

# COMPARACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS 1D Y 2D EN SIMULACIONES DE ROTURA DE PRESA

Andrés Gonzalo Burboa Lizama

Estudiante de Magíster, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción, Chile.  
E-mail: andresburboa@udec.cl

## Resumen

Se presentan los resultados del modelo unidimensional HEC-RAS y el bidimensional Iber en dos simulaciones de rotura de presa. El primer caso de estudio es una geometría creada por el usuario, con una presa situada aguas arriba de un canal trapezoidal de pendiente variable; mientras que el segundo corresponde al embalse Las Palmas, ubicado en la Región de Valparaíso, Chile. Para comparar los resultados se definen diferentes secciones de control aguas abajo de cada presa, registrando los hidrogramas y niveles de agua que entregan los dos programas. En general, se observa una gran similitud entre los hidrogramas obtenidos, con diferencias entre los caudales *peak* que no superan el 15.6% y el 4.0% en el primer y segundo caso de estudio, respectivamente. Los resultados demuestran que ambos programas, con sus ventajas y brechas, entregan una buena representación del problema estudiado.

## Introducción

Los eventos de sequías e inundaciones cada vez más extremos sugieren un escenario complejo para la gestión y el aprovechamiento de los recursos hídricos. La construcción de presas es una solución tradicional para este problema, permitiendo satisfacer las demandas de consumo humano, agricultura e industria, entre otros; sin embargo, un error en su diseño, construcción o durante su funcionamiento puede provocar daños considerables hacia aguas abajo.

Por esta razón, se debe estudiar la inundación que provocaría la eventual rotura de una presa de embalse. Para ello, se utilizan modelos numéricos que simulan la onda de crecida provocada por la rotura, siendo HEC-RAS el más popular. No obstante, su aplicación en simulaciones de crecida puede presentar algunos errores, volviéndose necesario trabajar con otro modelo. En este trabajo se comparan las simulaciones de los modelos HEC-RAS e Iber en dos casos de estudio: uno ficticio, definido por el usuario para poner a prueba a los programas; y otro real, del Embalse Las Palmas, localizado en Chile.

## Zona de estudio

Se presentan dos casos de estudio. En el primero, el área de estudio es una geometría creada por el usuario, que está formada un canal trapezoidal de 10 km de largo. El canal se divide en cinco tramos de 2 km, alternando su pendiente entre 0.3 y 3.0%. Su sección transversal posee una base 20 m, un primer talud de 5:1 (H:V) hasta los 2 m de altura, y un segundo talud de 12:1 (H:V) hasta los 15 m. En los primeros 500 m desde aguas arriba se ubica un muro de 13.5 m.

El segundo caso corresponde al embalse Las Palmas, localizado al norte de la Región de Valparaíso (Chile), el cual aprobó su evaluación ambiental en el año 2016 y próximamente iniciará su etapa de construcción. En este caso, el área de estudio se extiende por casi 13 km del Estero Las Palmas, desde el embalse hasta la confluencia del Estero con el Río Petorca. En la zona de aguas arriba se ubica la presa de 70 m de altura, que permitirá almacenar unos 55 millones de m<sup>3</sup>.

## Modelos HEC-RAS e Iber

HEC-RAS, en su versión 4.1 (HEC, 2010), es un modelo unidimensional de simulación de flujo a superficie libre bajo régimen permanente y no permanente. Para los cálculos de flujo no permanente HEC-RAS resuelve las ecuaciones de Saint-Venant en una dimensión, empleando un esquema numérico implícito de diferencias finitas. En los cambios de régimen (al pasar por altura crítica) la simulación no permanente se vuelve inestable, lo que se corrige introduciendo factores de reducción a los términos inerciales de la ecuación de Saint-Venant.

Por otra parte, Iber (Bladé *et al.*, 2014) es un modelo bidimensional de simulación de flujo a superficie libre bajo régimen no permanente. Resuelve las ecuaciones de Saint-Venant en dos dimensiones, utilizando un esquema numérico explícito de volúmenes finitos. En la discretización espacial el programa utiliza una malla no estructurada de volúmenes triangulares o cuadriláteros.

Entre las diferencias más importantes, Iber entrega resultados con un nivel de detalle superior a HEC-RAS (flujo y nivel de agua sobre una superficie bidimensional en comparación a resultados por perfil transversal). Sin embargo, esto implica que Iber tarda más en sus cálculos que HEC-RAS (ya que resuelve más ecuaciones), y, por lo tanto, Iber necesita de un mayor poder de cómputo. Por otra parte, las inestabilidades numéricas de HEC-RAS son frecuentes y su depuración puede tardar bastante, mientras que Iber no presenta ese tipo de inconvenientes.

## Información de entrada

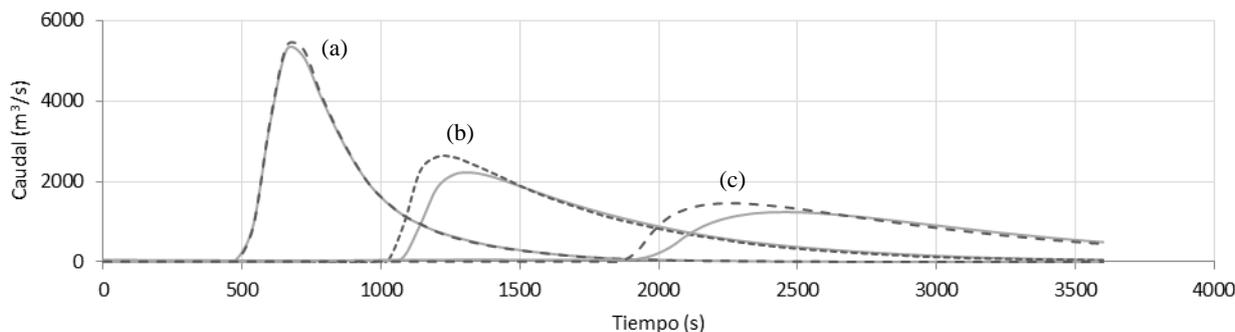
### Topografía

En el primer caso la geometría fue generada con HEC-RAS y luego copiada a Iber, indicando una a una las coordenadas de los puntos que fueran relevantes. En el segundo caso se generó la topografía del lugar a partir de un modelo de elevación digital (DEM, según sus siglas en inglés), específicamente el SRTM de 1 arco segundo. El DEM se procesó para entregar la información geométrica según los requerimientos de cada programa.

### Brecha de la rotura

La brecha asociada a la rotura de una presa ha sido ampliamente documentada en la literatura (MacDonald y Langridge-Monopolis, 1984; USBR, 1988; Von Thun y Gillette, 1990; Froehlich, 1995; MMA, 1996; Wahl, 1998; Froehlich, 2008). En general, la brecha se define como una sección trapezoidal, cuyas dimensiones dependen de la materialidad del muro y su geometría (o la del embalse).

En el primer caso se dimensionó la brecha de forma arbitraria (ya que el muro no representa a una presa real), con un ancho inferior y superior de 20 y 210 m, respectivamente, y una altura de 12 m.



**Figura 1.-** Hidrogramas obtenidos con HEC-RAS (línea gris continua) e Iber (línea negra segmentada) para el primer caso de estudio. Secciones de control ubicadas a 1 km (a), 5 km (b) y 9 km (c) de la presa del embalse.

En el segundo caso, se proyecta que el muro del Embalse Las Palmas sea de material suelto con pantalla de hormigón (CFRD, según sus siglas en inglés), por lo que se definió la brecha a partir del estudio de Alonso et al. (2010), que se basa en la información recopilada por Wahl (1998) sobre presas de este tipo. Se obtuvo anchos de 75 y 196 m, y una altura de 64 m.

Además, otro parámetro relevante de la brecha es su tiempo de formación, que también depende de la materialidad y geometría del muro. Nuevamente, en el primer caso se definió un tiempo de rotura arbitrario de 0.1 horas, mientras que en el segundo caso se calculó el tiempo de rotura con diferentes expresiones, optando por el menor resultado. La fórmula de MMA (1996) fue la elegida, con un valor de 0.48 horas.

#### Condiciones de borde e iniciales

En ambos casos se fijó una condición inicial correspondiente al embalse lleno. Las simulaciones en HEC-RAS requirieron además de condiciones de borde aguas arriba, definidas como caudales constantes de 1 y 10 m<sup>3</sup>/s en el primer y segundo caso, respectivamente; y condiciones iniciales de 1 y 1000 m<sup>3</sup>/s (para los mismos casos). El gran caudal inicial utilizado en la simulación del Embalse Las Palmas tuvo como objetivo darle estabilidad al modelo, resguardando que no influyera en el caudal máximo de la crecida asociada a la rotura. Por otra parte, las simulaciones en Iber no necesitaron de una condición de borde aguas arriba. En los dos casos se fijó una condición de borde aguas abajo igual a altura normal.

#### Resultados

En los dos casos se especificaron secciones de control cada 1 km aproximadamente, tomando como referencia las secciones transversales de HEC-RAS y copiándolas en Iber. Los resultados de los dos programas indican que los hidrogramas y los niveles de agua son similares. En el primer caso, la diferencia entre los caudales *peak* fue menor en las secciones más cercanas a la presa (1.6%), aumentando su magnitud hacia aguas abajo (15.6%); mientras que en el segundo caso ocurrió lo contrario, con diferencias mayores cerca del muro (4.0%), que disminuían hacia aguas abajo de la presa (1.7%). En todas las secciones de control el caudal *peak* fue mayor con Iber. La Figura 1 presenta los hidrogramas del primer caso para tres secciones de control.

#### Conclusiones

Se compararon los resultados de los programas HEC-RAS e Iber en dos simulaciones de rotura de presa. En promedio, la diferencia entre los caudales *peak* de ambos modelos fue de un

11.2% para el primer caso de estudio y de 2.5% para el segundo. Además, el primer caso entregó la diferencia más alta entre los *peaks*, con un 15.6% sobre la sección más alejada del muro. En general, estas diferencias son causadas por la reducción que realiza HEC-RAS a los términos inerciales de la ecuación de Saint-Venant, siendo mayor en el primer caso debido a la fuerte variación de su pendiente de fondo.

En base a lo anterior, se recomienda el uso de HEC-RAS para simulaciones no permanentes solo si la geometría del problema o sus condiciones de borde no sugieren cambios de régimen importantes. De lo contrario, la eliminación de inestabilidades en HEC-RAS puede transformarse en un proceso repetitivo, e incluso podría tardar más que la misma simulación con un modelo bidimensional. Se prevé que el avance de la tecnología extienda el uso de modelos bidimensionales como Iber o el mismo HEC-RAS en su versión 5.0, optando por HEC-RAS 4.1 solo en simulaciones de flujo permanente.

#### Referencias bibliográficas

- Alonso, F., G. Peursen, J. Bertoni y S. Menajovsky (2010). "Estimación de relaciones paramétricas para brechas en rotura de presas de tipo CFRD". *VI Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos*, Neuquén, Argentina.
- Bladé, E., L. Cea, G. Corestein, E. Escolano, J. Puertas, E. Vázquez-Cendón, J. Dolz y A. Coll (2014). "Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos". *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1–10.
- Froehlich, D. (1995). "Embankment Dam Breach Parameters Revisited". *Water Resources Engineering, Proceedings of the 1995 Conference on Water Resources Engineering*, 887–891.
- Froehlich, D. (2008). "Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties". *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(12), 887–891.
- HEC (2010). *HEC-RAS, River Analysis System, User's Manual*. Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers, Davis California.
- MacDonald, T., y J. Langridge-Monopolis (1984). "Breaching Characteristics of Dam Failures". *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(5), 567–586.
- MMA (1996). *Clasificación de presas en función del riesgo potencial, Guía Técnica*. Ministerio de Medio Ambiente, España.
- USBR (1988). "Downstream Hazard Classification Guidelines". *ACER Technical Memorandum N° 11*, Assistant Commissioner-Engineering and Research, Denver, Colorado.
- Von Thun, J., y D. Gillette (1990). *Guidance on Breach Parameters*. Unpublished internal document, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- Wahl, T. (1990). *Prediction of Embankment Dam Breach Parameters, A Literature Review and Needs Assessment*. Water Resources Research Laboratory, United State Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Dam Safety Office.