=10000 años
Ensayos de Despegue	N°4	90	90	-	Caudal de Despegue Canal Moderador (CM)
	N°5	225	225	-	Caudal de Despegue Dique Móvil (DM)
	N°10	600	600	-	Caudal de Despegue Dique Fijo (DF)
Ensayos de Caudales Intermedios	N° 11	1600	1066	534	Caudal de Verificación DF, DM y CM
	N° 12	600	400	200	Caudal de verificación DM y CM

## GRANULOMETRÍA DEL LECHO

Para representar el lecho móvil en el modelo se ha utilizado un material natural de la misma densidad y de características clásticas similares a las que se encuentran hoy en prototipo, cuya curva granulométrica llevada a escala 1:65 se denomina aquí “curva ideal”. Para pasar de la constitución ideal a la real a emplear en el modelo, es necesario tener en cuenta las siguientes limitaciones:

1) Escalar todos los diámetros de la curva granulométrica implica que una parte importante de ella, aproximadamente el 35%, esté constituida por material pasante Tamiz 200 (diámetros inferiores a 75 micrones) por este motivo no se consideró esta fracción de la curva.

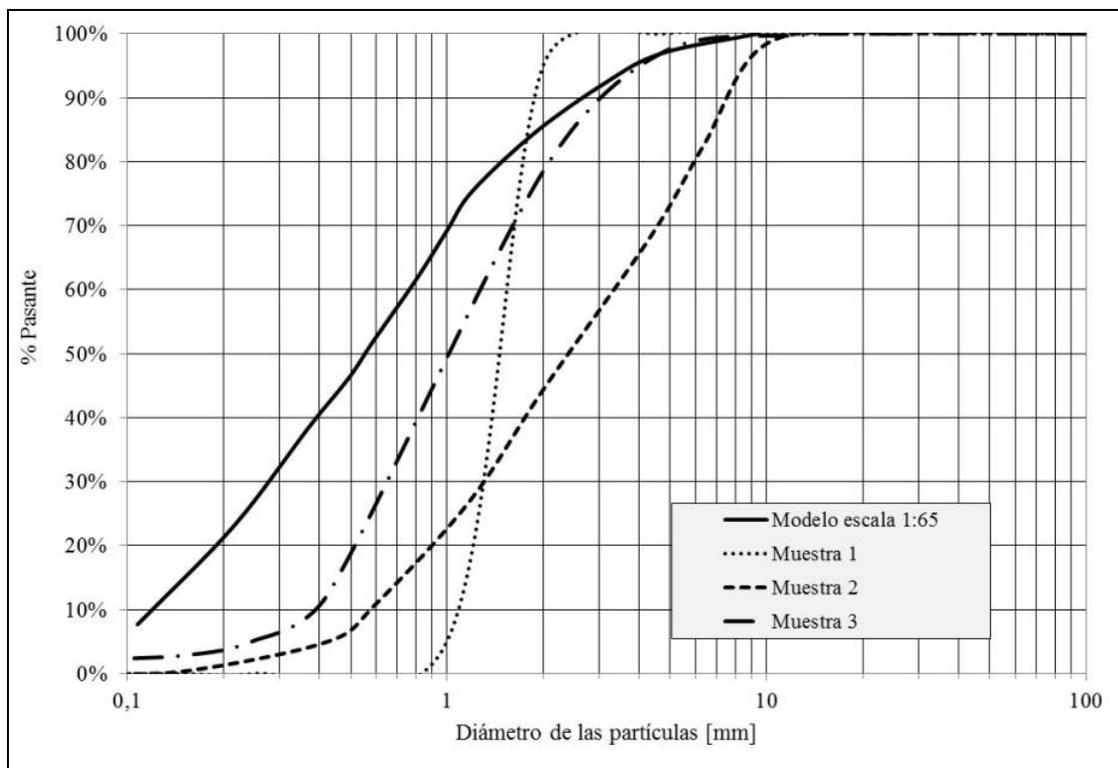
2) Para diámetros menores a 0,6mm se generan formas de fondo que modifican la macrorugosidad del cauce. Estas pueden afectar significativamente la representatividad del fenómeno. Por esta razón se consideró como diámetro mínimo admisible 0,6mm.

Se analizaron 3 muestras diferentes las cuales se han preparado por cribado, separación, selección y mezclado de los agregados. Obteniéndose las curvas granulométricas que se presentan en la Figura 2:

a) Muestra 1: arena seleccionada (1 – 2 mm);

b) Muestra 2: arena gruesa (0,6 – 4mm) mezclada con grava fina (hasta 12mm);

c) Muestra 3: arena gruesa (0,6 – 4mm).



**Figura 2.-**Granulometría de las muestras, UNC (2012).

Para seleccionar la muestra que finalmente se utilizó en el modelo para realizar los ensayos, además del análisis de la granulometría, se han tenido en cuenta las siguientes premisas:

- El objetivo de los ensayos ha sido estimar la erosión local aguas abajo de la presa, variable que en las expresiones empíricas depende del  $d_{85}$ - $d_{90}$  o incluso en algunas fórmulas no depende del diámetro.
- No son objetivos de los ensayos evaluar el proceso de acorazamiento ni el transporte de sedimentos o erosión general del cauce.
- No se ha considerado aporte de sedimentos, tomando como hipótesis para estos ensayos “aguas claras”.
- La rugosidad del lecho en ríos de grava depende de los diámetros de la fracción más gruesa ( $d_{84}$ ,  $d_{90}$ ), en este caso en particular dado que la granulometría es extendida resulta muy probable que se produzca “acorazamiento”. Esto implica un aumento de la rugosidad del cauce ya que se incrementa el diámetro medio debido a la coraza.
- A nivel de macroformas fluviales, se debe observar aguas abajo de la fosa de erosión la formación de una barra de sedimentos, constituida por el material grueso removido por el impacto del chorro de agua.

Para verificar cuál de las muestras es la que mejor reproduce el fenómeno se han ensayado las tres muestras en el modelo. Los resultados observados en estos ensayos se resumen a continuación:

Muestra 1: No se generó la barra de sedimentación y/o contención aguas abajo de la fosa de erosión, por esta razón la erosión continuó indefinidamente en el tiempo, es decir, no se estabilizó. Se concluye que esta muestra no reproduce satisfactoriamente el fenómeno, por lo que fue descartada.

Muestra 2: Se generó la barra de sedimentación y/o contención, lo que resultó en un ensayo estable en el tiempo. Sin embargo se formó una coraza en el talud de aguas abajo del foso de erosión y en la barra de sedimentos con un diámetro medio de 8 mm y máximo de 12 mm, equivalentes a 520 y 780 mm en prototipo (Figura 3) este material se encuentra en prototipo en forma aislada por lo tanto no se tiene certeza de que exista en suficiente cantidad como para formar esta coraza.



**Figura 3.-**Acorazamiento con diámetro medio de 8mm y máximo de 12mm.

Muestra 3: Se generó la barra de sedimentación y el ensayo resultó estable. Además se produjo la coraza en el talud de aguas abajo y en la barra de sedimentos con un diámetro medio de 4 mm, equivalentes a 260mm en prototipo (Figura 4).

Finalmente la Muestra 3 ha sido la seleccionada para representar el lecho móvil en el modelo ya que es la que mejor reproduce el fenómeno, UNC (2012).



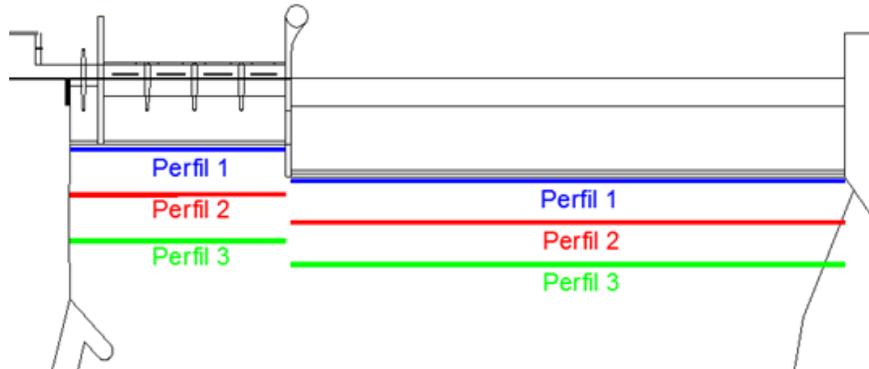
**Figura 4.-**Barra de sedimentos aguas abajo del foso de erosión, ensayo N°1 – 900 m<sup>3</sup>/s.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

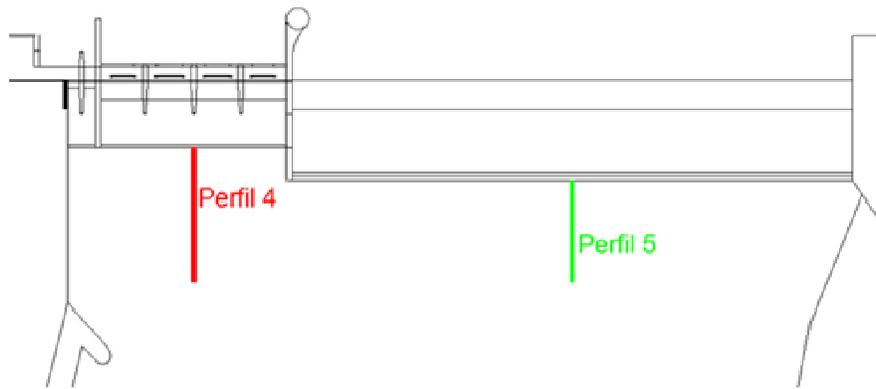
Durante la realización de los ensayos se monitoreó periódicamente (con intervalos de tiempo mayores a medida que avanzaba el desarrollo del ensayo) la evolución de la erosión en el tiempo, para ello se relevó la profundidad de erosión con nivel óptico en seis puntos al pie de la presa y en otros seis al fondo del foso de erosión, estas mediciones se realizaron en todos los ensayo hasta que la erosión se estabilizó. Luego se desactivó el modelo en forma controlada, para evitar efectos de apagado, y una vez drenado por completo el modelo se procedió a realizar las mediciones finales de las erosiones, estas mediciones se realizaron utilizando dos técnicas diferentes:

a) Medición Tradicional: Consiste en un relevamiento convencional de puntos sobre perfiles longitudinales y transversales, utilizando un nivel óptico y una escala graduada al milímetro. Se definieron tres perfiles paralelos al eje de la presa para realizar las mediciones: Perfil 1 al pie de la presa; Perfil 2 en el fondo del foso de erosión; Perfil 3 en la barra de sedimentos (Figura 5) y dos perfiles perpendiculares a estos: Perfil 4 en el Dique Móvil; Perfil 5 en el Dique Fijo (Figura 6).

b) Medición Digital: Se realizaron utilizando una cámara RGB-D (siglas en inglés de Rojo, Verde, Azul – Profundidad). Específicamente se utilizó una cámara Kinect fabricada por Microsoft y desarrollada en el año 2010.



**Figura 5.**-Ubicación de perfiles paralelos al eje de la presa para medir las erosiones finales.



**Figura 6.**-Ubicación de perfiles transversales al eje de la presa para medir las erosiones finales.

La metodología de medición con esta cámara se basa en la capacidad del sensor que emite un laser y por medio de otro sensor recepta la respuesta de este, registrando un plano de profundidades (el sensor KINECT consiste en un emisor laser infrarrojo, una cámara infrarroja y una cámara óptica RGB).

El procesamiento de estos datos de profundidades, se completa con la generación de una superficie tridimensional aplicando un modelo de triangulación.

Los datos relevados con la cámara Kinect representan una matriz de 640 x 480 pixeles, lo que en prototipo equivale a una superficie relevada digitalmente de 85 m x 54 m. Esta superficie cuenta con una resolución de 307200 puntos, adquiriendo así cada pixel un tamaño espacial de 12 cm promedio (X=11,3 cm e y= 13 cm). (Bellino et al. 2013).

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de aplicar las distintas técnicas de medición para el ensayo N°3 – correspondiente a un caudal de 4200 m<sup>3</sup>/s y posteriormente se muestra un resumen de las erosiones críticas obtenidas para todos los ensayos realizados.

En la Figura 7 se observa la evolución de la erosión en el tiempo, el eje de abscisas representa el tiempo a partir del instante en el que el agua comienza a pasar por la presa y en ordenadas se muestra la cota del fondo del foso de erosión medido con nivel óptico durante la ejecución del ensayo en los seis puntos de monitoreo.

En la Figura 8 se puede apreciar la erosión final, obtenida aplicando el método tradicional de medición en los tres perfiles paralelos al eje de la presa (Figura 4) desde margen derecha hasta margen izquierda.

En la Figura 9 se observa el resultado de la erosión medida con la cámara Kinect donde se aprecia un perfil paralelo al eje de la presa que pasa por el fondo del foso de erosión.

En la Figura 10 se comparan los resultados obtenidos en el relevamiento de las erosiones finales utilizando las dos técnicas experimentales (convencional y digital) en el perfil 2 paralelo al eje de la presa y cuya localización se indica en la Figura 4. Se observa una buena correlación entre las magnitudes obtenidas con ambos métodos de medición pero la cámara digital Kinect generando información con mayor resolución espacial que con el nivel óptico.

En las tablas 2, 3 y 4 se presentan los resultados de las erosiones críticas, se detallan las cotas (expresadas como cotas en prototipo) y las profundidades de erosión tanto al pie de la presa como en el foso de erosión para el Canal Moderador, Dique Móvil y Dique Fijo.

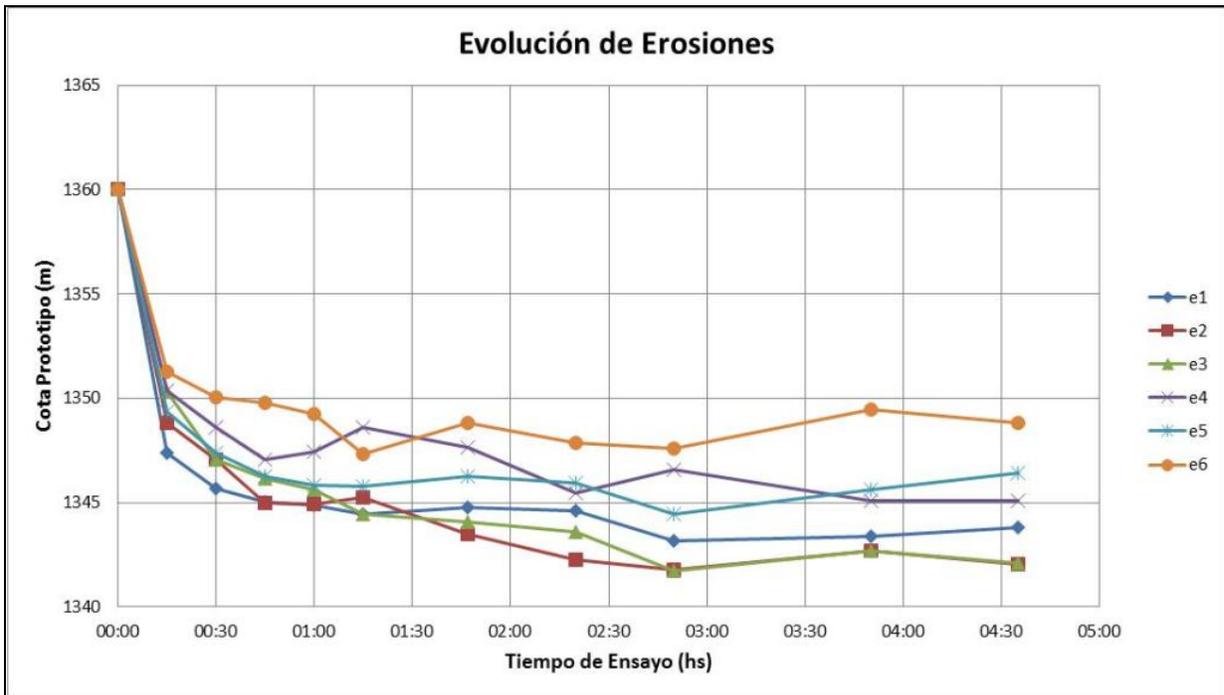


Figura 7.-Evolución temporal de la erosión en seis puntos de medición situados en la fosa de erosión (Ensayo N°3 – 4200 m<sup>3</sup>/s), UNC (2012).

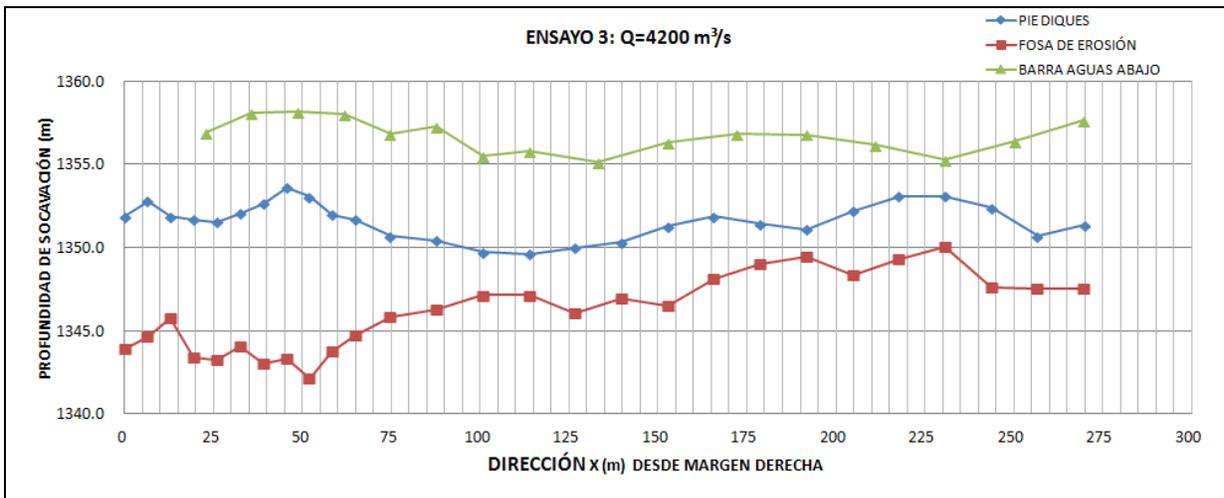
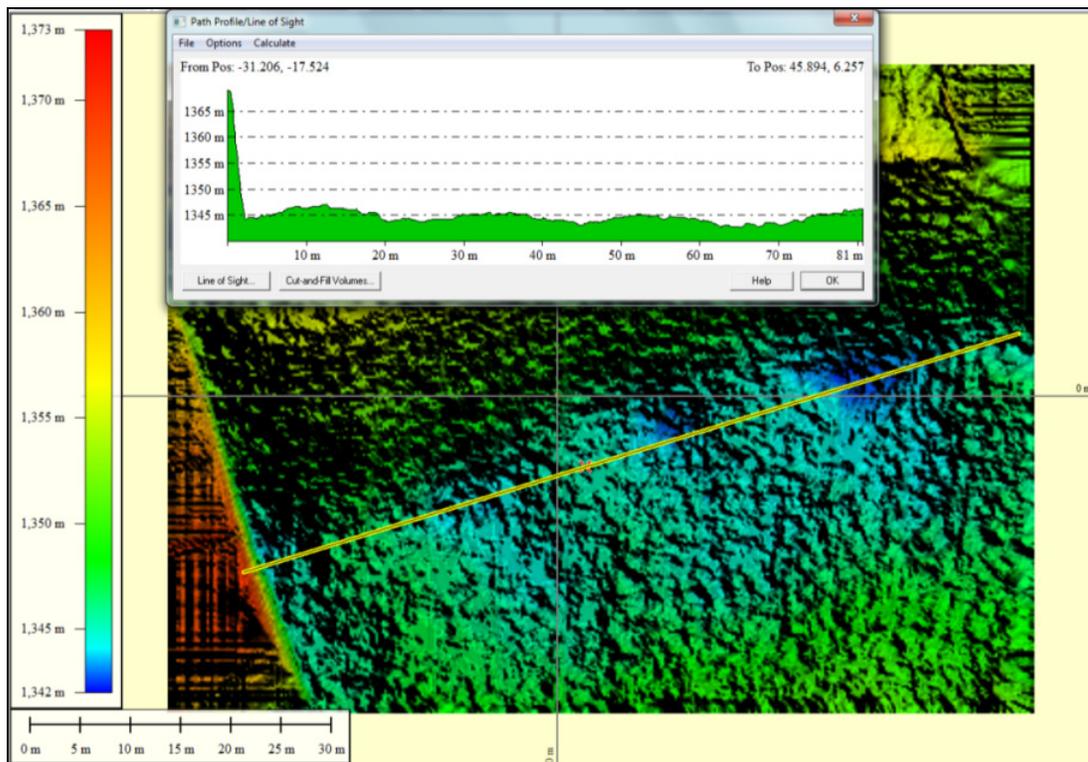
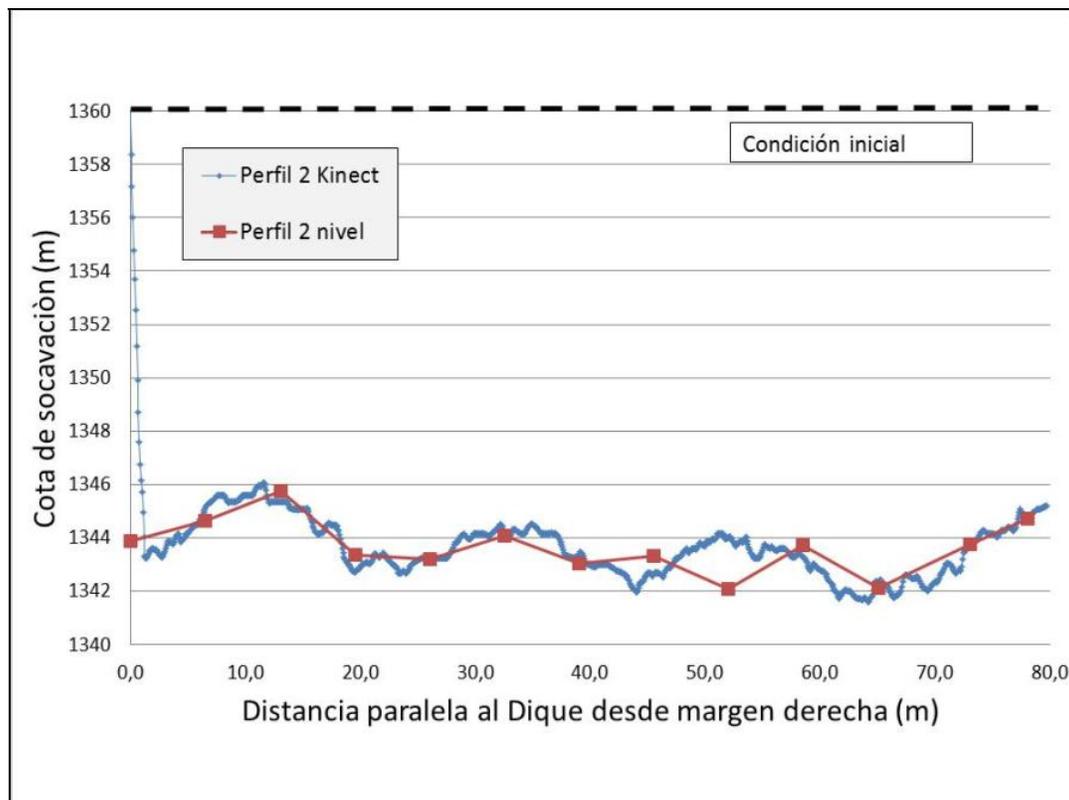


Figura 8.-Erosión final en los tres perfiles paralelos al eje de la presa (Ensayo N°3 – 4200 m<sup>3</sup>/s), UNC (2012).



**Figura 9.-** Perfil paralelo a la presa, en correspondencia con el foso de erosión. Ensayo N°3 – 4200 m<sup>3</sup>/s en la zona del CM y DM, UNC (2012).



**Figura 10.-** Comparación de resultados obtenidos con el método tradicional y con la cámara digital Kinect (Perfil paralelo al eje de la presa, “Perfil 2” Caudal – 4200 m<sup>3</sup>/s), UNC (2012).

**Tabla 2.-** Erosiones críticas al pie y en el foso de erosión para la zona aguas abajo del Canal Moderador, expresadas como cotas en prototipo.

	<b>Ensayo</b>	<b>Cota de erosión máxima (m)</b>	<b>Profundidad de erosión (m)</b>
Pie del Dique	Despegue – 90m <sup>3</sup> /s	1351	9
Foso de Erosión	Caudal Máx. – 4200m <sup>3</sup> /s	1344.6	15.4

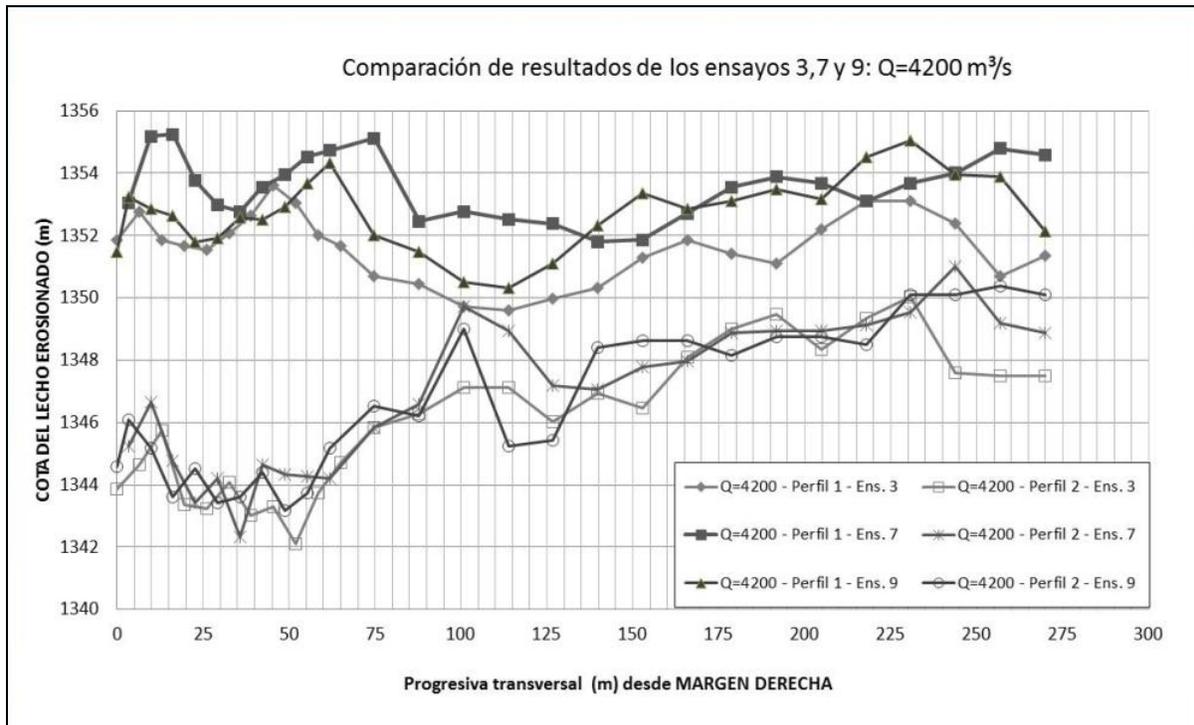
**Tabla 3.-** Erosiones críticas al pie y en el foso de erosión para la zona aguas abajo del Dique Móvil, expresadas como cotas en prototipo.

	<b>Ensayo</b>	<b>Cota de erosión máxima (m)</b>	<b>Profundidad de erosión (m)</b>
Pie del Dique	Caudal Máx. –4200m <sup>3</sup> /s	1351.8	8.2
Foso de Erosión	Caudal Máx. – 4200m <sup>3</sup> /s	1342.3	17.7

**Tabla 4.-** Erosiones críticas al pie y en el foso de erosión para la zona aguas abajo del Dique Fijo, expresadas como cotas en prototipo.

	<b>Ensayo</b>	<b>Cota de erosiónmáxima (m)</b>	<b>Profundidad de erosión (m)</b>
Pie del Dique	Caudal Máx. – 4200m <sup>3</sup> /s	1350,3	9,7
Foso de Erosión	Caudal Máx. – 4200m <sup>3</sup> /s	1347,1	12,9

Se deduce, a partir de estas mediciones que el ensayo de 4200 m<sup>3</sup>/s generó las mayores erosiones. a excepción de la producida al pie del Canal Moderador, por este motivo se repitió el ensayo de 4200m<sup>3</sup>/s en tres oportunidades, en la Figura 11 se puede observar una comparación de los resultados obtenidos en los 3 ensayos en los perfiles 1 y 2 paralelos al eje de la presa, Perfil 1 (pie de presa) y Perfil 2 (fosa de erosión).



**Figura 11.**-Comparación de erosiones para los tres ensayos de 4200m<sup>3</sup>/s en los Perfiles 1 (pie de presa) y 2 (fosa de erosión).

## COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES CON FORMULACIONES MATEMÁTICAS

Se presentan en este apartado erosiones obtenidas a partir de diferentes formulaciones matemáticas empíricas y se comparan los resultados con los obtenidos en los estudios experimentales.

Para realizar las estimaciones analíticas se consideró un caudal de 4200 m<sup>3</sup>/s con todas las compuertas abiertas y se asumió un funcionamiento tipo salto esquí donde la lámina lanzada impacta en un manto de agua, produciendo una disipación macroturbulenta en el cauce y una erosión localizada alejada de la zona de despegue, se asumió una distribución uniforme del caudal a lo largo de cada una de las estructuras de descarga.

Existen numerosas investigaciones que permiten determinar la profundidad de erosión sobre la base de consideraciones energéticas del escurrimiento y de las características del material del lecho. Estas expresiones tienen la siguiente forma general:

$$D = \frac{K \cdot Q^m \cdot H^p}{d^n} \quad (1)$$

Donde:

D: Profundidad de erosión [m]

- Q: Caudal específico [m<sup>3</sup>/s.m]  
H: Altura de caída [m]  
d: Diámetro característico de las partículas del lecho [m]  
K: Constante  
x,y,z: Exponentes que varían según el autor

A continuación se presentan dos valores de erosión, E1 y E2, que se obtienen de aplicar un promedio a las profundidades de erosión obtenidas según las ecuaciones de diferentes autores. El valor de E1 surge de promediar los resultados de las ecuaciones de INCyTH, C. Wu, Martinsorg., Martins 1973 y Ivanissevich y el de E2 considera además de las ecuaciones de E1 las de Martinscorr y Chee-Kung

-Erosión en el Canal Moderador:

Para la crecida de 4200 m<sup>3</sup>/s se consideró que el Canal Moderador eroga un caudal de 248 m<sup>3</sup>/s, la profundidad de erosión máxima resultó ser de 10,9 para E1 y de 11,5m para E2, (Halcrow, 2010).

-Erosión en el Dique Móvil:

Se consideró que el Dique Móvil eroga un caudal de 1137 m<sup>3</sup>/s para la crecida de 4200 m<sup>3</sup>/s y la profundidad de erosión teórica obtenida fue de 11,5 para E1 y de 12,11m para E2, (Halcrow, 2010).

-Erosión en el Dique Fijo:

Para el Dique Fijo, los valores de erosión resultaron ser de 10,5 para E1 y de 11,0m para E2, (Halcrow, 2010).

Al comparar los resultados obtenidos en el modelo físico con los estimados analíticamente se observan diferencias significativas entre ambos resultados, en todos los casos las erosiones estimadas teóricamente fueron menores a las obtenidas experimentalmente, con diferencias del orden del 25% en el Canal Moderador, 30% en Dique Móvil y 15% en Dique Fijo. Estas diferencias se pueden atribuir a que no se cumplen estrictamente las hipótesis realizadas en las fórmulas matemáticas, una de las simplificaciones que se realizaron y no se cumplen en este caso particular es que la distribución del caudal a lo largo de cada estructura de descarga no es uniforme, se pudo observar en los ensayos la concentración de caudales específicos mayores sobre la margen derecha del dique.

## CONCLUSIONES

En cuanto al material del fondo móvil se seleccionó una granulometría similar a la que se encuentra hoy en prototipo, y en los ensayos se observó un comportamiento similar al que se espera ocurra en prototipo con la estabilización de la erosión, la formación de una barra de sedimento aguas abajo de la fosa de erosión y un

acorazamiento compatible con el material del prototipo.

Las técnicas experimentales de monitoreo y medición de erosiones (tradicional y digital) utilizadas en el modelo mostraron resultados similares, obteniendo una correlación aceptable entre las mediciones realizadas. Las erosiones críticas se generaron en la mayoría de los casos para el máximo caudal ensayado ( $4200 \text{ m}^3/\text{s}$ ), a excepción de la producida al pie del canal moderador. Se pudo observar una buena repetitividad en los resultados de los ensayos.

## REFERENCIAS

- Bellino, N.(2013); Sánchez Aimar, E.; Pagot, M.; Corral, M.; Eder, M.; Apostolo, C.; Gyssels, P.; Balbis, S.; Muratore, H.; Hillman, G. y Rodríguez, A. (2013). "Desarrollo e implementación de una nueva técnica de medición de erosión en modelos físicos utilizando una cámara KINECT", III Simposio Sobre Métodos Experimentales en Hidráulica, UNL, Santa Fe.
- Halcrow (2010), "Elaboración del proyecto y evaluación económica e impacto ambiental del proyecto de refuncionalización y mejora del dique derivador los molinos y canal río grande, provincia de Jujuy". Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios de la Nación, Buenos Aires, Argentina.
- UNC (2012) "Proyecto y construcción del modelo físico tridimensional del dique derivador los molinos, Provincia de Jujuy", Laboratorio de Hidráulica, FCEFYN, Informes Técnicos I y II.