

# COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

## EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD HIDROLÓGICA DE PRESAS BAJO UN ENFOQUE PROBABILÍSTICO

A. Sordo<sup>1</sup>, A. Jiménez<sup>2</sup>, L. Garrote<sup>1</sup>, F. Martín-Carrasco<sup>1</sup>

*RESUMEN: El presente trabajo realiza una propuesta metodológica para evaluar la seguridad hidrológica de una presa, con aplicación práctica para el diseño probabilístico de aliviaderos. La metodología consiste en la generación y análisis de numerosas avenidas junto con el desarrollo de un modelo que permite obtener una descripción probabilística del comportamiento del aliviadero frente a las variables estudiadas.*

*El trabajo es una combinación de técnicas previamente desarrolladas para plantear un nuevo enfoque metodológico en un problema de gran trascendencia práctica: la seguridad hidrológica de las presas. El principal aporte del documento se constituye en el estudio de un conjunto representativo de los posibles hidrogramas de entrada al embalse en lugar de un único hidrograma de proyecto. Esto permite el análisis probabilístico de los resultados, lo que facilita la incorporación de la incertidumbre hidrológica en las decisiones de diseño.*

*De esta forma se ha desarrollado un entorno de cálculo que permite el estudio de numerosos hietogramas y su respuesta en la cuenca con un bajo costo de tiempo de cómputo por lo que viabiliza la utilización de este tipo de herramientas y planteamientos probabilísticos con un esquema de simulación de Monte Carlo; siendo una herramienta muy útil para realizar estudios de evaluación de seguridad hidrológica de presas así como de sensibilidad de cada una de las variables que intervienen. Asimismo, un abordaje probabilístico al tema permite el*

---

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética, Universidad Politécnica de Madrid,

<sup>2</sup> Departamento de Hidrología, Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX

estudio del universo de posibles soluciones con su incertidumbre asociada como contraposición a los métodos determinísticos usualmente utilizados. Entre otros factores, la metodología de análisis planteada permite analizar la influencia de la forma del hietograma e hidrograma de entrada en el efecto laminador del embalse y puede observarse la existencia de una importante influencia de la forma de los hietogramas en la respuesta de la cuenca y los valores máximos de caudal en la entrada del embalse.

## 1. INTRODUCCION

Las presas constituyen un elemento esencial para la regulación de los recursos hídricos y contribuyen de manera significativa al desarrollo de las sociedades. Entre los principales beneficios asociados a las mismas se mencionan: aseguran la disponibilidad de agua para el abastecimiento a las ciudades, permiten el desarrollo de la agricultura, proporcionan energía eléctrica, protegen territorios ante grandes avenidas, facilitan la navegación interior en muchos ríos, contribuyen al desarrollo de actividades turísticas, entre otros.

Sin embargo, las presas son infraestructuras hidráulicas cuyo fallo puede causar daños materiales muy importantes además de poner en riesgo vidas humanas. Es claro, por tanto, la importancia de un buen diseño hidrológico de las mismas que impliquen un pequeño riesgo de fallo por causas hidrológicas teniendo en cuenta además el alto costo de este tipo de infraestructuras.

El presente trabajo se inspira en la necesidad motivada por la existencia de normativas y reglamentos (que establecen condiciones para el diseño hidrológico de las presas) que hacen necesario el desarrollo de metodologías y procedimientos para que sea posible su puesta en práctica, teniendo en cuenta además los nuevos avances científicos y posibilidades de cálculo así como la información usualmente disponible para el caso de España.

La práctica habitual utilizada en España para el diseño de la Avenida de Proyecto se basa en la aplicación de modelos hidrometeorológicos, con métodos de cálculo determinísticos (solamente se considera probabilidad en el cálculo del periodo del retorno adoptándose un valor único) donde se calcula una sola avenida de proyecto.

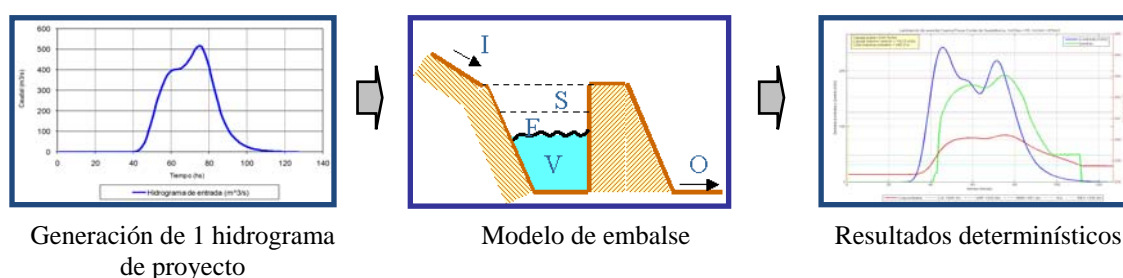


Figura1. Práctica habitual – Modelo hidrometeorológico – Método determinístico

Una avenida está condicionada por diferentes factores como ser las características de los eventos de lluvia y de la cuenca de aporte; una vez que ésta

llega a una presa, será afectada por el volumen de resguardo del embalse, condiciones iniciales, características del aliviadero, reglas de manejo del embalse, entre otras. Realizando el diseño según la práctica habitual no se puede efectuar un análisis del comportamiento global de la Avenida frente a todos los factores mencionados.

Por otra parte, en la actualidad, existen medios informáticos que permiten abordar procesos de cálculo intensivos permitiendo realizar un número importante de simulaciones y aplicar técnicas probabilísticas en el análisis.

De esta forma el presente trabajo propone la generación y análisis de numerosas Avenidas junto con el desarrollo de una metodología y un modelo que permite obtener una descripción probabilística del comportamiento del aliviadero frente a las variables estudiadas.

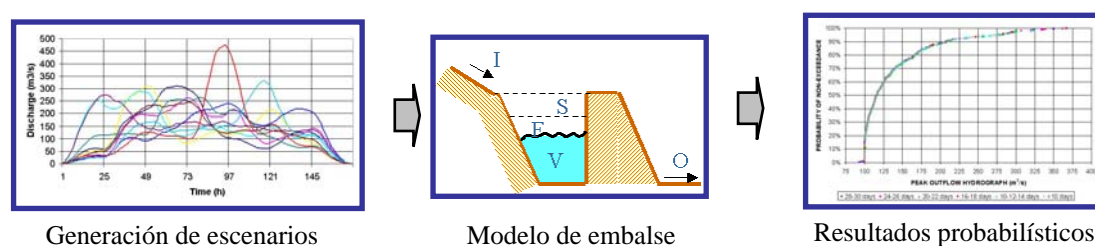


Figura 2. Modelo propuesto: Modelo hidrometeorológico en un entorno de simulaciones de Monte Carlo – Método probabilístico

## 2. METODOLOGÍA

El presente trabajo se acometió mediante la preparación de un modelo de simulación de Monte Carlo. Metodológicamente se utilizó un generador sencillo basado en modelos agregados e integrados, conformando un modelo hidrometeorológico (MH) en entorno Matlab. Este contempla un esquema que permite la especificación de distintas configuraciones de cuenca y realiza un análisis probabilístico y sistemático con un número importante de simulaciones (500 para cada configuración). Los procesos y métodos utilizados se presentan a continuación:

1. Generación de escenarios de precipitación en la cuenca (lluvia bruta) (proceso ARMA (2,2)),
2. Generación de escorrentía (lluvia neta) a partir de la lluvia bruta (método del número de curva (NC) propuesto por el Soil Conservation Service (SCS)),
3. Generación de hidrogramas de avenida a partir de la escorrentía (método del Hidrograma unitario adimensional propuesto por el SCS),
4. Propagación de caudales en los cauces (método de Muskingum),
5. Laminación de avenidas en embalses (método de PULS Modificado),
6. Operación de compuertas (método de Girón),

## 7. Módulo de proceso de resultados.

Una vez desarrollado el esquema de simulación de Monte Carlo se planteó un esquema de análisis a fin de caracterizar las distintas variables que intervienen (duración de los eventos de precipitación, volumen de embalse, superficie inundada, tipo y capacidad del aliviadero, volumen de resguardo en el embalse, forma de la curva (altura - volumen) del embalse, superficie de la cuenca y zona geográfica) y analizar el rango de valores de las variables para el que la consideración de los hidrogramas de avenida es poco relevante desde el punto de vista del cálculo.

Para abordar este análisis se trabajó con casos reales (cuencas y presas correspondientes) como configuración de partida y luego se realizaron variantes de forma de simular diferentes combinaciones de las variables consideradas y analizar la sensibilidad de las mismas en los procesos involucrados.

Como caso de estudio se seleccionó la presa de Cuerda del Pozo, ubicada en la cuenca alta del río Duero, provincia de Soria, con una cuenca vertiente de 545 km<sup>2</sup>.



Figura 3. estudio de caso

Las variables hidrológicas y morfológicas seleccionadas como una primera aproximación son:

- *Duración de los eventos de precipitación (D),*
- *Volúmen de laminación (Vlam),*
- *Tipo y capacidad del aliviadero,*
- *Volumen de resguardo en el embalse (Vres),*
- *Curva altura - volumen del embalse.*

Teniendo en cuenta que el presente trabajo luego se extenderá al análisis de las variables para un número importante de cuencas en diferentes regiones de España, es conveniente trabajar con variables adimensionales (en aquellas que corresponda) que sean representativas y comparables entre las diferentes cuencas de estudio.

En primer término se definen los siguientes valores característicos:

*Caudal máximo característico* ( $Q_c$ ): Es el caudal máximo de los hidrogramas de entrada al embalse con una probabilidad de superación del 50 %, período de retorno  $Tr$  dado y duración de los eventos de precipitación igual al tiempo de concentración de la cuenca ( $tc$ )

$$Q_c = \bar{Q}_{Tr,tc}$$

*Volumen del hidrograma de entrada al embalse característico* ( $V_c$ ): Es el volumen generado por un hidrograma de entrada al embalse con distribución triangular de duración  $tc$  y caudal máximo  $Q_c$ .

$$V_c = \frac{1}{2} \cdot tc \cdot Q_c$$

De esta manera se proponen las siguientes variables adimensionales:

Asociada a la **duración de los eventos de precipitación ( $D_a$ )**:

$$D_a = \frac{D}{tc}$$

Asociada al **volumen de laminación ( $V_a$ )**:

Previamente definimos dos variables:

**Nivel Avenida de Proyecto (NAP)**: Es la cota a la que el aliviadero vierte el Qc. Al Volumen del embalse a cota NAP se le denomina VNAP.

**Volumen de laminación ( $V_{lam}$ )**: Es la diferencia entre el VNAP y el volumen del embalse a cota de Nivel Máximo Normal (VNMN).

$$V_{lam} = VNAP - VNMN$$

$$V_a = \frac{V_{lam}}{V_c}$$

Asociada al **volumen de resguardo en el embalse ( $VR_a$ )**:

$$VR_a = \frac{V_{res}}{V_c}$$

## 2.1 DEFINICIÓN DE LA MUESTRA DE ANÁLISIS

El desarrollo del entorno informático señalado ha permitido un análisis sistemático del fenómeno de laminación en función de las variables de estudio. Con los resultados, entre otros estudios, se realizó un análisis probabilístico, donde se asignó probabilidad de no superación de ratios o variables de interés. Se puede apreciar en la siguiente figura, las diferencias o dispersión entre distribuciones de probabilidad representadas con diferente número de eventos manteniendo la configuración y variando en forma aleatoria la distribución temporal de los eventos de precipitaciones (100, 200 y 500 eventos). Para una buena representación de la distribución de probabilidad de la muestra, en esta etapa, se resolvió realizar 500 simulaciones para cada configuración. En el futuro se intentará asociarlas a una función de distribución específica (son muy similares a una distribución normal) de forma de definir el número de casos necesarios para un intervalo de confianza dado.

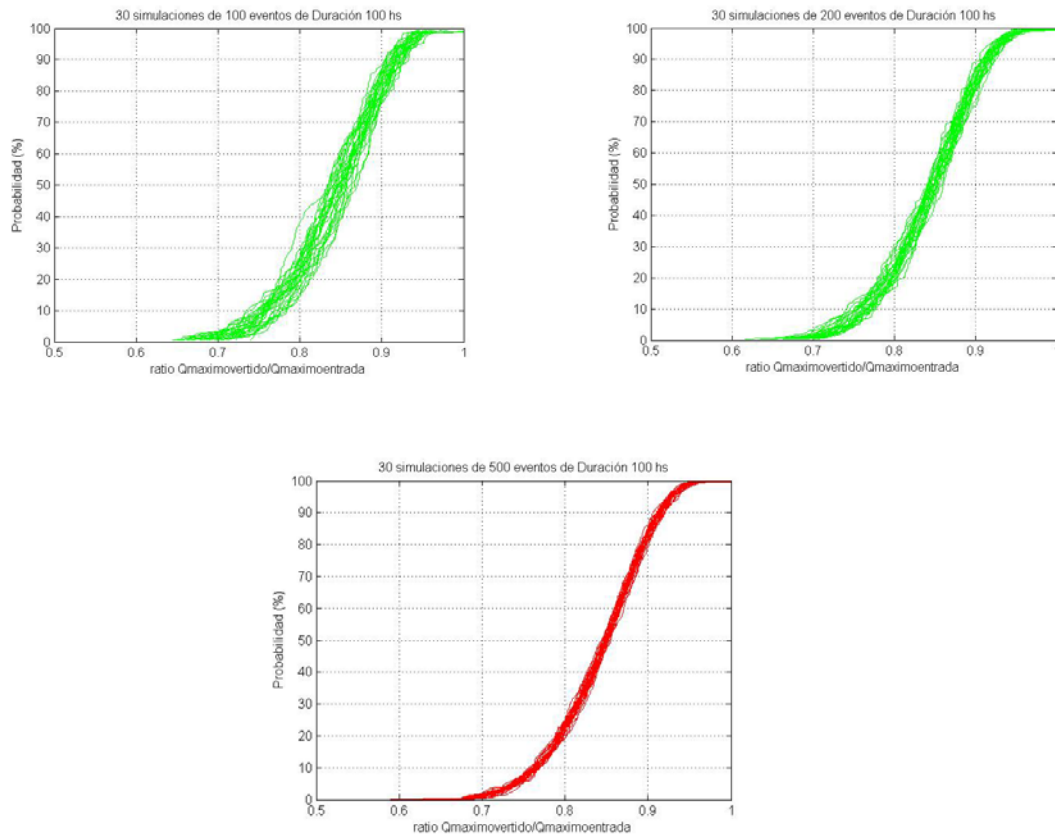


Figura 4. Dispersión de distribuciones de probabilidad para diferentes números de casos analizados.

### 3. RESULTADOS

Se analizaron 2 variantes dentro de una misma configuración:

- Aliviadero con 2 vanos (2 x 12 x 6.77m) (se supone 1 compuerta averiada)
- Aliviadero con 3 vanos (3 x 12 x 6.77m) (máxima capacidad real)

Se simularon dos situaciones de volumen de resguardo:

- $VR_a = 0.36$  ( $V_{res} = 12.44 \text{ hm}^3$ )
- $VR_a = 0.06$  ( $V_{res} = 2.0 \text{ hm}^3$ )

Duraciones para la generación de los aguaceros de cálculo:

- $D_a = 1$  ( $D = 14 \text{ hs}$ )
- $D_a = 3.43$  ( $D = 48 \text{ hs}$ )
- $0.71 < D_a < 7.14$  ( $10 \text{ hs} < D < 100 \text{ hs}$ )

En cada uno de los casos se analizó la influencia de la variación del VNMN (correspondiente a diferentes  $VR_a$ ), que representa el efecto de la superficie inundada a NMN:

- $V_{NMN} = 248.8 \text{ hm}^3$  - cota 1084.45 (caso real)
- $V_{NMN} = 67.2 \text{ hm}^3$
- $V_{NMN} = 13 \text{ hm}^3$
- $V_{NMN} = 3 \text{ hm}^3$

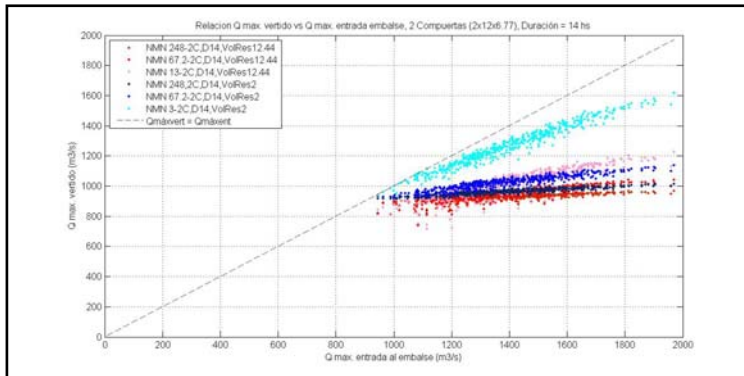
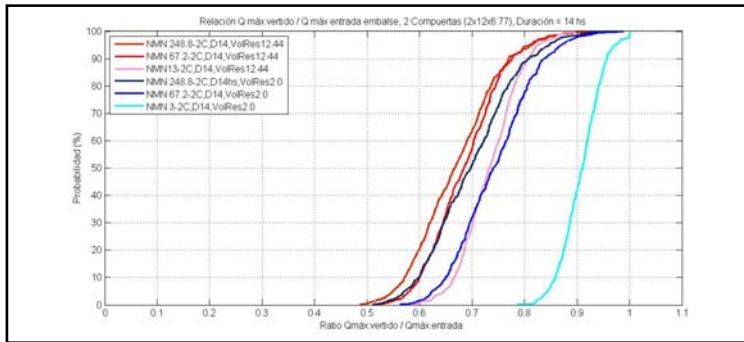


Figura 5. Aliviadero: 2 compuertas (2 x 12 x 6.77m) – Da = 1 (D=14hs)

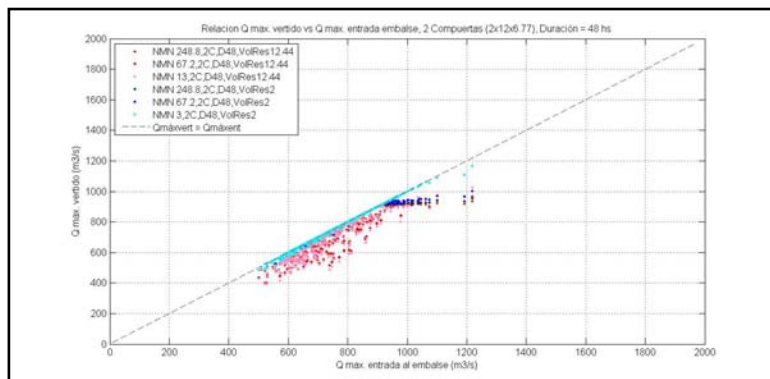
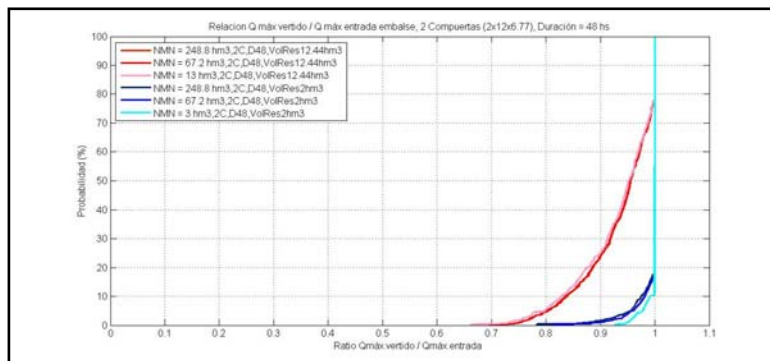


Figura 6. Aliviadero: 2 compuertas (2 x 12 x 6.77m) – Da = 3.43 (D=48 hs)



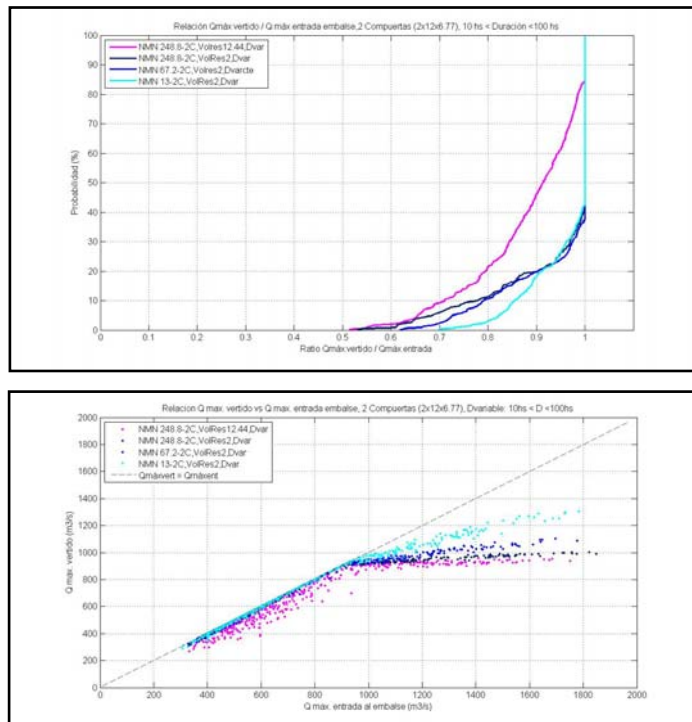


Figura 7. **Aliviadero: 2 compuertas (2 x 12 x 6.77m) – D<sub>a</sub> variable (0.71 < D<sub>a</sub> < 7.14)**

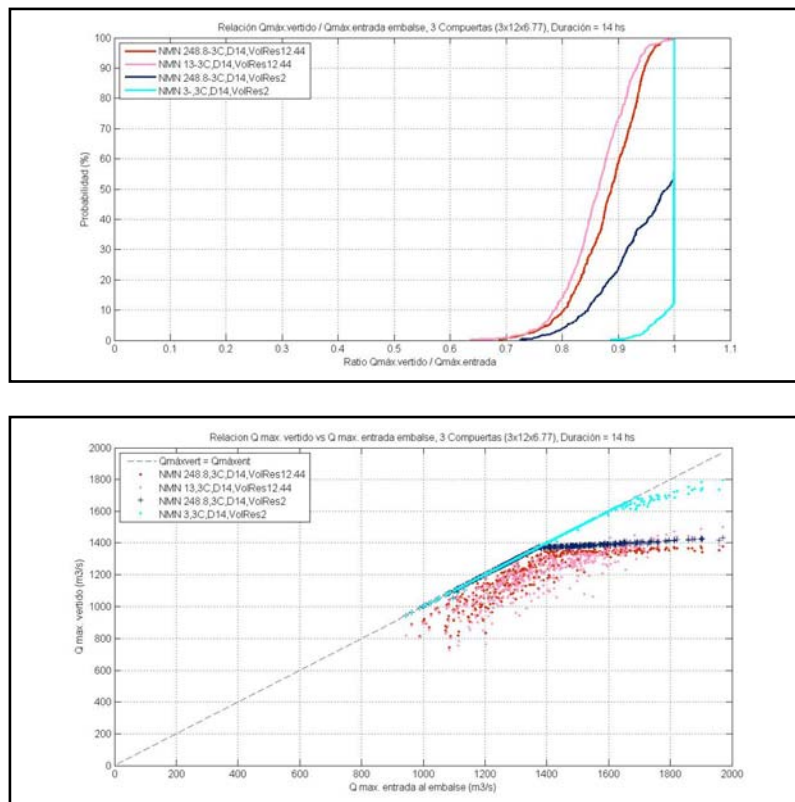


Figura8. **Aliviadero: 3 compuertas (3 x 12 x 6.77m) – D<sub>a</sub> = 1**

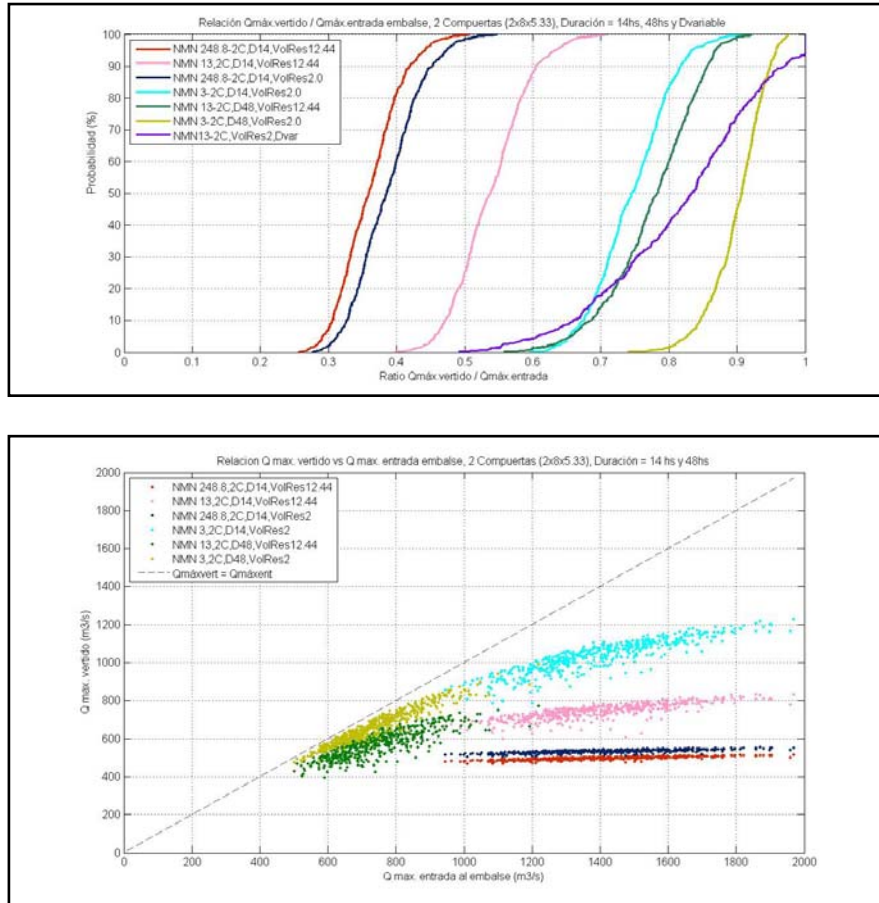


Figura 9. **Aliviadero: 2 compuertas, altura 8m, longitud 5.33m (2x8x5.33)  $D_a = 1$ ,  $D_a = 3.43$  y  $D_a$  variable ( $0.71 < D_a < 7.14$ )**

#### 4. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se extraen las siguientes conclusiones:

La metodología de análisis planteada permite analizar la influencia de la forma del hidrograma de entrada en el efecto laminador del embalse. Los resultados muestran una sensibilidad significativa a todos los factores analizados (tipología de aliviadero, volumen de resguardo, superficie inundada, etc.)

Para duración de tormenta fija, los mayores efectos de laminación se producen para los máximos caudales de entrada, como consecuencia de haber analizado hidrogramas con idéntico volumen.

Se propone como criterio de sencilla aplicación considerar que el efecto de laminación es importante cuando existe un porcentaje significativo (por ejemplo, superior al 20%) de casos en los que la relación entre el caudal punta de salida  $Q_s$  y el caudal punta de entrada  $Q_e$  está por debajo de un umbral (por ejemplo,  $Q_s < 0,9Q_e$ ).