

Estudio de la capacidad de desagüe de aliviaderos con compuertas mediante modelación numérica. Aplicación a la presa de Oliana

Fernando Salazar González, Riccardo Rossi*, Rafael Morán Moya**,
Atonia Larese De Tetto**

** Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE). ** Universidad
Politécnica de Madrid (UPM).*

*fsalazar@cimne.upc.edu, rrossi@cimne.upc.edu, rmoran@caminos.upm.es,
antoldt@cimne.upc.edu*

1 Introducción

Las curvas de desagüe de aliviaderos con compuertas, que permiten conocer el caudal que se está vertiendo en unas condiciones (nivel de embalse, apertura de compuerta) determinadas, suelen calcularse en base a formulaciones empíricas. La más utilizada, que es también la que recomienda la Guía Técnica de Seguridad de Presas nº 5 [1], es la desarrollada por el USACE [2]. Se basa en una campaña de ensayos en laboratorio a partir de la cual se obtuvo una curva que permite calcular el coeficiente de desagüe en función de la posición de la compuerta.

Esta formulación no tiene en cuenta (se indica explícitamente) el efecto de contracción de la lámina, que depende de la relación entre el ancho de vano y la altura de lámina vertiente. Por tanto, debe considerarse como una primera aproximación a cada caso particular. Como consecuencia de ello, resulta necesario realizar campañas de ensayos en laboratorio específicas para cada nuevo aliviadero que se proyecta.

En el presente trabajo se estudia la capacidad de desagüe de aliviaderos con compuertas radiales mediante la aplicación de un código de cálculo numérico al caso del aliviadero de la presa de Oliana.

La presa de Oliana [5] es una presa de gravedad de hormigón, situada sobre el cauce del río Segre entre los términos municipales de Oliana y Peramola. Tiene una altura total desde cimientos de 102 m y su coronación, situada a la cota 519,60, tiene una longitud de 268 m. Su planta es curva, pero su talud es de 0,87 H: 1,0 V, por lo que está diseñada para resistir por gravedad. Tiene un aliviadero de superficie, situado sobre la propia coronación de la presa. Consta de dos vanos de 17 m de ancho cada uno, que están controlados por sendas compuertas tipo Taintor. El canal de descarga se sitúa sobre el paramento de aguas abajo de la presa, si bien está retranqueado hacia aguas arriba, para reducir la altura de los muros cajeros.

2 Sobre KRATOS

El código de cálculo utilizado es una de las aplicaciones de KRATOS [3,4], desarrollado por CIMNE. Resuelve las ecuaciones completas de Navier-Stokes en tres dimensiones sobre una malla de elementos finitos que discretiza el dominio. El método se enmarca en la familia de los denominados métodos eulerianos, que se caracterizan fundamentalmente por utilizar una malla fija. En este caso, además, la posición de la superficie libre se calcula mediante una función suave del tipo level-set. Un posible inconveniente de esta formulación es la dificultad para reproducir formas irregulares de la superficie libre. Este aspecto no es un problema en el presente caso, ya que el interés se centra en la zona de aproximación al vertedero, aguas arriba del umbral, donde las velocidades del fluido son pequeñas y realmente la superficie libre tiene formas suaves. Únicamente se ha modelado la zona superior del canal de descarga, con una longitud suficiente para que se desarrolle el régimen rápido, de modo que la condición de contorno aguas abajo no afecte a los resultados del cálculo.

3 Cálculos de referencia

La primera parte del trabajo se ha centrado en el cálculo de las curvas de desagüe del aliviadero de la presa de Oliana, tanto en desagüe libre como bajo compuerta, siguiendo la formulación empírica habitual. Con ello se obtienen unas curvas de referencia, con las que comparar los resultados obtenidos posteriormente mediante cálculo numérico.

Para el cálculo de la curva de desagüe, tanto libre como bajo compuerta, se han utilizado las expresiones de la Guía Técnica nº 5 [1], del Comité Nacional Español de Grandes Presas, así como en el libro “Design of Small Dams”, del U. S. Bureau of Reclamation [7], al que hace referencia la mencionada Guía Técnica. Ambas publicaciones se refieren en ocasiones al manual del U.S.A.C.E: “Hydraulic Design of Spillways” [2].

El caudal desaguado con una determinada altura de agua en el embalse se obtiene de la expresión:

$$Q = C \cdot L \cdot H_e^{1,5} \quad (1)$$

Donde:

Q es el caudal evacuado (m^3/s)

C es el coeficiente de desagüe, que depende del tipo de vertedero

L es la longitud efectiva del vertedero (m)

H_e es la energía sobre el umbral del vertedero (m)

La longitud efectiva del vertedero se calcula mediante la fórmula [6]:

$$L = L' - 2 \cdot (N \cdot K_p + K_e) \cdot H_e \quad (2)$$

Donde L' es la longitud libre total del aliviadero, N es el número de pilas, y K_p y K_e son los coeficientes de contracción de las pilas y los estribos, respectivamente, que en el caso de la presa de Oliana valen 0,01 y 0,1 respectivamente. Por tanto, la longitud efectiva, que depende también de la altura de lámina vertiente, se puede calcular con la siguiente expresión:

$$L = 34 - 0,22 \cdot H_e \quad (3)$$

En el caso de desagüe bajo compuerta, la expresión es [2, 7]:

$$q = C_g \cdot D \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (4)$$

Siendo:

q el caudal de desagüe por metro lineal útil de vertido (m^2/s)

C_g el coeficiente de desagüe bajo compuerta

D la distancia desde el borde inferior de la compuerta hasta el punto más cercano del perfil del vertedero (m)

g la aceleración de la gravedad (m/s^2).

H la energía, medida desde la superficie libre en el embalse hasta el punto medio de la apertura (incluyendo la velocidad de aproximación).

El valor de C_g depende del tipo de compuerta, de la forma de la cresta, y de la posición del eje de giro, pudiendo obtenerse para cada caso particular de un ábaco [1, 2].

Los coeficientes anteriores consideran implícitamente el efecto de contracción de la lámina (porque se obtuvieron a partir de ensayos tridimensionales), por lo que no pueden compararse directamente con los obtenidos mediante el modelo numérico en dos dimensiones, que no están afectados de dicho efecto. Concretamente, el valor de C_g se obtuvo principalmente a partir de ensayos en aliviaderos con tres o más compuertas. Según se indica explícitamente, “*el coeficiente de desagüe para un solo vano debería ser menor, debido a la contracción lateral de la lámina, si bien no se dispone de datos para evaluar su influencia*” [2].

Para tener más información acerca de cómo considerar el efecto de contracción de la lámina, se ha realizado una búsqueda bibliográfica de artículos e informes relacionados con el tema. El objetivo era disponer de otro caso similar para tomar como referencia y comprobar la validez de esta formulación.

Se ha analizado el informe del U. S. Bureau of Reclamation con clave HL-2009-02, denominado “*Folsom Dam Joint Federal Project. Existing Spillway Modeling. Discharge Capacity Studies*” [8]. En este documento se muestran los resultados del estudio de la capacidad de descarga de un aliviadero con compuertas, realizados

mediante diversos ensayos en modelo reducido, así como mediante la aplicación de un método de cálculo numérico. En este caso no se aplicaba (4), ni se compararon los resultados con dicha fórmula.

Se ha calculado qué valores del coeficiente de desagüe C_g , introducidos en (4), encajan con los resultados de la modelación física de la presa de Folsom [8].

Los valores obtenidos de la aplicación de (4) coinciden con las curvas obtenidas experimentalmente en [8], lo que indica que el fenómeno responde a una formulación de ese tipo. Sin embargo, los valores de C_g que encajan con los resultados experimentales difieren de los indicados en [2] en un 10 % aproximadamente. Esta discrepancia puede deberse a que dicho coeficiente depende de otros parámetros, y no solo de la posición del eje de giro de la compuerta. El efecto de contracción de la lámina, que es función de la geometría de las compuertas, puede ser importante. Recordamos que no se considera en (4).

Por tanto, puede concluirse que los valores de los coeficientes de desagüe bajo compuerta que comúnmente se utilizan son estimaciones, y que en general es conveniente realizar estudios concretos con la geometría específica de cada aliviadero, cuando se desea conocer de una forma más precisa su capacidad de descarga.

4 Cálculos en dos dimensiones

Para analizar la capacidad de desagüe en situación de apertura simétrica (las dos compuertas en la misma posición), se han realizado cálculos en dos dimensiones. Se ha definido la geometría del modelo de modo que los contornos no afecten al resultado. La figura 1 muestra la geometría de los modelos utilizados. Se ha probado con diferentes dimensiones del dominio, tanto aguas arriba como aguas abajo para comprobar que no afectan al resultado. En todos los casos, se impone el caudal de entrada fijando la velocidad en el límite de aguas arriba del dominio, como se indica en la figura 1. La malla de elementos finitos utilizada es de 0,25 m en la zona próxima a la superficie libre, y de 3 m en el resto.

Se ha realizado una batería de casos modificando la apertura de compuerta y el caudal de entrada. El tiempo de cálculo es tal que se alcanza el régimen estacionario, es decir, el caudal de entrada se iguala al de salida, y la superficie libre se mantiene constante. Como resultado, se obtiene la relación entre carga de agua sobre el umbral y caudal unitario vertido para diferentes valores de la apertura de compuerta.

Para extrapolar los resultados al caso de la presa de Oliana se ha multiplicado el caudal unitario por la longitud efectiva, calculada ésta con la expresión recomendada para desagüe libre (3). El resultado se muestra en la figura 2, sobre los cálculos de referencia descritos anteriormente.

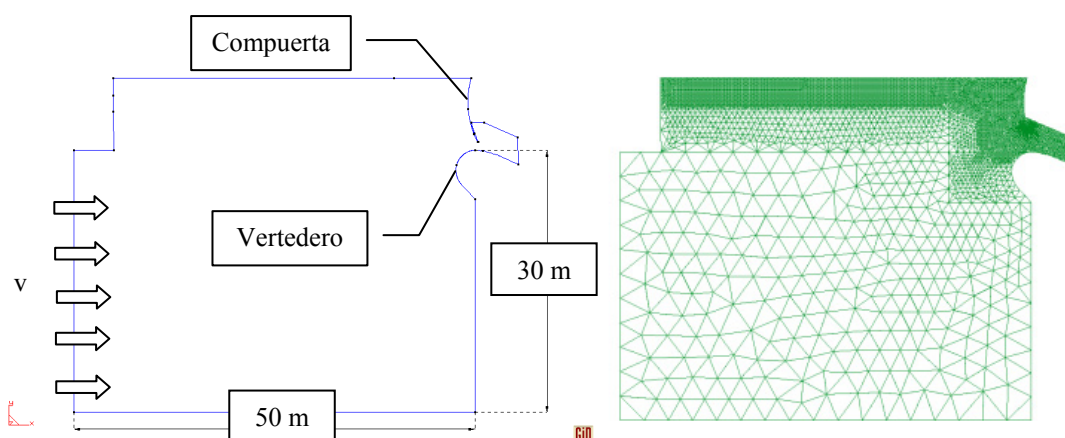


Figura 1 Geometría del modelo (izquierda), y malla de elementos finitos utilizada (derecha).

En dicha figura se observa que los puntos obtenidos con el modelo numérico reproducen el comportamiento predicho con la formulación empírica (la forma de las curvas es similar). En general, los resultados obtenidos

numéricamente corresponden con un coeficiente de desagüe intermedio entre los dos considerados. A medida que aumenta el grado de apertura, los resultados se parecen más a los obtenidos con la formulación del USACE [2]. En cuanto al desagüe libre, el cálculo numérico da caudales inferiores al de referencia, con una discrepancia máxima del 8,7 %. En la tabla 1 se muestran los valores numéricos para el caso de desagüe bajo compuerta.

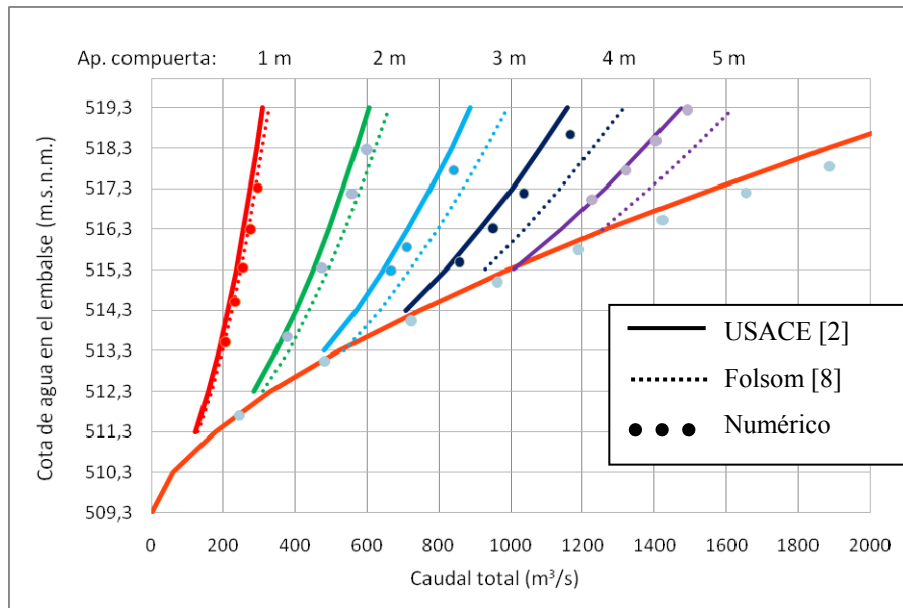


Figura 2 Extrapolación de los resultados de los cálculos bidimensionales (puntos) y comparación con los cálculos de referencia.

A la vista de estos resultados parece lógico pensar que el valor del coeficiente de desagüe bajo compuerta depende no sólo de la altura de energía y de la apertura, sino que probablemente influyan otros parámetros, como la geometría de la compuerta (en especial la forma del borde inferior), o su posición respecto del umbral del vertedero. Es probable que sea necesaria una investigación más profunda sobre la influencia de estos u otros parámetros.

Otro factor importante es el efecto de la contracción de la lámina, sobre el que no existen estudios detallados. En este cálculo se ha utilizado la expresión desarrollada para el caso de desagüe libre, que además de ser una aproximación basada en ensayos experimentales, está indicada para la altura de lámina de diseño.

Tabla 1 Resultados de los cálculos 2D y comparación con las formulaciones de referencia. Desagüe bajo compuerta.

Posición de la superficie libre (m.s.n.m.)	Caudal USACE (m³/s)	Caudal Folsom (m³/s)	Caudal numérico (m³/s)	Diferencia Numérico-USACE	Diferencia Numérico-Folsom
Apertura: 1 m					
513,51	194	205	206	6,2%	0,5%
514,51	218	230	233	6,9%	1,2%
515,35	237	250	255	7,6%	1,8%
516,29	256	271	276	7,8%	2,1%
517,31	276	291	297	7,6%	1,9%
Apertura: 2 m					
513,64	369	402	378	2,5%	-6,0%
515,35	453	495	474	4,5%	-4,2%
517,17	529	577	558	5,6%	-3,2%
518,26	569	621	599	5,2%	-3,5%

Posición de la superficie libre (m.s.n.m.)	Caudal USACE (m ³ /s)	Caudal Folsom (m ³ /s)	Caudal numérico (m ³ /s)	Diferencia Numérico-USACE	Diferencia Numérico-Folsom
Apertura: 3 m					
515,27	644	719	667	3,5%	-7,2%
515,85	685	764	711	3,9%	-6,9%
517,75	804	896	842	4,8%	-6,0%
Apertura: 4 m					
515,48	837	949	857	2,4%	-9,7%
516,32	917	1040	951	3,7%	-8,6%
517,18	993	1126	1036	4,3%	-8,0%
518,63	1108	1257	1166	5,2%	-7,2%
Apertura: 5 m					
517,02	1229	1352	1225	-0,3%	-9,4%
517,74	1312	1442	1320	0,7%	-8,4%
518,48	1391	1529	1404	0,9%	-8,2%
519,25	1469	1615	1492	1,6%	-7,6%

5 Cálculos en tres dimensiones. Aperturas simétricas

Los resultados del apartado anterior parecen indicar que la fórmula para considerar la contracción de la lámina recomendada para desagüe libre (4) puede ser una buena aproximación para el caso de desagüe bajo compuerta.

No obstante, se han realizado cálculos tridimensionales para comprobar si la extrapolación de los resultados de los cálculos bidimensionales es válida para aperturas simétricas.

Para ello se ha hecho uso de la simetría del dominio, modelando únicamente una compuerta. Se han realizado únicamente algunos casos de comprobación. La figura 4 muestra los resultados de los cálculos tridimensionales (asteriscos), sobre los ya incluidos en la figura 2.

Como en el caso anterior, se han realizado cálculos previos de sensibilidad de los resultados frente a las dimensiones del dominio y al tamaño de malla. De nuevo se utiliza una malla más fina en la zona próxima a la superficie libre y a la compuerta, y más gruesa en el resto del dominio, que queda bajo el agua durante toda la simulación.

Se observa que los resultados obtenidos en los casos de prueba encajan con los que resultan de los cálculos en dos dimensiones. Por lo tanto, puede afirmarse que para calcular el caudal de desagüe con aperturas simétricas son válidos los resultados de los cálculos bidimensionales, extrapolándolos al caso tridimensional aplicando (4).

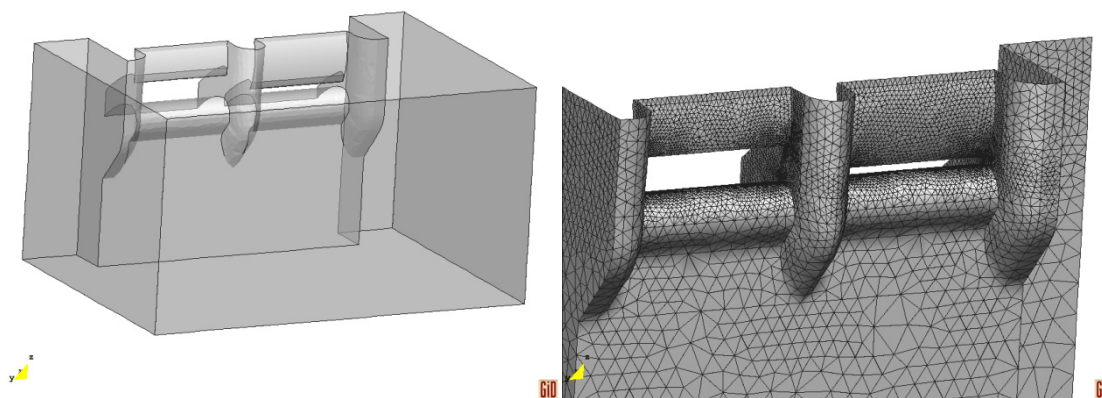


Figura 3 Geometría de uno de los casos. Izquierda: vista general; derecha: detalle de la malla de elementos finitos.

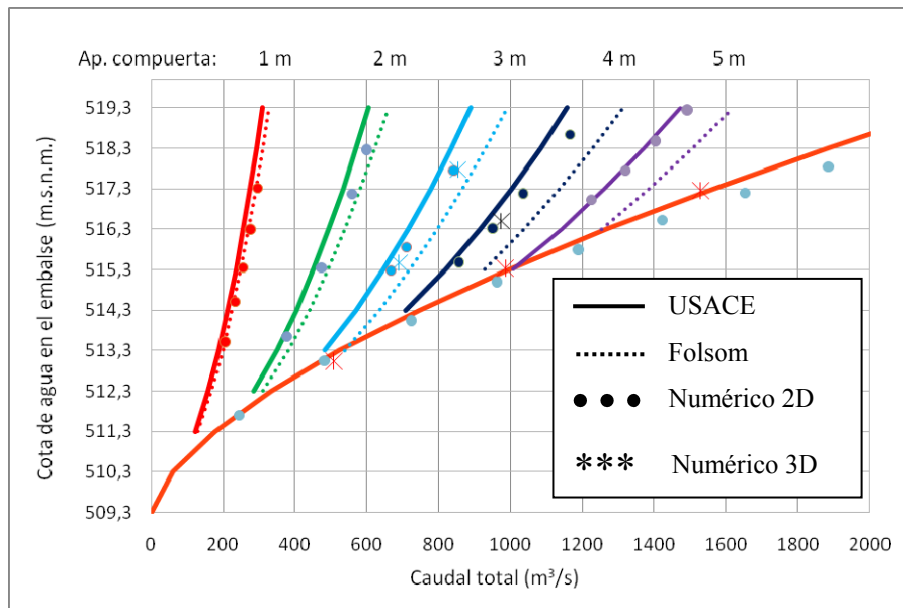


Figura 4 Comparación de los resultados de los cálculos tridimensionales (asteriscos) con los obtenidos de los cálculos bidimensionales y con los de referencia.

Tabla 2 Resultados del cálculo tridimensional con un vano y comparación con los obtenidos por extrapolación de los cálculos 2-D.

Q modelo (m ³ /s)	Apertura compuerta (m)	Cota agua (m.s.n.m.)	Q según cálculos 2D (m ³ /s)	Diferencia
493	Total	515,34	504	2,2 %
765	Total	517,25	777	1,6 %
1048	Total	519,00	1062	1,4 %
632	3	514,81	630	0,3 %
690	3	515,47	682	1,1 %
854	3	517,81	843	1,3 %
975	4	516,56	969	0,5 %

6 Obtención de la expresión general

Para que los resultados obtenidos con el cálculo sean útiles para la explotación, debe extraerse una expresión que permita conocer el caudal desaguado en cualquier situación de carga sobre el umbral y apertura de compuerta. Una posibilidad es obtener el polinomio que interpola los valores obtenidos, si bien tiene el inconveniente de requerir una expresión diferente para cada grado de apertura. Además, puede ser interesante conocer el resultado con aperturas intermedias, por lo que sería necesario interpolar.

Como alternativa, se ha optado por utilizar redes neuronales artificiales (ANN por sus siglas en inglés) para obtener una expresión sencilla de aplicación en todo del rango de funcionamiento del aliviadero, en lo que se refiere a aperturas de compuertas y niveles de embalse.

Para ello, se ha utilizado la herramienta FLOOD [6], desarrollada por CIMNE. La teoría en que se basa este artificio matemático, así como los algoritmos utilizados por la herramienta pueden consultarse en www.cimne.com/flood.

Los datos que necesitan las ANN para su entrenamiento han sido generados a partir de los resultados de los cálculos bidimensionales. Una vez obtenidos los parámetros de la red, se ha comprobado que los resultados que ofrece reproducen los datos suministrados con un error menor del 0,1 %.

Posteriormente, puede utilizarse para conocer el caudal vertido en cualquier situación de carga de agua y apertura de compuerta. La figura 5 muestra los resultados obtenidos con la red neuronal para aperturas de compuerta de 1,5 m, 2,5 m, 3,5 m y 4,5 m sobre el gráfico con los resultados del cálculo numérico con aperturas de 1 m, 2 m, 3 m, 4 m y 5 m. Se comprueba que la interpolación es correcta.

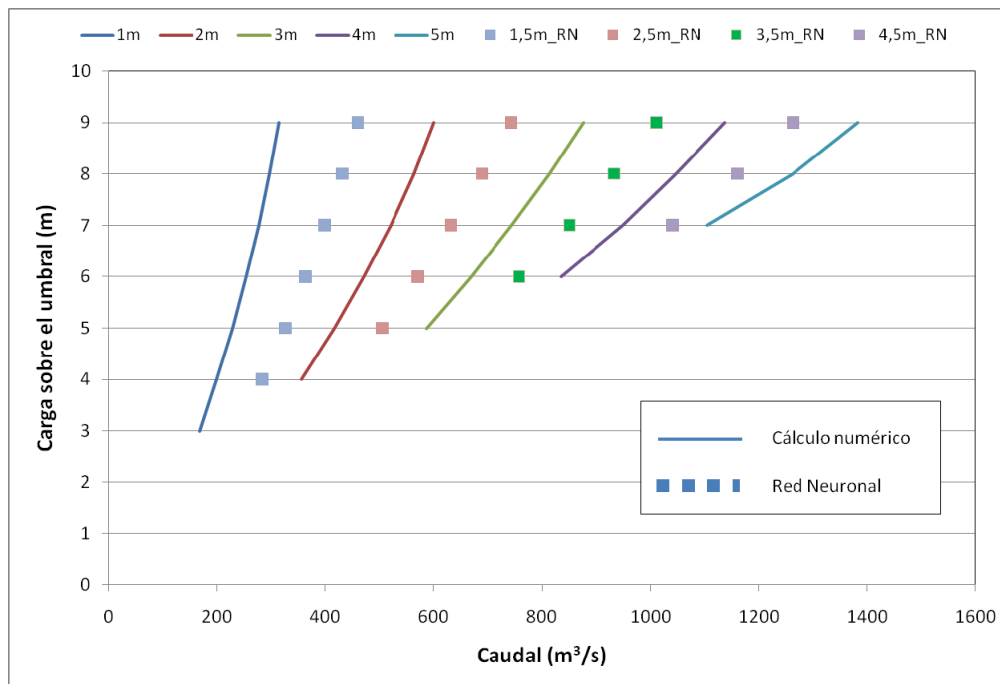


Figura 5 Comparación de los resultados de la red neuronal con aperturas intermedias con los obtenidos mediante cálculo numérico con aperturas cada metro.

Por tanto, para calcular el caudal desaguado por el aliviadero de la presa de Oliana en situación de apertura simétrica puede utilizarse la ANN con la seguridad de estar reproduciendo los resultados del modelo numérico. La expresión matemática que utiliza es sencilla, con lo que el resultado se obtiene automáticamente, una vez programada en cualquier hoja de cálculo. De este modo se evita tener que repetir el cálculo por elementos finitos cada vez que se quiere analizar una situación no calculada anteriormente.

Se ha seguido una metodología análoga para calcular el caudal desaguado por una única compuerta, manteniendo la otra cerrada.

7 Cálculos con aperturas asimétricas

El número de casos a analizar con aperturas asimétricas es mucho mayor que al estudiar un único vano, por lo que se ha optado por hacer una selección de casos representativos que permitan extraer conclusiones. En todos los casos, la geometría del modelo y la malla utilizada se han tomado de los estudios realizados previamente. Únicamente se han modificado las zonas de la compuerta, para variar la apertura.

Si se analiza el funcionamiento de una compuerta, puede haber cuatro casos diferentes, en función de la posición de la compuerta adyacente, que puede encontrarse:

1. Cerrada
2. Con una apertura menor que la analizada

3. En la misma posición de apertura que la analizada (aperturas simétricas)
4. Con una apertura mayor.

El gráfico de la figura 6 trata de facilitar la comprensión de las diferentes situaciones posibles. Representa el caudal de desagüe por un vano en los diferentes casos, fijados la carga sobre el umbral (se ha tomado en este caso la carga de diseño, 9 m), y la apertura de la compuerta a considerar (en el ejemplo, 3 m).

El caso 2, en que la compuerta adyacente tiene una apertura menor que la compuerta estudiada, es un caso intermedio entre el caso 1, en que aquella está cerrada, y el caso 3, en que tiene la misma apertura que la considerada. Un primer objetivo de este apartado consiste en conocer la variación del caudal vertido con la apertura de la compuerta adyacente.

En el caso 4, la compuerta contigua tiene una apertura mayor que la que se está analizando.

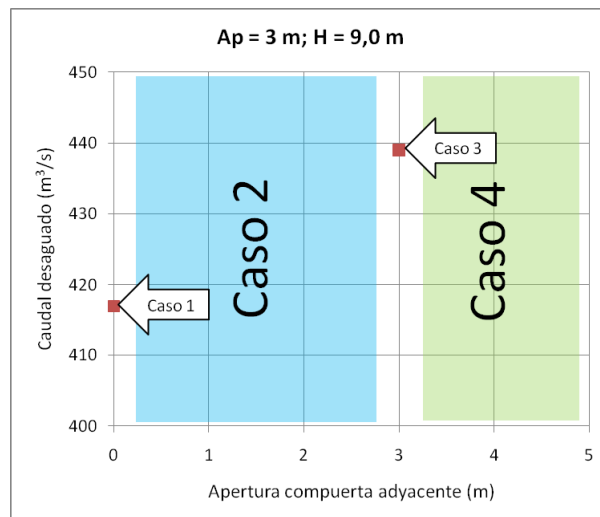


Figura 6 Posibles situaciones de apertura asimétrica.

El objetivo es conocer cómo varía el caudal vertido por una compuerta en función de la apertura de la compuerta adyacente, pudiendo ser esta menor (caso 2) o mayor (caso 4) que la considerada. La figura 7 muestra los resultados obtenidos en los casos analizados.

Se observa que en todos los casos, la mayor eficiencia se consigue con aperturas simétricas. Es decir, fijada la carga de agua sobre el umbral y la apertura de una de las compuertas, el caudal desagüado por ésta es máximo cuando la adyacente se encuentra en la misma posición. Si se encuentra con una apertura menor (caso 2) o mayor (caso 4), se desagua un caudal inferior.

No obstante, para poder extraer conclusiones aplicables al caso general sería necesario analizar un mayor número de situaciones.

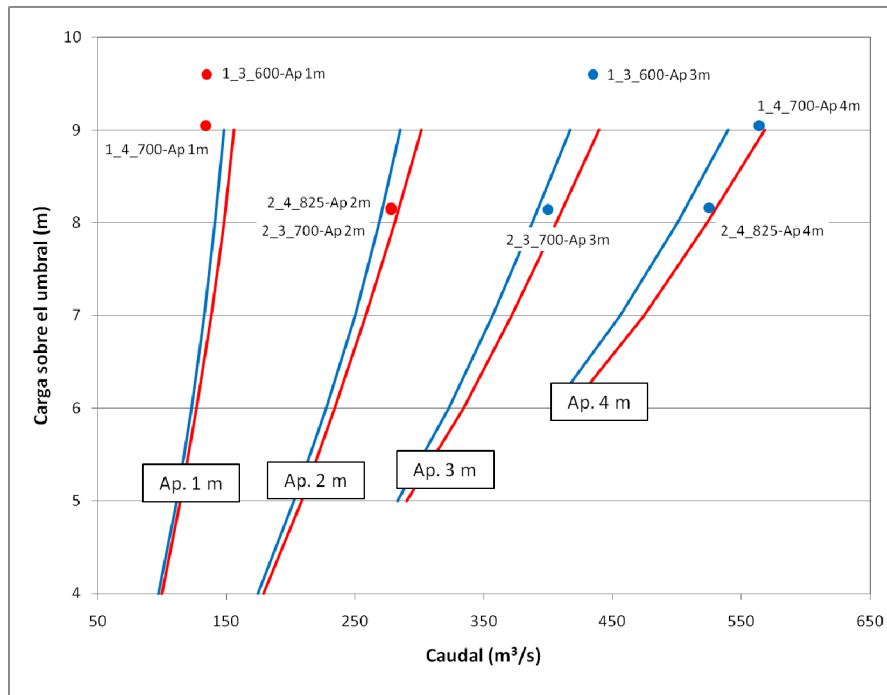


Figura 7 Comparación de los resultados con aperturas asimétricas (Q_2 y Q_4) con los obtenidos en las situaciones 1 (Q_1 ; azul) y 3 (Q_3 ; rojo). Se indica junto a cada punto la denominación del caso al que corresponde¹

8 Resumen y conclusiones

Se ha realizado el cálculo hidráulico del aliviadero de la presa de Oliana mediante cálculo por el método de los elementos finitos, con un código euleriano [3,4].

Se han obtenido las curvas de desagüe bajo compuerta del aliviadero, en dos situaciones:

1. Con apertura de una única compuerta
2. Con las dos compuertas abiertas en la misma posición (aperturas simétricas).

En ambos casos, se han desarrollado sendas redes neuronales que permiten conocer automáticamente, mediante una hoja de cálculo sencilla, el caudal de desagüe cualquier situación (carga sobre el umbral del vertedero, apertura de compuerta) dentro del rango de operación del aliviadero.

Los resultados obtenidos difieren en menos del 8 % respecto de los calculados con la formulación indicada por la Guía Técnica [1].

Se han analizado los resultados de ensayos experimentales en modelo reducido de la presa de Folsom, y se ha comprobado que el coeficiente de desagüe correspondiente es mayor que el que recomienda la Guía técnica [1]. Por lo tanto, parece claro que en el valor de dicho coeficiente influyen parámetros no considerados habitualmente, entre los que se encuentra el coeficiente de contracción.

¹ Los puntos del gráfico se denominan como: $a_b_Q\text{-Ap.}xm$, donde a y b son los grados de apertura de una y otra compuerta, Q es el caudal total, y x es la apertura de la compuerta a la que corresponde el punto. De este modo, de cada caso analizado se obtienen dos puntos, correspondientes a la relación carga-caudal por cada uno de los vanos, que tienen diferentes aperturas.

La aplicación de los valores recomendados por la Guía Técnica puede producir errores de hasta un 10 % en el caudal desaguado.

Se han realizado cálculos para analizar el efecto de aperturas asimétricas de las dos compuertas. Del análisis de los resultados se extraen las siguientes conclusiones:

1. La mayor eficiencia en el vertido se obtiene con aperturas simétricas.
2. Con aperturas mayores de 1 m el caudal vertido con aperturas asimétricas es siempre intermedio entre las situaciones: a) aperturas simétricas y b) apertura de una única compuerta, con la otra cerrada
3. Para extraer conclusiones de aplicación al caso general sería necesario realizar un estudio de mayor detalle.

9 Agradecimientos

Los autores agradecen el interés y la ayuda de Gonzalo Rabasa (Confederación Hidrográfica del Ebro) y Francisco Riquelme (INHISA), sin los cuales no habría sido posible el presente trabajo.

10 Referencias bibliográficas

- [1] Comité Nacional Español de Grandes Presas (1997). *Guía Técnica de Seguridad de Presas nº 5. Aliviaderos y Desagües*. ISBN: 84-89567-06-9.
- [2] U. S. Army Corps of Engineers (1992). *Hydraulic Design of Spillways*. EM 1110-2-1603. Department of the Army. Washington, DC.
- [3] P. Dadvand, R. Rossi, E. Oñate. *An object-oriented environment for developing finite element codes for multi-disciplinary applications*. Archives of Computational Methods in Engineering. 2010. Vol. 17, 253-297.
- [4] Kratos, Multiphysics opensource fem code, <http://www.cimne.com/kratos>.
- [5] Confederación Hidrográfica del Ebro. *Documento XYZT de la presa de Oliana*.
- [6] R. Lopez, E. Balsa-Canto y E. Oñate, *Neural networks for variational problems in engineering* International Journal for Numerical Methods in Engineering, Volume 75, Issue 11, Pages 1341-1360, 2008.
- [7] United States Bureau of Reclamation (1987). *Design of Small Dams*. ISBN 978-0160033735.
- [8] United States Bureau of Reclamation (2009). *Folsom Dam Joint Federal Project. Existing Spillway Modeling. Discharge Capacity Studies. HL-2009-02*.