

# COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

## MODELOS DE RIESGO PARA LA AYUDA A LA TOMA DE DECISIONES EN GESTIÓN DE SEGURIDAD DE PRESAS

Armando Serrano Lombillo <sup>1</sup>

Ignacio Escuder Bueno <sup>2</sup>

Manuel G. de Membrillera Ortuño <sup>3</sup>

Luis Altarejos García <sup>4</sup>

*RESUMEN: El análisis de riesgo aplicado a la seguridad de presas y, más concretamente, la confección de modelos de riesgo, permite disponer de una herramienta útil de apoyo a la toma de decisiones para la gestión en dicho campo.*

---

<sup>1</sup> Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia.

<sup>2</sup> Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia.

<sup>3</sup> Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia, Ofiteco.

<sup>4</sup> Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia, CPS Ingenieros.

*Una de las principales ventajas consiste en la agregación de toda la importante información disponible (XYZT, Plan de Emergencia, Normas de Explotación, Informes Anuales, Revisiones de Seguridad, Informes de Comportamiento, etc.).*

*Cada uno de los mencionados documentos así como el conocimiento del sistema que implican se relacionan con una u otra de las partes constituyentes del riesgo (solicitaciones, respuesta del sistema y consecuencias). Al agregarlos todos ellos mediante un modelo de riesgo, es posible caracterizar el riesgo global del sistema, el riesgo incremental en cada una de las presas y, a la postre, la eficiencia de cada medida correctora que pueda plantearse.*

*El presente artículo muestra el procedimiento de confección de los modelos de riesgo, algunas de las herramientas disponibles y ejemplos de la utilidad de los mismos para informar la toma de decisiones.*

## **1. APORTACIONES DE LOS MODELOS DE RIESGO A LA GESTIÓN DE LA SEGURIDAD**

El Análisis de Riesgo es una herramienta útil para la toma de decisiones, ya que permite integrar toda la información referente a la seguridad de la presa que se analiza por separado en otros documentos. Por ejemplo, un cálculo hidrológico y de laminación puede mostrar que la presa no es capaz de laminar las avenidas que la normativa recomiende. Un cálculo de estabilidad que arroje un coeficiente de seguridad menor que el recomendado muestra que la presa puede tener un problema de seguridad en ese sentido. Durante las actividades de mantenimiento se puede detectar que una compuerta no funciona adecuadamente. El seguimiento de la auscultación de la presa puede detectar un aumento de las filtraciones, un desplazamiento de un bloque o un aumento de las presiones intersticiales y permitir actuar sobre él antes de que derive en un problema mayor. Al realizar o revisar un plan de emergencia se pueden identificar medidas que aumenten la seguridad de la población en caso de rotura de presa.

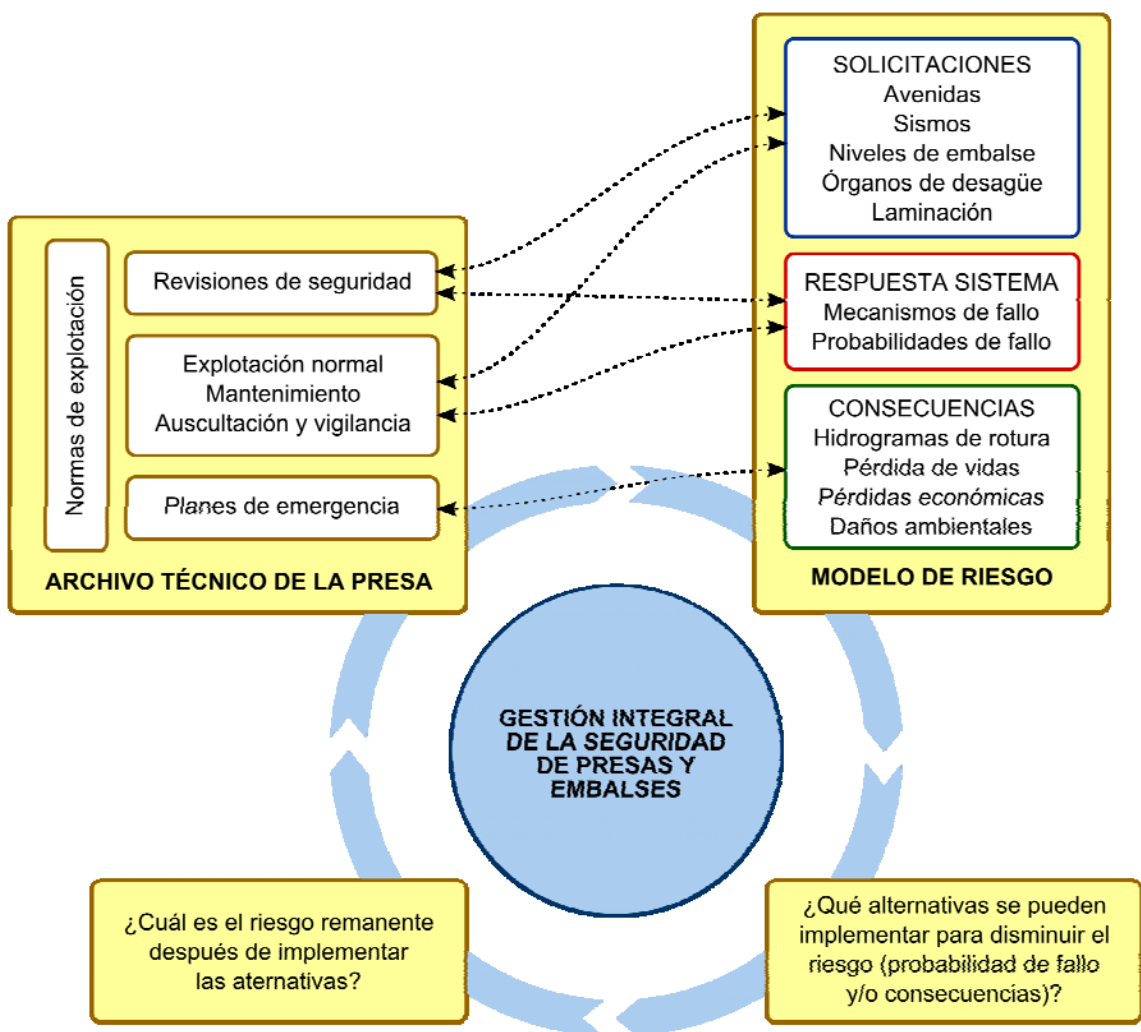
Actualmente, todos estos aspectos están cubiertos, sin embargo no se cuenta con una herramienta que permita integrarlos y medir la importancia que cada uno tiene sobre la seguridad de la presa. Es precisamente esta capacidad integradora una de las mayores ventajas del Análisis de Riesgo.

Al realizar un análisis de riesgo, se confecciona un modelo global de la presa que incluye desde las solicitaciones (hidrológicas, sísmicas o cualquier otra) hasta las consecuencias, pasando por la respuesta del sistema. Este modelo de riesgo de la presa se nutre de la información que proporcionan los distintos documentos de seguridad de la presa. En este sentido los documentos más importantes que se realizan en las presas de España son el Documento XYZT, el Plan de Emergencia, las Normas de Explotación, los Informes Anuales, las Revisiones de Seguridad y los Informes de Comportamiento, pero al realizar un Análisis de Riesgo se estudia todo el Archivo Técnico y también se realiza una visita de campo para complementar la información de dichos documentos.

Una vez confeccionado el modelo e introducida toda la información propia de la presa, es posible evaluar la importancia que cada uno de estas cuestiones tiene. Además, la comparación con criterios internacionales de tolerabili-

dad de riesgo permite contextualizar el estado actual de la presa. También es posible evaluar el impacto y la eficiencia de posibles medidas de reducción de riesgo e incluso es posible comparar de forma homogénea la eficiencia de medidas de reducción de riesgo en diferentes presas. Por último, se pueden realizar modelos conjuntos de sistemas de múltiples presas que permitan optimizar su gestión conjunta. Todos estos aspectos convierten a los modelos de riesgo en herramientas muy útiles de apoyo a la toma de decisiones para la gestión de la seguridad de presas.

La figura 1 resume el proceso de la gestión de la seguridad de presas y embalses informado mediante modelos de riesgo. El modelo de riesgo es la herramienta que permite integrar toda información concerniente a la seguridad de la presa y producir resultados útiles para la toma de decisiones.



**Figura 1. Gestión integral de la seguridad de presas y embalses y vínculos entre el modelo de riesgo y los documentos del Archivo Técnico.**

Como se puede ver, el modelo de riesgo está dividido en tres áreas: las solicitudes, la respuesta del sistema y las consecuencias. Cada una de estas

tres áreas del modelo de riesgo se corresponde con uno o varios de los documentos del archivo técnico. Las normas de explotación se han representado como un documento transversal que abarca todas las áreas. El documento XYZT es similar en este sentido, pero no se ha representado en el esquema por no ser un documento legal que se encuentre en todas las presas.

También se puede observar que la relación entre el Archivo Técnico y el modelo de riesgo es de doble sentido. La relación de izquierda a derecha representa que el modelo de riesgo precisa del Archivo Técnico como fuente de información. La relación de derecha a izquierda indica que en el proceso de confección de un modelo de riesgo se genera información que se puede reincorporar al Archivo Técnico. Por ejemplo, según la experiencia de los autores, realizando contemporáneamente la revisión de seguridad de una presa y la confección del modelo de riesgo, el documento de revisión de la seguridad se ve mejorado por las aportaciones de la confección del modelo de riesgo. Pero también, por ejemplo, el poder evaluar diferentes estrategias de gestión de avenidas, puede dar lugar a mejorar las Normas de Explotación o los Planes de Emergencia.

## 2. VINCULACIÓN DE LOS DOCUMENTOS DE SEGURIDAD DE LA PRESA CON LOS MODELO DE RIESGO

El presente apartado trata la vinculación entre el modelo de riesgo y los diferentes documentos del Archivo Técnico. La figura 2 muestra un modelo de riesgo en escenario hidrológico<sup>5</sup>. Cada nodo del diagrama representa una variable, por ejemplo nivel máximo alcanzado en el embalse tras una avenida o daños económicos producidos por una determinada inundación. El escenario hidrológico parte de la entrada de una avenida al embalse. En función del nivel previo existente en el momento en que se presente dicha avenida, de la operatividad de los órganos de desagüe (es posible que en el momento de ir a laminar una avenida, haya alguna compuerta que no funcione, ya sea por fallo mecánico, fallo eléctrico o cualquier otro motivo) y de las estrategias de laminación, se llegará a un determinado nivel máximo en el embalse y se realizarán unos determinados vertidos al cauce aguas abajo. En función de estas cargas, en el modelo de riesgo se estiman las probabilidades de fallo según los distintos modos de fallo que se hayan identificado en la presa<sup>6</sup>. Cada modo de fallo podrá en el caso general provocar una inundación diferente. Con esto es posible calcular las consecuencias incrementales<sup>7</sup>. El riesgo incremental de la

---

<sup>5</sup> Para la obtención del riesgo de una presa, es habitual desagregar el cálculo en varios escenarios, según el evento de solicitación que inicia el fallo. Una presa puede fallar por ejemplo cuando se enfrenta a una avenida extrema o cuando se enfrenta a un sismo de gran magnitud y es conveniente realizar dichos cálculos por separado en lo que se conoce como escenarios de solicitación. Los escenarios de solicitación más habituales son [ANCOLD]: escenario normal, escenario hidrológico (avenidas), escenario sísmico y otros escenarios.

<sup>6</sup> Un modo de fallo es la secuencia particular de eventos que puede dar lugar a un funcionamiento inadecuado del sistema presa – embalse o una parte del mismo. Esta serie de sucesos estará asociada a un determinado escenario de solicitación y tendrá una secuencia lógica, la cual constará de un evento inicial desencadenante, una serie de eventos de desarrollo o propagación y culminará con el fallo de la presa. Al realizar un análisis de riesgo, se identifican los modos de fallo de cada presa en una sesión de grupo.

<sup>7</sup> Cuando se realiza el análisis de riesgo de una presa, normalmente no se desea calcular el riesgo global existente, sino que se desea calcular el riesgo incremental imputable a la rotura de la presa. En general esto se consigue trabajando con consecuencias incrementales. A efectos del cálculo de consecuencias esto significa que es necesario calcular las consecuencias en caso de rotura y en caso de no rotura, para después, mediante una resta, obtener las consecuencias incrementales.

presa será el producto de las probabilidades de fallo por sus consecuencias incrementales.

La figura 2 también contiene un comentario para cada uno de los nodos del modelo, indicando los datos con los que se ha de alimentar el modelo en ese punto y los estudios que se deben realizar. La figura 3 muestra un resumen de dichos estudios.

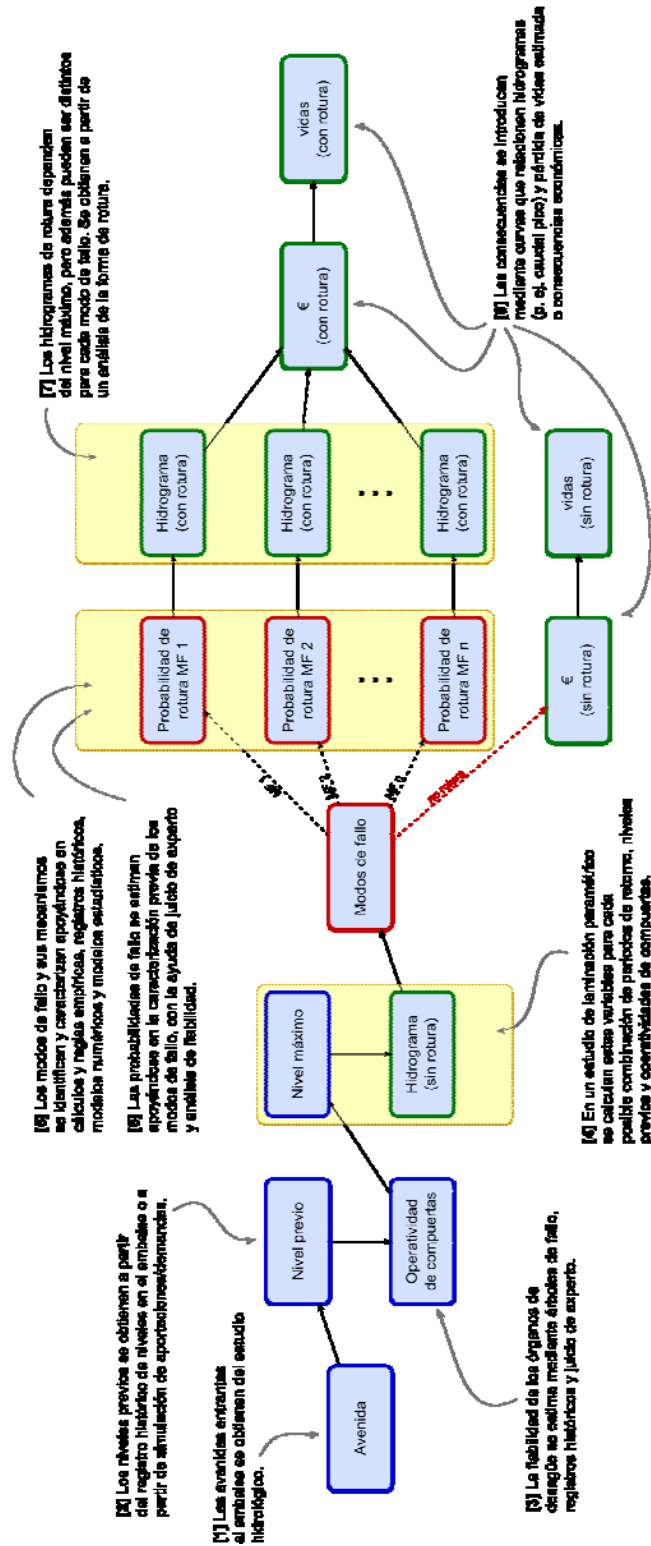
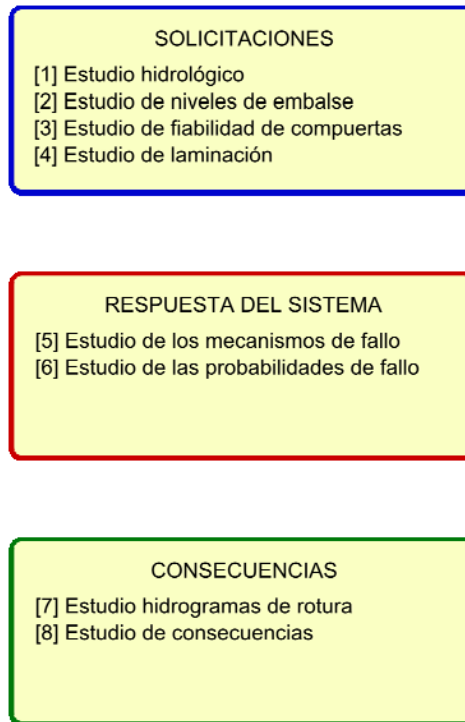


Figura 2. Esquema de un modelo de riesgo genérico (escenario hidrológico) con indicaciones de los estudios que es necesario realizar para caracterizar cada variable del modelo.



**Figura 3. Resumen de los distintos estudios a realizar en la confección de un modelo de riesgo.**

A continuación se comentan los diferentes estudios necesarios para confeccionar un modelo de riesgo y su vinculación con los documentos que se pueden encontrar en el Archivo Técnico de una presa:

1. El primer estudio a realizar es el estudio hidrológico o estudio de avenidas. Este debe ser un estudio probabilístico, obteniendo la probabilidad anual de excedencia de las avenidas. La información más reciente en este sentido puede encontrarse en los informes de revisión de seguridad o en las normas de explotación. Si este estudio se ha extendido a periodos de retorno suficientemente altos y se han obtenido también suficientes avenidas de periodos de retorno intermedios, puede ser suficiente. En el caso de que se estudie el escenario sísmico, el estudio análogo a éste será el estudio sísmico.
2. El objetivo del estudio de niveles previos es determinar una curva de probabilidad de excedencia de niveles en el embalse. Esta curva se puede obtener en muchos casos ajustando una curva empírica al registro de niveles históricos. Para ello es necesario contar con un registro suficientemente largo y representativo de la situación de explotación actual. Cuando esto no sea posible o cuando se desee evaluar alguna posible situación futura (por ejemplo, una restricción de niveles de explotación) se puede recurrir a la simulación.
3. El estudio de la fiabilidad de los órganos de desagüe consiste en estimar la probabilidad de que cada uno de los órganos de desagüe que puedan intervenir en la laminación de una avenida, puedan ser utilizados cuando se requieran. Este estudio no es habitual realizarlo

fuera de los análisis de riesgo y por lo tanto suele ser necesario llevarlo a cabo específicamente para confeccionar el modelo de riesgo. Sin embargo, todos los registros de operaciones realizadas con los órganos de desagüe (si se registran tanto las maniobras con éxito como los fallos o las incidencias) así como los planos y características de los órganos de desagüe y la red de alimentación eléctrica sí pueden formar parte del Archivo Técnico y son el punto de partida de este estudio. También son relevantes algunos de los protocolos de actuación de las Normas de Explotación. Para la realización de este estudio es habitual el uso de árboles de fallo [5].

4. Las Normas de Explotación y los Planes de Emergencia deben contar con un estudio de laminación. Este estudio se suele restringir a unos pocos casos concretos y determinados por la normativa (Avenida de Proyecto, Avenida Extrema...). Para la confección del modelo de riesgo es necesario ampliar este estudio para que cubra todos los posibles casos de avenidas entrantes (desde el periodo de retorno más bajo considerado hasta el más alto y con varias avenidas intermedias), niveles previos y operatividades de compuertas. Por lo tanto, son en principio reutilizables los estudios existentes pero es necesario ampliarlos para cubrir todos los casos que el modelo de riesgo requiere.
5. La identificación de modos de fallo y el estudio de los mecanismos de fallo es una aportación del proceso de Análisis de Riesgo que no suele realizarse si se sigue un enfoque de la seguridad estrictamente tradicional. Se parte de toda la información existente (proyectos de construcción y reparación, documento XYZT y sobre todo informes de revisión de seguridad) y de visitas de campo específicas y se identifica todas las posibles maneras en que la presa puede fallar, desagregando todos los pasos necesarios para pasar del inicio del modo de fallo al fallo de la presa. Este es un trabajo que se realiza en grupo y en el que pueden participar tanto el personal que explota la presa y posee un buen conocimiento de ella como expertos externos en áreas que afecten a la seguridad de la presa.
6. Una vez identificados y descompuestos los modos de fallos, se deben estimar las probabilidades de cada uno de sus pasos. De nuevo, este es un estudio propio del Análisis de Riesgo, que es necesario realizar, pero que parte de la información existente en el Archivo Técnico. Para la estimación de probabilidades de fallo las herramientas con las que se cuenta son principalmente los árboles de eventos, las técnicas de fiabilidad (simulaciones Monte Carlo) [1] y la asignación de probabilidades mediante juicio de experto [4]. En la estimación de probabilidades de fallo, la existencia de auscultación puede jugar un papel muy importante ya que puede permitir detectar un modo de fallo que se está desarrollando a tiempo para intervenir y subsanarlo.
7. Para poder evaluar las consecuencias en caso de rotura, es necesario estudiar los hidrogramas de rotura. En este punto, son especialmente útiles los Planes de Emergencia, ya que suelen contener dichos hidrogramas de rotura. En ocasiones, los hidrogramas de rotura de los Planes de Emergencia pueden ser suficientes, pero en otras pue-



de ser necesario recalcular algunos hidrogramas de rotura, por ejemplo para modos de fallo que sean sustancialmente distintos a los contemplados en los Planes de Emergencia o porque se quiera estudiar con detalle los hidrogramas de rotura para cotas de embalse distintas de las contempladas en los Planes de Emergencia.

8. En último lugar se encuentra el estudio de consecuencias (económicas y de pérdida de vidas humanas<sup>8</sup>). A grandes rasgos, el estudio de consecuencias consta de dos partes: estudio de inundación y estimación de consecuencias propiamente dicha. Para el estudio de inundación, en algunas ocasiones es posible aprovechar el realizado en los Planes de Emergencia. Sin embargo, éste se realiza normalmente para muy pocos casos, con lo que para evitar interpolaciones demasiado groseras, es conveniente muchas veces ampliar dicho estudio. En caso de contar con el modelo que se haya utilizado para los estudios de inundación de los Planes de Emergencia, esta ampliación puede que se reduzca a correr el modelo ya existente para hidrogramas de inundación más grandes o más pequeños. En cuanto a la estimación de consecuencias, el trabajo de identificación de afecciones que se realiza en los Planes de Emergencia es muy útil, sin embargo, en ellos no suele realizarse una valoración cuantitativa de los daños y es necesario ampliar dicho estudio en este aspecto. Finalmente, también es necesario estimar otros costes como los costes indirectos o el coste de reconstrucción de la presa.

Se han comentado los estudios e informaciones del Archivo Técnico que se aprovechan para la confección de los modelos de riesgo, pero la relación es de doble sentido. Por ejemplo, la identificación de modos de fallo puede ser muy útil para enfocar o complementar algunos de los análisis que se realizan en una revisión de seguridad. La interpretación de los registros de auscultación también puede verse mejorada por el entendimiento del sistema que proporciona una identificación de modos de fallo. Si es preciso ampliar cualquier estudio de los existentes en el Archivo Técnico (estudio hidrológico, estudio de inundaciones, estudio de consecuencias...) para la realización del modelo de riesgo, estos nuevos resultados pueden por supuesto retroalimentar los distintos documentos del Archivo Técnico. Finalmente, tras analizar los resultados que arroje el modelo de riesgo y en el ámbito de la gestión integral de la seguridad de presas y embalses, es posible que se implementen algunas medidas de reducción de riesgo que afecten por ejemplo a las Normas de Explotación o a los Planes de Emergencia.

### 3. CASOS DE APLICACIÓN

A continuación se comentan brevemente 3 ejemplos de cómo los modelos de riesgo pueden ofrecer resultados útiles para la toma de decisiones que son difíciles de obtener a partir de los distintos documentos del Archivo Técnico por separado. Además, la facilidad con la que se pueden explorar distintas alternativas gracias a la existencia de herramientas informáticas específicas para el cálculo de riesgo [6] hace posible el tipo de cálculos que se mencionan a continuación.

---

<sup>8</sup> En un análisis de riesgo también es conveniente estudiar las consecuencias ambientales, aunque por su difícil cuantificación, no es práctica común incluirlas en el modelo numérico de riesgo.

## EVALUACIÓN DE LA IMPORTANCIA DE LA FIABILIDAD DE LOS ÓRGANOS DE DESAGÜE

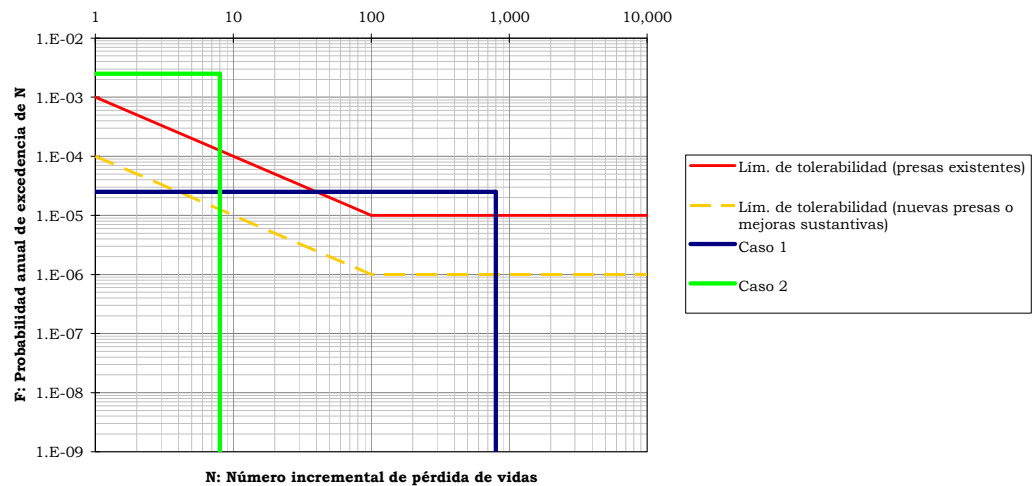
Una vez montado el modelo de riesgo, un cálculo de sensibilidad de la fiabilidad de los órganos de desagüe puede dar una idea bastante precisa sobre su importancia para la seguridad de cada presa en concreto. Por ejemplo, antes incluso de estimar la fiabilidad real de los órganos de desagüe se pueden realizar dos cálculos sobre el modelo de riesgo, asignando fiabilidades del 100% y del 50% y analizando su repercusión sobre la probabilidad anual de rotura y los distintos riesgos. Mediante este sencillo cálculo se puede conocer la importancia que los órganos de desagüe y su fiabilidad tienen sobre la seguridad de una presa concreta. Esta importancia depende principalmente de dos factores:

- La importancia relativa de la capacidad de desagüe frente a la capacidad de absorción del embalse. Esto a su vez depende no sólo de cómo se gestionen las avenidas sino también de lo lleno que suela estar el embalse cuando se presenten las avenidas. Todo esto queda capturado en la matemática del modelo de riesgo.
- La respuesta del sistema. Por ejemplo una presa que tenga probabilidades de rotura a partir de cotas relativamente bajas, aumentando gradualmente con la cota de embalse es menos sensible a la fiabilidad de los órganos que otra con modos de fallo que se activan con el sobrevertido, es decir con probabilidades de rotura nulas por debajo de coronación y altas por encima de coronación.

En casos en que se observe sensibilidad a la fiabilidad de los órganos de desagüe, las actividades de mantenimiento, el buen estado de las válvulas, compuertas y sus equipos, el buen estado de las líneas de suministro eléctrico y de los equipos de suministro de emergencia así como unos buenos procedimientos de actuación que sean bien conocidos por todo el personal involucrado serán de especial importancia

## EFFECTIVIDAD DE MEDIDAS ESTRUCTURALES Y NO ESTRUCTURALES

Una de las herramientas con las que se cuenta para la representación e interpretación del riesgo es la curva F-N. Esta gráfica representa la probabilidad anual (aumulada) de que se den N o más víctimas (incrementales). La forma de la curva de riesgo F-N también es importante de cara a entender qué tipo de medidas pueden ser más efectivas. Por ejemplo, la figura 4 muestra dos perfiles de riesgo para dos presas hipotéticas. Ambas tienen el mismo riesgo anual promedio (área bajo la curva, teniendo en cuenta que el gráfico es doble logarítmico), pero muestran perfiles de la curva F-N muy distintos. En el caso A, se tiene una probabilidad de rotura alta con consecuencias bajas, sugiriendo que es necesario tomar medidas que reduzcan la probabilidad de rotura. El caso B tiene probabilidad de rotura y consecuencias medias. En este caso para llevar la presa adentro de los criterios de tolerabilidad, podrían ser efectivas tanto medidas que reduzcan la pérdida de vidas en caso de rotura como medidas que reduzcan la probabilidad de rotura. En casos así, es habitual que las medidas no estructurales que afecten a la pérdida potencial de vidas (implantación o mejora del Plan de Emergencia) sean muy eficientes por ser comparativamente más baratas que las estructurales (recrecimientos, refuerzos...).



**Figura 4. Curvas F-N de dos casos hipotéticos y criterios de tolerabilidad [3].**

## TRANSFERENCIA DE RIESGO EN SISTEMAS DE PRESAS

Al confeccionar modelos de riesgo, también es posible capturar sistemas de varias presas y sus interacciones. La evaluación conjunta de las presas de un mismo sistema permite detectar casos en que el riesgo no esté equitativamente repartido entre las diferentes presas del sistema. El poder evaluar el impacto en probabilidades de rotura y en riesgo que tienen por ejemplo diferentes estrategias de explotación, abre la puerta a la exploración de Normas de Explotación que minimicen el riesgo del sistema. En el anterior congreso del CNEGP, los autores presentaron un caso de aplicación real a un sistema de presas en la Confederación Hidrográfica del Duero [2].

## REFERENCIAS

- [1] L. Altarejos, I. Escuder, M. G. de Membrillera y A. Serrano. Risk analysis and probability of failure of a gravity dam. In *Twenty-third International Congress on Large Dams*, May 2009.
- [2] L. Ardiles, E. Jenaro, P. Moreno, I. Escuder, M. G. de Membrillera, Ó. Pérez y A. Serrano. Modelo de riesgo de las presas de Camporredondo y Compuerto (río Carrión). In *VIII Jornadas Españolas de Presas*, November 2008.
- [3] Australian National Committee on Large Dams Incorporated. *Guidelines on Risk Assessment*, October 2003.
- [4] B. M. Ayyub. *Elicitation of expert opinions for uncertainty and risks*. CRC Press, 2001.
- [5] M. G. de Membrillera, I. Escuder, A. Serrano y L. Altarejos. El papel de la fiabilidad de las compuertas de aliviadero en la seguridad hidrológica del sistema presa-embalse. In *VIII Jornadas Españolas de Presas*, November 2008.
- [6] A. Serrano, I. Escuder, M. G. de Membrillera and L. Altarejos. iPresas: Software for risk analysis. *23 International Congress on Large Dams*, 2009.