

# SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN CUENCO DISIPADOR DE ENERGÍA: OPERACIÓN ASIMÉTRICA Y EROSIÓN DE MÁRGENES

Mariano de Dios<sup>1</sup>, María Julieta Buscetti<sup>1</sup>, Milagros Loguercio<sup>1</sup>, Sergio O. Liscia<sup>1</sup>  
y Marcelo Cardinali<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Hidromecánica, Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

<sup>2</sup>Entidad Binacional Yacyretá.

E-mail: dediosmariano@gmail.com; buscetti.julieta@gmail.com; milagrosloguercio@gmail.com; soliscia@ing.unlp.edu.ar; luismarcelocardinali@gmail.com

## Introducción

Las crecidas ocurridas durante los años 2013 y 2014 en el río Paraná tuvieron un caudal máximo diario en el Complejo Hidroeléctrico Yacyretá de 40.000 m<sup>3</sup>/s aproximadamente, siendo de esta manera dos eventos de gran magnitud (recurrencia de 20 años aproximadamente). Se registraron caudales superiores a los 15.000 m<sup>3</sup>/s en el Vertedero Brazo Principal (VBP) (15.806 m<sup>3</sup>/s y 16.857 m<sup>3</sup>/s para el año 2013 y 2014 respectivamente). Como consecuencia de esta importante crecida se produjo una erosión en la margen izquierda del Vertedero en las proximidades de una de las torres de alta tensión. Esta situación obligó a cerrar los vanos 1 y 2 del VBP para reducir las velocidades en esta zona y a realizar una serie de reparaciones en el talud afectado. En la Figura 1 se puede observar la zona erosionada.



Figura 1.- Planta VBP. Zona erosionada durante la crecida de 2014.

Adicionalmente luego de las crecidas se observó dentro del cuenco disipador material rocoso de grandes dimensiones (> 1m<sup>3</sup>).

A partir de esta situación se decidió encarar una serie de estudios concernientes a evaluar esta problemática mediante el empleo de la simulación numérica CFD (Computational Fluid Dynamics)

## Objetivo

Se busca establecer lo ocurrido durante las crecidas de 2013 y 2014, identificando los mecanismos que intervienen en el proceso erosivo de la margen izquierda del VBP.

A partir de este diagnóstico, y habiendo definido previamente la crecida de diseño de las protecciones, establecer las estrategias que permitan brindar una solución a los problemas de erosión en la base de la torre de alta tensión ubicada sobre la margen izquierda del VBP.

Además de estos objetivos propios de la problemática estudiada, con este trabajo se busca ver la capacidad de las simulaciones CFD y en particular del empleo del modelo LES (Large Eddy Simulation) para representar problemas complejos de la ingeniería con un costo computacional acotado.

## Materiales y métodos

En este trabajo se utilizó el código comercial FLOW-3D<sup>®</sup>, el cual es un software de dinámica de fluidos de propósito general. Las ecuaciones gobernantes del flujo son resueltas por el método de volúmenes finitos/diferencias finitas en una malla estructurada. Para la representación de obstáculos el código utiliza el método FAVOR (deriva de las siglas inglesas Fractional Area/Volume Obstacle Representation).

Para predecir el flujo turbulento en las simulaciones se emplearon las ecuaciones de Navier-Stokes, utilizándose el modelo LES. Como cierre de turbulencia se empleó el propuesto por Smagorinsky (1963).

La discretización del dominio computacional se efectuó mediante el empleo de mallas multi-bloque con diferente tamaño. La celdas de menor tamaño fueron de 0.5 m de lado y se emplearon un total de 7.5 millones.

## Resultados

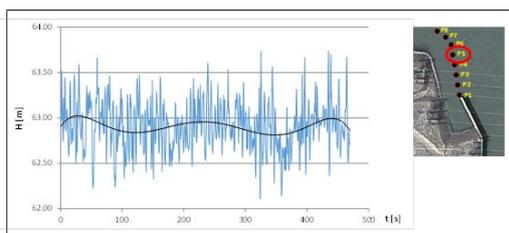
Mediante las simulaciones numéricas, validadas con registros fílmicos y fotográficos del evento, se determinaron los mecanismos erosivos del talud: oleaje y velocidad de la corriente.

En la Figura 2 se presenta una fotografía de la crecida de 2014, donde se puede observar el oleaje sobre el talud izquierdo.

La simulación numérica muestra que para las condiciones de la crecida de 2014 (considerando los 2 primeros vanos cerrados) el oleaje llegó a tener alturas significativas (ver Figura 3) en la zona del talud de aproximadamente 1m y velocidades medias que alcanzaron los 3.5 m/s en algunos sectores puntuales. Considerando la acción del oleaje y las velocidades por separado, por ejemplo utilizando la expresión de Hudson (1958) y Pilarczyk (1990) respectivamente, se obtiene un D<sub>50</sub> mínimo 0.66 m para poder resistir estas sollicitaciones (en este caso la acción dominante es la velocidad de la corriente).

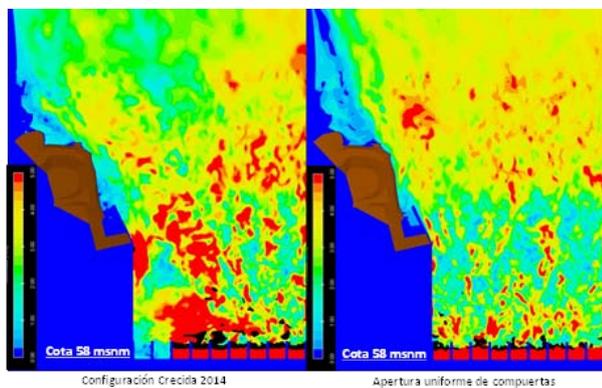


Figura 2.- Oleaje sobre la margen izquierda del VBP durante la crecida de 2014.



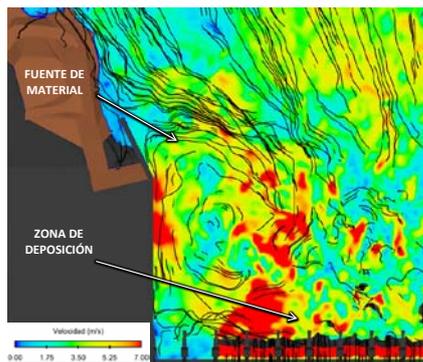
**Figura 3.-** Registro de olas en un punto cercano al talud izquierdo– Simulación numérica – Crecida del año 2014.

Durante esta crecida se llevó adelante una reparación del talud erosionado colocando rip-rap con un  $D_{50}=0.65\text{m}$ . Si se tiene en cuenta que para resistir la corriente se necesitaba un  $D_{50}=0.66\text{m}$ , la protección actual para la crecida del 2014 estuvo en el límite de su estabilidad. Sin embargo, en caso de haber operado el vertedero en forma uniforme, es decir, no cerrando el vano 1 y 2, la situación hubiese sido más crítica. En la simulación del escenario de apertura uniforme del VBP (considerando el caudal máximo de 2014) el  $D_{50}$  asciende a 1.13 m. Esto hubiese significado seguramente el colapso de la torre de alta tensión. En la Figura 4 se comparan las velocidades en un plano horizontal (cota 58msnm) para estos dos escenarios estudiados.



**Figura 4.-** Comparación del campo de velocidades para la configuración de la crecida de 2014 (izquierda) y apertura uniforme de compuertas (derecha).

La simulación numérica de la crecida de 2014 nos permite también clarificar el proceso de incorporación de material ocurrido durante este evento. En la Figura 5 se observan los patrones del flujo a la salida del VBP para la cota 56 msnm. La fuente del material rocoso que ingresó a la pileta de aquietamiento fue probablemente la margen izquierda, teniendo en cuenta que durante la crecida se incorporó material de gran tamaño para proteger el talud erosionado. Posteriormente las elevadas velocidades de carácter fluctuante que se generaron con la recirculación (pulsos de velocidad superiores a los 7 m/s) desplazaron los bloques hasta el interior de la pileta. Finalmente el material rocoso se encuentra con el perfil vertedor y en los vanos 5 y 6 encuentra una zona para depositarse.



**Figura 5.-** Proceso de incorporación de material rocoso a la pileta de aquietamiento para la crecida de 2014 (superior). Recirculación frente a los vanos 1 y 2 durante la crecida de 2013 (inferior).

Con el diagnóstico de lo ocurrido en las crecidas de los años 2013 y 2014, se procedió a establecer las estrategias que permitan brindar una solución a la problemática de erosión del VBP. En este sentido se trabajó en dos tipos de soluciones:

- 1) **Solución transitoria:** estudiar configuraciones de apertura de compuerta para diferentes caudales que además de disminuir la sollicitación sobre el enrocado de margen izquierda, no generen recirculaciones capaces de introducir piedras en el cuenco disipador. Esta tarea llevó a definir una serie de recomendaciones en la operación del VBP hasta que se materialice la solución definitiva.
- 2) **Solución definitiva:** definido el caudal de diseño de las protecciones ( $25.000\text{ m}^3/\text{s}$ ), se realizó la simulación numérica con apertura uniforme de compuertas, la cual arrojó como resultado la necesidad de colocar un rip-rap con un  $D_{50}=1.3\text{m}$ .

## Conclusiones

La simulación numérica LES permitió definir los mecanismos que intervinieron en la erosión del talud de margen izquierda del VBP durante la crecida de 2013 y 2014: oleaje y velocidad de la corriente. Asimismo se logró establecer el proceso de incorporación de material rocoso en el cuenco disipador, el cual estuvo ligado a la recirculación de gran tamaño producto del cierre del vano 1 y 2. Todo lo anterior se apoyó en una validación cualitativa de la simulación numérica a partir de registros fotográficos y fílmicos del evento.

Finalmente se realizaron una serie de simulaciones numéricas que permitieron establecer una solución a la problemática de erosión de la torre de alta tensión del VBP (solución transitoria y solución definitiva)

## Referencias bibliográficas

- Hudson, R. Y. (1958). Design of Quarry-Stone Cover Layers for Rubble-Mound Breakwaters (No. AEWES-RR-2-2). ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION VICKSBURG MISS.
- Pilarczyk, K. W. (Ed.). (1990). Coastal protection. Rotterdam: AA Balkema.
- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations: I. the basic experiment\*. Monthly weather review, 91(3), 99-164.