

Simulación de rotura de presas aterradas con fondo móvil. Caso de estudio

Sanz-Ramos, M.^{a1}, Olivares, G.^{a2} y Bladé, E.^{a3}

^{a1}Institut Flumen (UPC-CIMNE). Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech
C/ Jordi Girona 1, Campus Nord (Ed. B0-S1) - 08034 - Barcelona (España)
E-mail: ^{a1}marcos.sanz-ramos@upc.edu, ^{a2}gonzalo.olivares@upc.edu, ^{a3}ernest.blade@upc.edu

Línea temática A | Dinámica fluvial de embalses, estuarios y humedales

RESUMEN

Los estudios de rotura de presas han permitido conocer la peligrosidad y el riesgo de inundación asociado a un posible fallo de estas estructuras. La legislación y documentos técnicos vigentes en España marcan el camino a seguir para la correcta clasificación de la presa en función del riesgo potencial que supone para la sociedad, la economía y el medioambiente. Sin embargo, estos documentos no indican cómo proceder cuando la presa a clasificar se encuentra parcial o totalmente aterrada de sedimentos. El presente documento tiene por objeto presentar una nueva metodología para afrontar estudios de rotura de presas aterradas mediante un modelo numérico que permita, al mismo tiempo, simular la formación de la brecha y el transporte de sedimentos. Esta metodología ha sido aplicada a una presa en el río Llobregat (Gironella, España). Se ha podido observar cómo el hidrograma tras rotura es mayor cuando se considera el fondo móvil.

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son fenómenos naturales que causan graves daños económicos, ambientales y sociales. La sensibilidad de la población frente a eventos que potencialmente puedan ocasionar riesgo es muy diversa, dependiendo en gran medida del tipo de riesgo y de su percepción a la exposición al mismo.

Para hacer frente a esta problemática, la Unión Europea ha tratado de fijar unas pautas para minimizar el riesgo de inundación. La Directiva Europea 2007/60/CE de inundaciones (DOUE-L-2007-82010), transpuesta en el estado español mediante el Real Decreto 903/2010 de 9 julio (BOE-A-2010-11184), obliga a los estados miembros a realizar una serie de fases para evaluar el riesgo de inundación. Estas fases se pueden resumir en tres bloques: la identificación y selección de las áreas de riesgo potencial (Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación, EPRI, y Áreas con Riesgo Potencial Significativo de Inundación, ARPSI); la elaboración de mapas de peligrosidad y riesgo; y la realización de los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI).

Los PGRI son documentos que deben permitir gestionar una eventual inundación y, además, ofrecer al ciudadano información referente a su nivel de exposición y riesgo frente a este tipo de sucesos. Sin embargo, estos documentos no contemplan, por el momento, la evaluación de la peligrosidad y riesgo por inundaciones urbanas (por precipitación) o de carácter no fluvial. En este aspecto destacan las inundaciones que podrían suceder tras la posible rotura de una presa o balsa.

En España se contempla el análisis de la peligrosidad y riesgo de inundación por una eventual rotura de una presa o balsa a través de documentos ya existentes, como son: el “Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses” (BOE-A-1996-7319) y la “Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones” (BOE-A-1995-3865). En ellos se describe, entre otros aspectos, cómo clasificar la presa en función del riesgo potencial según tres categorías (A, B y C) y sobre quién recae la responsabilidad de realizar dicha clasificación.

Las dificultades acaecidas para llevar a cabo la correcta clasificación de presas y balsas, llevaron al Ministerio de Medio Ambiente, a través de la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas, a interpretar la legislación vigente. V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de Octubre. A Coruña

Todo ello se plasmó en la “*Guía Técnica para la Clasificación de presas en función del riesgo potencial*” (MMA, 1996), en adelante *Guía Técnica*. Este documento tiene como fin definir las bases técnicas para el análisis de la rotura de presas y balsas.

La *Guía Técnica* es el documento de referencia para la clasificación de presas en España. Abarca el análisis de diferentes tipologías de presas y balsas (gravedad, contrafuertes, bóveda y materiales sueltos). Para cada una de ellas describe el tipo de rotura y características de la brecha. Las dimensiones de ésta sirven para definir el hidrograma tras la rotura, ya sea de manera teórica (para alimentar modelos numéricos o conceptuales) o directamente a través de modelos numéricos. Sin embargo, el marco normativo deja cierta libertad para adaptar la metodología descrita a cada caso de estudio, siempre que sea debidamente justificada (*Guía Técnica*. Capítulo III, apartado 1).

Por otro lado, la modificación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (DPH), llevada a cabo mediante el Real Decreto 9/2008 (BOE-A-2008-755), obligó a propietarios de presas y balsas de más de 5 metros a solicitar la realización del pertinente estudio de clasificación de presa o balsa (Artículo 356 y 367). La aplicación es válida para titulares públicos y privados de presas y balsas existentes, en fase de construcción y de proyecto. Consecuentemente, estructuras de un tamaño comprendido entre 5 y 15 metros debían ser analizadas (presas de una altura superior a 15 metros ya eran tratadas en las legislaciones anteriores).

Con esta nueva legislación, el estudio de rotura de presas situadas en cursos fluviales supone un nuevo paradigma. La interrupción, parcial o total, de la dinámica sedimentaria del río debida a la presa provoca la acumulación de sedimentos en el reservorio (Arbat-Bofill et al., 2014; Palau et al., 2004; Schleiss et al., 2016; Vericat D. y Batalla R. J., 2004; entre otros). En función de la morfología del embalse, la aportación de sedimentos y los años que lleve en funcionamiento la presa, el nivel de aterramiento puede llegar a ser muy importante (Arbat-Bofill et al., 2014; entre otros). Es por ello que el análisis de rotura de presas en ríos puede ser enfocado desde dos puntos de vista muy distintos: el estudio en situación original o el estudio en situación actual.

Sin embargo la *Guía Técnica* no especifica, así como tampoco lo hacen las legislaciones mencionadas anteriormente, cuál de estas situaciones debe llevarse a estudio o en qué casos escoger un escenario en detrimento del otro (*Guía Técnica*. Capítulo II, apartado 6.1). La *Guía Técnica* indica que se deben realizar los estudios considerando fondo fijo tan solo aguas abajo de la presa, dejando un vacío en lo referente al sedimento sujeto a movilizarse dentro del embalse (*Guía Técnica*. Capítulo II, apartado 5.4.1 y 5.4.3).

Es previsible que existan diferencias entre ambas hipótesis. Por un lado, el posible aterramiento en el reservorio reducirá el volumen del embalse (V), siendo esta variable una de las principales para el cálculo de los tiempos de formación (T) y anchos (B) de la brecha en el caso de presas de materiales sueltos. Por otro lado, la movilización de sedimentos dentro del reservorio puede dar lugar, en función de la hipótesis analizada, a un incremento puntual de la capacidad de almacenaje que, en función del tiempo de formación de la brecha, pueda ocasionar un mayor volumen de vertido (hidrograma tras rotura).

Con el objetivo de afrontar esta problemática, se desarrolló una metodología que permite realizar estudios de clasificación de presas de gravedad con aterramiento, parcial o total, situadas en cursos fluviales. Los pasos descritos se encuentran en sintonía con la metodología expuesta en la *Guía Técnica* (Capítulo III, apartado 5).

Esta metodología se aplicó a un caso de estudio de una pequeña presa (5.25 m de altura) situada en la cuenca alta del río Llobregat (Gironella, España). En esta presa, del s. XIX, se han almacenado sedimentos hasta alcanzar un nivel de aterramiento superior al 75 % de su capacidad original. Puesto que los caudales de diseño para realizar su clasificación son elevados, presumiblemente se producirá la movilización del sedimento de fondo. Se compararon los resultados con los análisis clásicos.

MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología propuesta se basa en lo que describe la *Guía Técnica* en el apartado 5.1 del Capítulo III (Método completo). En este apartado se fomenta el empleo de modelos hidráulicos completos por ser éstos los únicos capaces de representar con precisión la formación de la brecha, la definición del hidrograma tras rotura, la propagación de la onda de avenida y, por ende, la determinación del área de inundación.

Esta metodología puede ser aplicada al estudio de rotura de presas de manera integral o tratando cada proceso por separado (Figura 1). Los procesos que la integra se dividen en tres: un modelo que permita realizar la generación de la brecha teniendo en cuenta el fondo móvil (transporte de sedimentos) para la obtención del hidrograma tras rotura; un modelo que permita simular la inundación a partir del hidrograma obtenido; y la evaluación de los distintos escenarios para cuantificar los posibles daños tras la rotura.

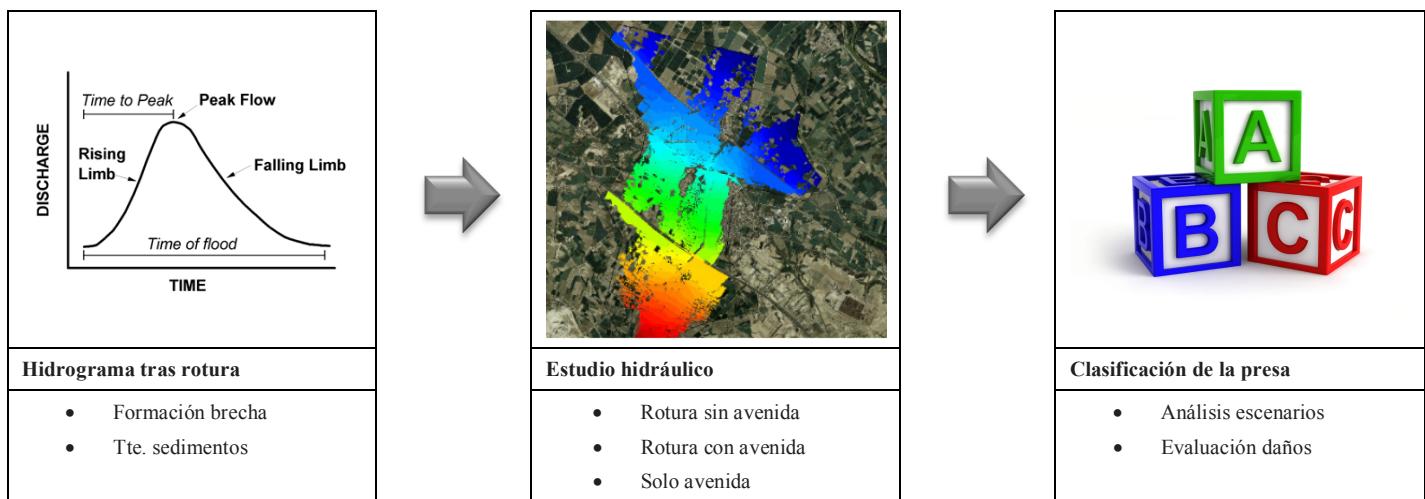


Figura 1 | Esquema de la metodología para el estudio de rotura de presas con aterramiento.

Los dos primeros procesos requieren de modelos hidráulicos según el Método Completo propuesto por la *Guía Técnica*. En la actualidad existen numerosos programas para el cálculo del hidrograma tras rotura (DAMBRK, SMPDBK, Iber, etc.) y para la simulación de inundaciones en régimen variable (INFOWORKS, Hec-Ras, Iber, GUAD 2D, etc.), o combinación de ambos (una revisión de estos modelos se puede encontrar en Caballero et al., 2015). Sin embargo son pocos los que permiten simular el hidrograma tras rotura y la inundación que generaría teniendo en cuenta la previsible movilización de sedimentos que la rotura generaría en una presa aterrada.

La elección entre un proceso integral o por separado depende del modelo hidráulico utilizado. Para el caso de estudio que se presenta a continuación se empleó el análisis por separado. Se obtuvo primero el hidrograma tras rotura utilizando el modelo numérico bidimensional Iber (Bladé et al., 2014), que integra una herramienta para realizar de formación de la brecha y el cálculo hidráulico teniendo en cuenta el fondo móvil (transporte de sedimentos). Posteriormente, este hidrograma alimentó el modelo unidimensional Hec-Ras (Brunner, 2008).

Caso de estudio

La presa a clasificar se sitúa de manera oblicua al flujo en un pequeño meandro de la cuenca alta del río Llobregat en la localidad de L’Ametlla de Casserres, España (Figura 2). Fue construida a finales del siglo XIX para obtener energía para una colonia industrial. Actualmente su finalidad es elevar la lámina de agua para alimentar un canal (Figura 3a) y generar energía hidroeléctrica mediante una mini-central.

Esta pequeña estructura está compuesta de hormigón, fue construida como un único bloque y presenta una geometría irregular. Su planta está ligeramente curvada y el alzado tiene una altura variable, tanto en la coronación como en el pie de presa. La máxima altura de la presa (H) es de 5.25 m (Figura 3b), de modo que resulta necesario realizar el pertinente estudio de clasificación (BOE-A-2008-755).

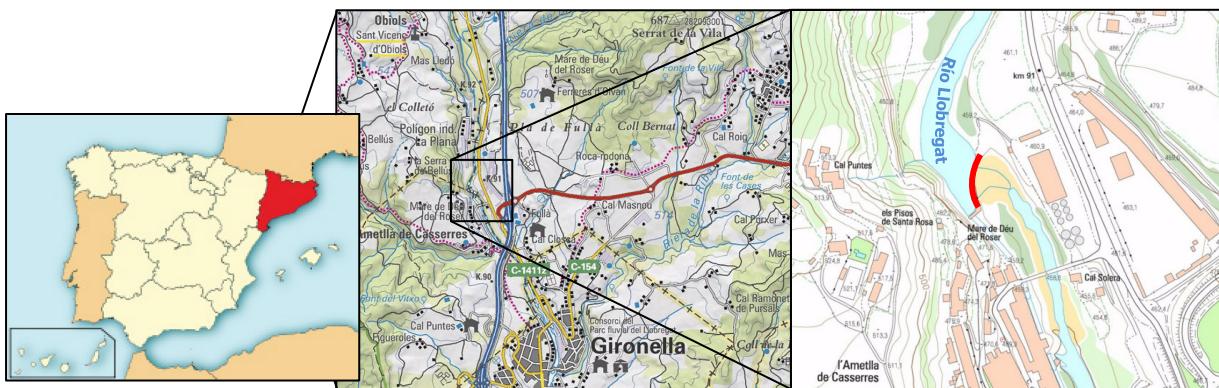


Figura 2 | Ubicación de la presa estudiada. En rojo se muestra la alineación en planta de la presa (Fuente: ICGC).

Con una longitud de coronación de 70 m, no presenta órganos de desagüe más allá de un pequeño vertedero en la margen izquierda. Su construcción, previa a la del embalse de La Baells (1976), ha propiciado la acumulación de sedimentos en el reservorio (Figura 3c). Asimismo, en la Figura 3b se aprecia la ausencia de sedimentos aguas abajo del cuerpo de presa, quedando al descubierto parte de la cimentación. Ello indica que la dinámica sedimentaria ha sido importante para los caudales que se producen en la zona, ya sea por precipitación o por desembalse desde La Baells.



a)



b)



c)



d)

Figura 3 | Detalle del estado actual de la presa: a) canal de entrega de la mini-central; b) cuerpo de presa (órgano de desagüe situado en la margen izquierda y descalce de los cimientos); c) estado de sedimentación en el reservorio; y d) tamaño del sedimento situado aguas abajo.

El embalse creado por la presa a estudio ha quedado prácticamente colmatado de sedimentos (Figura 3c). La batimetría se ha visto modificada considerablemente. La altura del fondo del embalse oscila en el intradós de la presa entre 0.5 y 1 m por debajo de la cota de coronación. Teniendo en cuenta que el lecho rocoso se encuentra a escasos metros por debajo de la cimentación (Figura 3b), la altura de sedimentos podría alcanzar en algunas zonas los 4.5 metros de profundidad.

Para definir la extensión del estudio clasificación de la presa se emplearon los mapas de inundabilidad existentes en la zona (ACA, 2009). Su análisis redujo la zona de estudio a un tramo de 12 km del río Llobregat, desde la cola del embalse hasta el azud de Cal Ponts en la localidad de Puig-Reig. Aguas abajo de este punto no se apreciaron inundaciones en zonas sensibles para el caudal de periodo de retorno de 500 años. Este tramo incorpora núcleos urbanos, infraestructuras de carácter básico (autopistas y carreteras) y zonas industriales.

El estudio de clasificación de la presa se llevó a cabo empleando la metodología tradicional (fondo fijo) y la metodología presentada en este documento (fondo móvil), a fin de poderlas comparar.

Hidrograma tras rotura (Iber)

El hidrograma tras rotura de la presa se obtuvo mediante el modelo numérico Iber. Este modelo se extendió desde la confluencia del río Llobregat con la riera de Portella (900 m aguas arriba del cuerpo de presa) hasta aguas arriba del puente que da acceso a la antigua colonia industrial de L'Ametlla de Casserres (100 m aguas abajo del cuerpo de presa).

La topografía utilizada es una combinación del Modelo Digital del Terreno (MDT) de 5x5 m del Institut Cartogràfic i Geogràfic de Catalunya (ICGC) y las secciones empleadas en el modelo unidimensional para la realización del PGRI del río Llobregat (ACA, 2009). La presa se incorporó manualmente al modelo a partir de sus datos geométricos. Para la discretización espacial se empleó una malla de cálculo de aproximadamente a 13300 elementos triangulares, cuyo tamaño varió entre 3 y 7 metros. Se utilizó una malla más densa en el embalse y en el cuerpo de presa para obtener mayor precisión en los resultados.

Se simularon los distintos escenarios (Figura 1) empleando el caudal correspondiente al periodo de retorno de 500 años ($937.2 \text{ m}^3/\text{s}$). Las características de la brecha quedaron definidas según lo expuesto en la *Guía Técnica* (Capítulo II, apartado 5.3). La rugosidad fue constante e igual para todo el modelo con un valor de $0.044 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$, en concordancia con lo expuesto en el PRGI del río Llobregat (ACA, 2009).

El módulo de sedimentos empleado en Iber fue el de transporte de sedimentos de fondo (Corestein y Bladé, 2013). La ecuación utilizada se basa en la descrita originalmente por Meyer-Peter y Müller (1948), y que fue redefinida por los trabajos de Wong y Parker (2006). Según lo observado (Figura 3), el sedimento se compone de limos y arenas aguas arriba de la presa y de gravillas aguas abajo de la presa. Los parámetros del sedimento utilizados son: D_{50} de 0.03 m, porosidad de 0.4 y ángulo de fricción interna de 0.55. Se definió la posición de la roca 0 metros por debajo de la topografía teniendo como referencia la cota aguas abajo de la presa (Figura 3b).

Cabe destacar que los modelos hidráulicos bidimensionales que permiten estimar el transporte de sedimentos, lo hacen en general mediante formulaciones empíricas. La elección de una u otra formulación puede dar resultados diferentes (Soares-Frazão et al., 2012). La realización de una campaña experimental para determinar las características del sedimento resulta necesaria para la obtención de resultados adecuados. En el caso de estudio no se contó con dicha campaña, de modo que las características del sedimento se definieron a fin no subestimar el hidrograma tras rotura.

La simulación se llevó a cabo en régimen permanente para el caudal de diseño. Una vez alcanzado el estacionario, se habilitó la formación de la brecha y el transporte de sedimentos (fondo móvil). También se analizó la situación con fondo fijo para su posterior comparación. Los hidrogramas obtenidos para el escenario de rotura de presa en situación de avenida se utilizaron como condición de entrada en el modelo hidráulico.

Estudio hidráulico (Hec-Ras)

La simulación de los distintos escenarios se llevó a cabo mediante el modelo numérico unidimensional Hec-Ras. La elección de este modelo frente a otros vino motivada por la existencia del modelo hidráulico completo realizado por el ACA dentro del PGRI del río Llobregat (ACA, 2009). Este modelo incluye el curso alto y medio del río, así como arroyos de importancia, de manera que fue adaptado a las necesidades del estudio (desde la presa hasta la localidad de Puig-Reig). Asimismo, incorpora la definición geométrica de 12 puentes y 11 azudes y pequeñas presas existentes en el tramo de estudio.

Se analizaron los tres escenarios descritos por la *Guía Técnica* (Capítulo II, apartado 5.2). Los escenarios que contemplan la rotura de la presa (con y sin avenida) fueron calculados en régimen variable, y se alimentaron con los hidrogramas calculados con el modelo Iber. Por un lado los obtenidos mediante la metodología clásica (fondo fijo) y por otro los obtenidos mediante la metodología propuesta (fondo móvil). Finalmente se simuló la situación en avenida sin rotura de presa a fin de evaluar los daños incrementales que ésta provoca (régimen permanente).

Clasificación de la presa

La clasificación de la presa, considerada como “pequeña presa”, se llevó a cabo bajo las recomendaciones de la *Guía Técnica*, tanto con fondo fijo como móvil. El esquema del proceso de clasificación se detalla en el Capítulo III, apartado 4.

La evaluación de daños puede realizarse de manera cualitativa, si la clasificación de la presa es obvia, o cuantitativa, a partir de variables hidráulicas. En el caso de estudio se optó por una determinación de los efectos de la rotura de forma cuantitativa.

RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los procesos de obtención del hidrograma tras rotura y del estudio hidráulico.

Hidrograma tras rotura

La formación de la brecha se fijó en 10 minutos, por tratarse de una presa de gravedad, y el tamaño de la brecha fue de 23.3 m (1/3 de la longitud de coronación). Ello se plasmó en la modificación de la malla de cálculo, reduciendo la cota progresivamente desde coronación hasta el lecho del río. Las consecuencias hidráulicas de este fenómeno son la creación de una vía de flujo preferente donde el campo de velocidades y el calado se incrementan provocando la movilización de sedimentos (Figura 4).

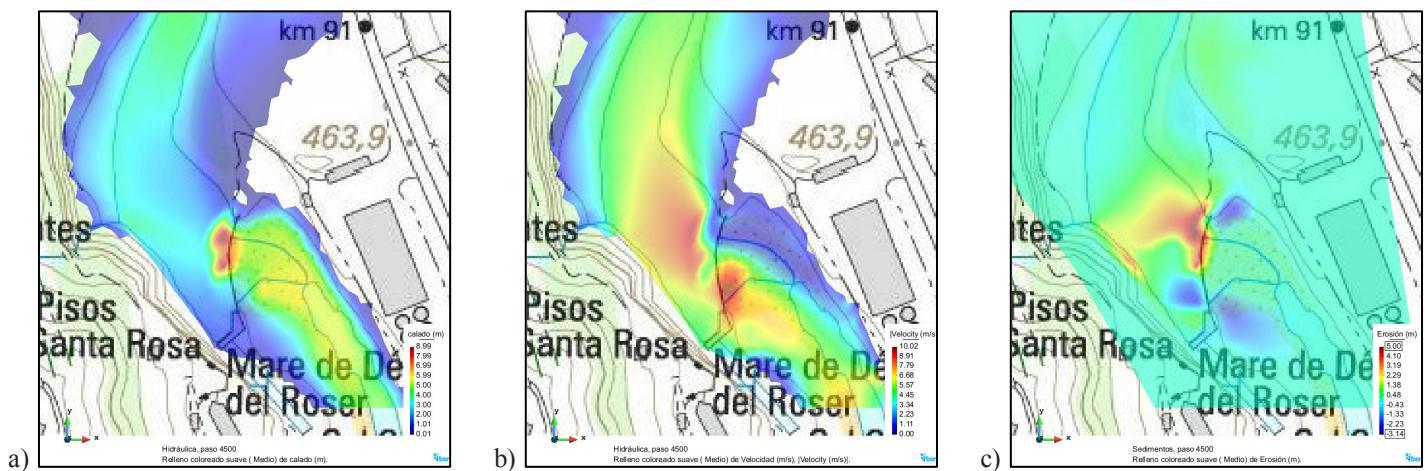


Figura 4 | Mapa de calados (a), mapa de velocidades (b) y mapa de erosiones (c) diez minutos después de producirse la rotura de la presa.

La ecuación de transporte de sedimentos empleada relaciona directamente la tensión de fondo con el caudal sólido (Wong y Parker, 2006). El incremento de la velocidad, provocada por la formación de la brecha, motivó la movilización del sedimento situado en el embalse. Este efecto fue más acusado en situación de rotura con avenida.

La sucesión de imágenes que se muestra en la Figura 5 permiten observar la evolución sedimentaria a lo largo de la simulación (7 horas). Se consideró el inicio de la formación de la brecha como el instante inicial para la evaluación de los

resultados (t_{0h}). Durante la primera hora de simulación (de t_{-1h} a t_{0h}) no existió transporte de sedimentos (obtención del régimen estacionario). Una vez iniciada la formación de la brecha (t_{0h}) se activó el módulo de transporte de sedimentos, lo que provocó variaciones importantes en el cauce del río. En los 10 primeros minutos (t_{+10m}) se superaron los 4 metros de erosión (Figura 5b) aguas arriba de la presa. Para tiempos de simulación grandes (t_{+6h}) se puede observar que el lecho del río ha alcanzado el equilibrio (Figura 5g).

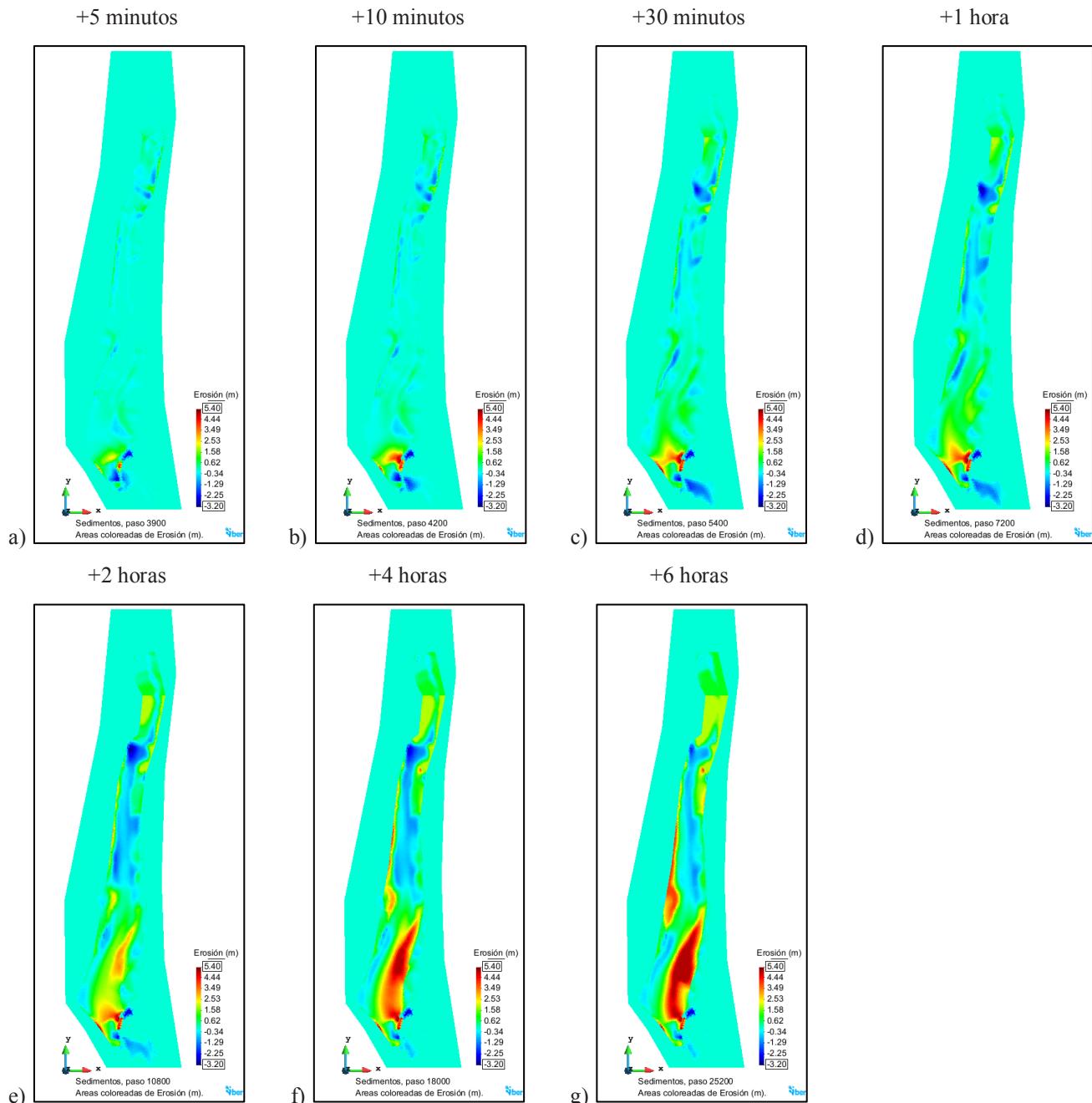


Figura 5 | Evolución sedimentaria del embalse. Mapa de erosión (+) y sedimentación (-) para los tiempos a) +5 min, b) +10 min, c) +30 min, d) +1 h, e) +2 h, f) +4 h y g) +6 h sucedidos tras la rotura de la presa.

La erosión obtenida fue progresiva y avanzó hacia aguas arriba. Durante los primeros instantes la enorme cantidad de sedimentos movilizado generó su deposición aguas abajo de la presa (Figura 5b, c, d, e). Al final de la simulación se observa la

existencia de una gran zona de erosión en la margen izquierda del río aguas arriba de la presa y pequeñas zonas de sedimentación aguas abajo de la presa, a ambos lados de la brecha (Figura 5g).

La exigua capacidad del embalse en la situación actual condujo a hidrogramas de escasa relevancia, con caudales pico inferiores a $25 \text{ m}^3/\text{s}$. El hidrograma tras rotura con mayor significancia para el estudio de clasificación de la presa se dio para el escenario con avenida empleando la metodología propuesta (fondo móvil). El caudal pico de éste fue de $64.8 \text{ m}^3/\text{s}$ por encima del caudal de diseño ($937.2 \text{ m}^3/\text{s}$), lo que supuso un incremento del 6.9 %, y tuvo una duración aproximada de 30 minutos. Este incremento de caudal entre el hidrograma considerando fondo fijo y fondo móvil es debido a un incremento puntual de la capacidad del embalse por la movilización de sedimentos.

Estudio hidráulico

De los escenarios de cálculo analizados, tan solo el hidrograma obtenido según la metodología propuesta fue ligeramente superior a la máxima crecida ordinaria (MCO, $59 \text{ m}^3/\text{s}$). Para caudales inferiores al MCO no se producen daños de consideración (ACA, 2009). Por este motivo, tan solo se analizaron los daños incrementales debidos a la rotura de la presa en situación de avenida con fondo móvil (Escenario 2) frente a la situación de avenida sin rotura (Escenario 3).

El Escenario 2 se realizó en régimen variable. Para poder comparar los resultados con el Escenario 3, realizado en régimen permanente, se ajustaron los parámetros del modelo para que la inundación con un caudal de 500 años de periodo de retorno fuese similar calculada en régimen permanente y variable.

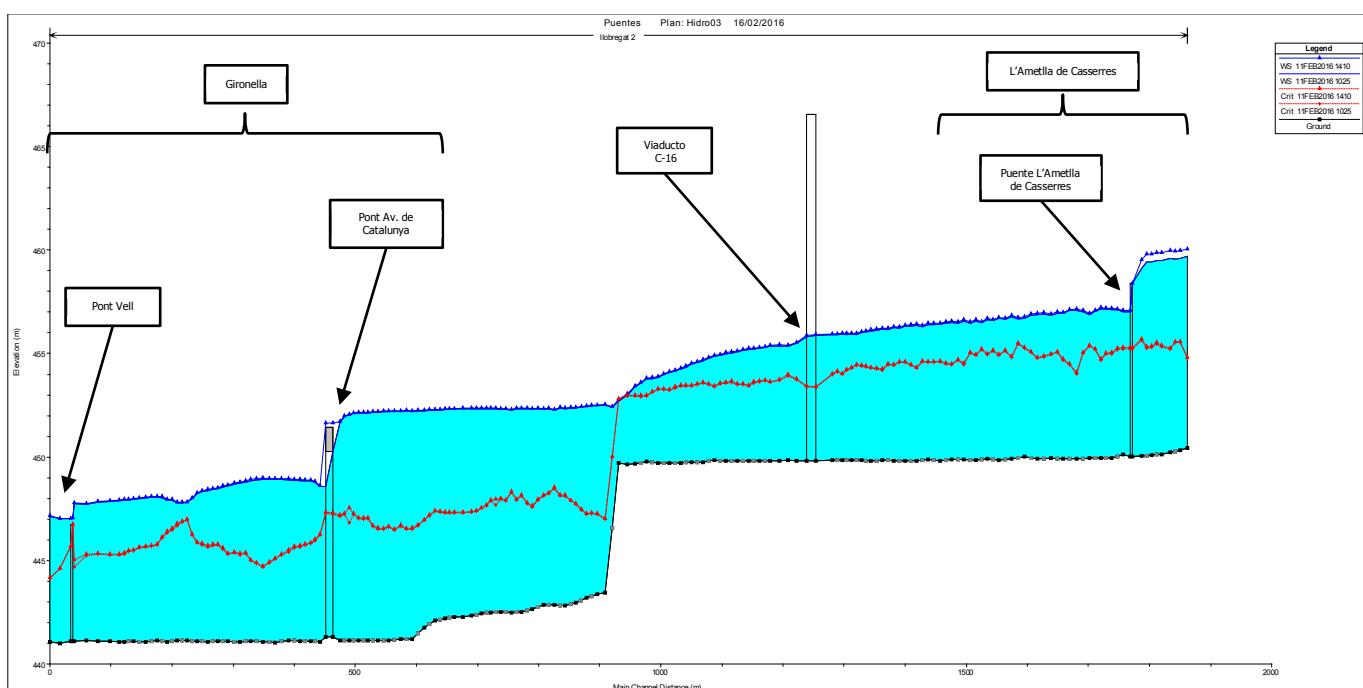


Figura 6 | Perfil longitudinal del río Llobregat para la inundación de periodo de retorno de 500 años (línea azul con superficie coloreada) y rotura de la presa (línea azul con marcador). Tramo comprendido entre el pie de presa y la localidad de Gironella.

La propagación del frente de onda provocado por la rotura de la presa (Escenario 2) generó la sobreelevación de la lámina de agua. Se produjeron incrementos en la lámina de agua de 0.4 m en el tramo comprendido entre la presa y el puente que da acceso a L'Ametlla de Casserres (Figura 6). Este puente propició un “efecto presa”, inundando algunas zonas aguas arriba y regulando el caudal hacia aguas abajo. Las sobreelevaciones desde este puente hasta el final del tramo de estudio fueron inferiores a 0.07 m. Cabe destacar que el puente de la Av. de Catalunya (Gironella) presenta un comportamiento distinto en régimen permanente y régimen variable. Las diferencias de cota aguas arriba y aguas abajo de este puente son de 0.01 m, de

modo que la entrada en carga del mismo (Figura 6) son atribuibles al tratamiento interno de las ecuaciones de flujo a través de puentes con los dos módulos de cálculo que emplea Hec-Ras (Bladé et al., 2009).

Clasificación de la presa

Con el objetivo de clasificar la presa en función del riesgo potencial, se evaluaron los daños incrementales dividiendo la zona de estudio en dos subtramos. El primero, definido desde la presa hasta el puente de acceso a L’Ametlla de Casserres (Figura 2), y el segundo, desde este punto hasta el final del tramo (Puig-Reig).

El incremento de la lámina de agua de 0.4 m en el primer tramo afectaría a edificaciones situadas en la margen derecha del río. Sin embargo, estos edificios ya se encontrarían inundados bajo la avenida de 500 años de periodo de retorno, de modo que no existirían daños incrementales. En el segundo tramo, a excepción de la sobreelación provocada por el puente de la Av. de Catalunya (Gironella), no se apreció la inundación de nuevas zonas sujetas a ser tenidas en cuenta para el análisis de daños.

El análisis de la metodología clásica (fondo fijo) arrojó resultados de menor envergadura, tanto en el nivel del agua como en la extensión de la mancha de inundación. Por el contrario, la metodología propuesta, que considera el fondo móvil en el reservorio del embalse, generó un caudal de rotura superior. Ello originó una mancha de inundación superior, afectando a nuevas zonas (sobre todo en los primeros metros). Sin embargo, en ambos supuestos la clasificación de la presa resultó ser de tipo C.

DISCUSIÓN

En el caso de estudio se produce una considerable movilización de sedimentos ($>1000 \text{ m}^3$ de material sólido), sobre todo durante el tiempo en el que se incrementa el caudal tras la rotura de la presa ($>650 \text{ m}^3$). La dinámica sedimentaria evaluada mediante modelos numéricos que implementan ecuaciones empíricas es fuertemente dependiente de las ecuaciones y de los parámetros del sedimento que se empleen (Soares-Frazão et al., 2012). Un estudio *ad hoc* para la caracterización de los parámetros físicos del sedimento es necesario para llevar a cabo una adecuada modelización. En el presente estudio esta caracterización no se llevó a cabo, siendo los parámetros del sedimento estimados.

Lógicamente, tamaños de sedimento menores (D_{50}) favorecerían una mayor movilización de sedimentos para las mismas condiciones hidráulicas. Por el contrario, tamaños mayores de partícula propiciarían un menor flujo de sedimentos de fondo.

Bajo estos supuestos, para el caso de estudio con fondo móvil se generó un hidrograma de rotura con un caudal punta y una duración mayores que considerando el fondo fijo. Consecuentemente, los parámetros del sedimento escogidos dejaron del lado de la seguridad en cuanto a la evaluación del riesgo de inundación y, por ende, de los daños potenciales asociados a la rotura de la presa.

CONCLUSIONES

Los estudios de rotura de presas con aterramiento no son contemplados, por el momento, por la legislación vigente y los documentos técnicos de referencia. Por el contrario, la flexibilidad que ofrece la *Guía Técnica* a la hora de afrontar estos estudios, permite el desarrollo de nuevas metodologías a fin de clasificar la presa en función del riesgo potencial.

En el presente documento se ha presentado una propuesta de metodología para afrontar estudios de rotura de presas situadas en cursos fluviales, cuyo estado de aterramiento del reservorio pueda condicionar el análisis hidráulico (hidrograma tras rotura). La metodología se basa en el Método Completo descrito en la *Guía Técnica*, y para el que son necesario tres procesos: la obtención del hidrograma tras rotura considerando el fondo del lecho móvil en el embalse (transporte de sedimentos), el estudio hidráulico mediante el hidrograma obtenido en el proceso anterior y la clasificación de la presa (evaluación de daños) según lo descrito en la *Guía Técnica*.

Esta nueva metodología se ha empleado para el estudio de clasificación de una pequeña presa ubicada en el río Llobregat. El estado actual de la presa, con un nivel de aterramiento superior al 75 %, planteó la necesidad de estudiar el

hidrograma tras rotura con el fondo fijo (metodología clásica) y con el fondo móvil (metodología propuesta). Los resultados obtenidos muestran un incremento puntual en la capacidad de almacenaje del embalse. Consecuentemente se produjo un hidrograma con un caudal punta y duración mayores que con la metodología clásica (fondo fijo). La clasificación de la presa, aun empleando la nueva metodología (fondo móvil), desembocó en la misma categoría que con la metodología clásica.

Esta nueva metodología ofrece un nuevo paradigma en el análisis de rotura de presas existentes cuyo nivel de aterramiento del embalse modifique considerablemente las características del mismo. Asimismo, nuevos retos se abren para los estudios de clasificación de presas con aterramiento, ya que se podría estimar el volumen de sedimentos movilizado, así como las zonas potenciales de erosión y sedimentación tras la rotura.

REFERENCIAS

- ACA, 2009. *Planificació de l'Espai Fluvial. Estudis d'inundabilitat en l'àmbit del projecte PEFCAT - Memòria específica Conca del Llobregat*. Agència Catalana de l'Aigua, Barcelona, España.
- Arbat-Bofill, M., Bladé, E., Sánchez-Juny, M., Niñerola, D., Dolz, J., 2014. Suspended sediment dynamics of Ribarroja Reservoir (Ebro River, Spain). *Reservoir Sedimentation*. CRC Press, pp. 99–107. doi:10.1201/b17397-14
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., Coll, A., 2014. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Rev. Int. Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ing.* 30, 1–10. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Bladé, E., Sánchez-Juny, M., Sánchez, H.P., Niñerola, D., Gómez-Valentín, M., 2009. *Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable una visión a partir del modelo HEC-RAS*. Edicions UPC.
- BOE-A-1995-3865, 1995. Resolución de 31 de enero de 1995, de la Secretaría de Estado de interior, por la que se dispone la publicación del Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundación.
- BOE-A-1996-7319, 1996. *Orden de 12 de marzo de 1996 por la que se aprueba el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses*.
- BOE-A-2008-755, 2008. *Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril*.
- BOE-A-2010-11184, 2010. *Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación*.
- Brunner, G.W., 2008. *HEC-RAS, River Analisys Sistem*. Hydraulic Reference Manual (Version 4.1).
- Caballero, F.J., Monteiro, R.M., Morán, R., Toledo, M.A., 2015. Estudios de rotura de presas y balsas. El avance en las herramientas y técnicas disponibles para modelación de propagación de las avenidas y la asignatura pendiente de la rotura del dique. *Proceedings de Las IV Jornadas de Ingeniería Del Agua*. Córdoba, 21 y 22 de Octubre de 2015.
- Corestein, G., Bladé, E., 2013. Validación del módulo de transporte de sedimentos de fondo - Modelo Iber. *III Jornadas de Ingeniería Del Agua : La Protección Contra Los Riesgos Hídricos*. Valencia, 23 y 24 de octubre de 2013, pp. 27–34.
- DOUE-L-2007-82010, 2007. *Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación*.
- Meyer-Peter, E., MüllerR., 1948. Formulas for Bed-Load transport. *IAHSR 2nd Meeting*, Stockholm, Appendix 2. IAHR.
- MMA, 1996. *Clasificación de presas en Función del Riesgo Potencial - Guía Técnica*. Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas.
- Palau, A., Batalla, R.J., Rosico, E., Meseguer, A., Vericat, D., 2004. Management of water level and design of flushing floods for environmental river maintenance downstream of the Riba-Roja reservoir (lower Ebro River. NE Spain). *Proceedings of HYDRO 2004. A New Era for Hydropower*, Porto, Portugal. 18–20 October 2004.
- Schleiss, A.J., Franca, M.J., Juez, C., De Cesare, G., 2016. Reservoir sedimentation. *J. Hydraul. Res.* 54, 595–614. doi:10.1080/00221686.2016.1225320
- Soares-Frazão, S., Canelas, R., Cao, Z., Cea, L., Chaudhry, H.M., Die Moran, A., El Kadi, K., Ferreira, R., Cadórñiga, I.F., Gonzalez-Ramirez, N., Greco, M., Huang, W., Imran, J., Le Coz, J., Marsooli, R., Paquier, A., Pender, G., Pontillo, M., Puertas, J., Spinewine, B., Swartenbroekx, C., Tsubaki, R., Villaret, C., Wu, W., Yue, Z., Zech, Y., 2012. Dam-break flows over mobile

beds: experiments and benchmark tests for numerical models. *J. Hydraul. Res.* 50, 364–375. doi:10.1080/00221686.2012.689682

Vericat D. y Batalla R. J., 2004. Efectos de las presas en la dinámica fluvial del curso bajo del río Ebro. *Cuaternario y Geomorfol.* 18, 37–50.

Wong, M., Parker, G., 2006. Reanalysis and Correction of Bed-Load Relation of Meyer-Peter and Müller Using Their Own Database. *J. Hydraul. Eng.* 132, 1159–1168. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:11(1159)