

**Q-76**

# LA UTILIZACIÓN DEL ANÁLISIS DE RIESGOS EN LOS PROCESOS DE DECISIÓN RELATIVOS A LA SEGURIDAD DE LAS PRESAS Y A SU GESTIÓN

Jesús Cajete Baltar

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

*Vocal Titular del Comité Nacional Español de Grandes Presas*

## RESUMEN

Se recoge en el presente artículo el Informe del Ponente General de la Cuestión 76: "La utilización del análisis de riesgos en los procesos de decisión relativos a la seguridad de las presas y a su gestión" que, por su extensión, se limita a su parte conceptual, la más importante, omitiendo deliberadamente los comentarios a cada una de las colaboraciones presentadas en el Congreso de Grandes Presas de Beijing (China) en septiembre de 2000.

## ABSTRACT

The present article examines the General Report on Q-76: "The use of risk analysis to support dam safety decisions and management", taken from the Congress on Large Dams held in Beijing in September 2000, and which due to the sheer scale of the response is purely limited to the conceptual elements contained in the same.

## 1. TEMARIO DE LA CUESTIÓN

Como figura en el encabezamiento, la Cuestión 76 se refiere a la "Utilización del análisis de riesgos en los procesos de decisión relativos a la seguridad de las presas y a su gestión", habiéndose propuesto para su desarrollo los cuatro apartados siguientes :

- ▼ a) Conceptos de peligro y riesgo. Utilización de métodos probabilistas en la evaluación de riesgos y función de las bases de datos en la reducción de incertidumbres.
- ▼ b) Aplicación del análisis de riesgos en el diseño de obras nuevas y en la rehabilitación de presas en servicio.
- ▼ c) Gestión del riesgo utilizando planes de emergencia y otras medidas durante la explotación.
- ▼ d) Aceptación pública de los criterios de riesgo afectando a vidas humanas y su entorno.

Antes de describir abreviadamente el informe del Ponente General, el suizo Harald Kreuzer, señalamos que a esta cuestión se presentaron 48 informes procedentes de 22 países, 4 de los cuales tienen autores españoles. En las páginas siguientes se relacionan los títulos y autores de todas las comunicaciones que han servido de base para el trabajo que nos ocupa, como una guía para su posible consulta en las publicaciones del Congreso. Por el contrario, dada la extensión del tema y el gran número de colaboraciones se omiten deliberadamente los comentarios particulares de cada una de ellas.

## 2. INFORME DEL RELATOR GENERAL

El autor resalta que es la primera vez que un Congreso de ICOLD trata el riesgo como tema único de una cuestión. Y aunque anteriormente se hayan abordado ciertos aspectos de

esta noción es relativamente reciente la utilización del análisis de riesgo como un útil completamente desarrollado y reconocido para su aplicación al dominio de las presas.

Ciertos métodos científicos, tales como los análisis de fiabilidad y la teoría de la decisión encuentran ahora su aplicación en las presas, habiéndose celebrado recientemente diversas conferencias consagradas a este tema, una de las cuales tuvo lugar en Barcelona en el año 1998.

El ICOLD, por su parte, está preparando un Boletín titulado "Evaluación del riesgo como ayuda a la gestión de la seguridad de las presas".

Entre las razones que motivan este interés creciente están :

- ▼ El envejecimiento progresivo de las presas.
- ▼ La opinión cada día más frecuente de que el análisis del riesgo permite evaluar los márgenes de seguridad de forma más realista que los criterios tradicionales (deterministas).
- ▼ El deseo público de que los riesgos catastróficos sean cuantificados.
- ▼ La apreciación de la seguridad frente a la problemática de los cambios climáticos.
- ▼ La posibilidad de obtener ventajas económicas.

La justificación del recurso al análisis de riesgo (abreviadamente AR) proviene de la existencia de condiciones e incertidumbres y pretende estimar la probabilidad de un resultado (económico o en términos de seguridad) como una función de las mismas y, lo que puede ser más importante, evaluar el cambio de este resultado cuando dichas incertidumbres se reducen, lo que permite la comparación entre diferentes opciones en términos de fiabilidad. Los valores absolutos obtenidos, muchas veces criticados, tienen una significación menor.

La gestión del riesgo implica un cambio fundamental, partiendo de un razonamiento unidimensional basado en un conocimiento cierto hacia un razonamiento en varias dimensiones que tiene en cuenta convicciones e incertidumbres como elementos centrales de la gestión. No obstante, la aceptación de incertidumbres añade una dimensión suplementaria de diagnóstico que va más allá de lo que pertenece típicamente a las ciencias del ingeniero. La aceptación del análisis de riesgo, que está todavía en el comienzo de su desarrollo, es más difícil por este motivo.

### **3. ESTADÍSTICA DE ARTÍCULOS PRESENTADOS**

La mayor parte de las ponencias se refiere a la evaluación de la seguridad de las presas existentes más que a los riesgos de diseño y construcción. Los aspectos institucionales, la clasificación de los riesgos y la organización de los planes de emergencia son escasamente abordados, en contraste con el buen número de ejemplos de las aplicaciones a presas en servicio. El error humano y el tema de los seguros tampoco son tratados con la profusión deseable.

## **4. ESTADO DE LA APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE RIESGO**

### **4.1. ASPECTOS GENERALES**

El AR es relativamente reciente en el dominio de las presas, en contraste con su aplicación, ya antigua, a la aviación y a la industria nuclear. Varias razones justifican esta situación:

- ▼ En primer lugar estamos ante un número relativamente escaso de presas y el carácter particular de cada una de ellas. Estas obras, un buen número de las cuales están desatendidas en cuanto a la observación de su comportamiento, presentan características individuales, están fundadas sobre terrenos poco conocidos y expuestas a grandes incertidumbres de una multitud de cargas variables provenientes de su entorno natural. Si se comparan con la aviación o la industria nuclear se constata que el número de componentes estructurales es muy reducido y que no todos sus elementos están contruidos por el hombre.
- ▼ Otra razón reside en la complejidad del proceso probabilista, que exige más datos que el análisis tradicional, determinista, de la seguridad.
- ▼ Una tercera razón es la connotación negativa del término "riesgo" y la reticencia que induce en la opinión pública.
- ▼ Por otra parte, los conceptos deterministas de proyecto se han revelado eficaces y los pocos fallos habidos han podido ser atribuidos a errores humanos, sin poner en tela de juicio la concepción de la obra.

Estos argumentos no deben ocultar las ventajas del análisis de riesgo con relación a las aproximaciones deterministas clásicas. La fuerza del AR se encuentra en el acoplamiento de la definición de un suceso con su cuantificación; tiene en cuenta los factores físicos y humanos así como su contribución a la probabilidad de que un evento se produzca. Es un proceso lógico e inductivo. A pesar de las incertidumbres, que muchas veces son elevadas, el AR es un útil refinado a disposición del ingeniero para la evaluación de sucesos poco probables y de sus consecuencias. Cuando es aplicado con buen criterio constituye un progreso importante para la comprensión de lo desconocido.

### **4.2. PRÁCTICAS BASADAS SOBRE EL RIESGO EN DIFERENTES PAISES**

La conferencia sobre la evaluación de la seguridad de las presas basada en el riesgo que tuvo lugar en Trondheim en 1998 puso en evidencia la gran diversidad de aplicaciones y de manera de percibir la puesta en práctica del AR, lo que puede ser atribuido a las disposiciones institucionales, culturales, sociales e históricas propias de cada país.

**COMUNICACIONES PRESENTADAS**

- R. 1. XIAO, H., CHEN, X., CHEN, J., SHI, Q., SUN, Z., LI, Z. (China). *Risk analysis of construction diversion for hydro projet*
- R. 2. OPYRCHAL, L., HRABOWSKI, W., JANKOWSKI, W. (Polonia). *The hazard index of the Polish hydro-technical structures*
- R. 3. OPYRCHAL, L. (Polonia). *The risk of dam stability loss*
- R. 4. GUZINA, B. (Yugoslavia). *Hydraulic loading of fissured porous rock*
- R. 5. De MELLO, V.F.B. (Brasil). *Some illusions, pitfalls and inconsequential initiatives in risk assessment quantifications*
- R. 6. PETKOV, Z.B., KISLIAKOV, D.S. (Bulgaria). *Seismic risk assessment of concrete gravity dams using energy approach*
- R. 7. MAHDAVIAN, A. (Iran). *Design response spectra for large dams in Iran*
- R. 8. PENMAN, A.D.M., CHARLES, J.A., McLEOD, H.N. (Reino Unido). *Risk assessment and the safety of tailings dams and waste impoundments*
- R. 9. ROWLAND, A., TARRANT, F. R. (Reino Unido). *Prediction of the extent of destruction downstream following the breach of a major dam*
- R.10. SANDILANDS, N. M., FINDLAY, J. W. (Reino Unido). *Development of a risk based approach to dam safety management*
- R.11. De ALMEIDA, A.B., FRANCO, A.B., RAMOS C.M., SANTOS, M.A., VISEU, T. SILVA, D. (Portugal). *Dam-valley risk management. Firs results of a case study in Portugal-Arade valley*
- R.12. STEMATIU, D., HULEA, D. (Rumanía). *Selection strategies for monitoring improvement of existing dams*
- R.13. DARBRE, G.R. (Suiza). *Probabilistic safety assessment of dams*
- R.14. MOUVET, L.C., DARBRE, G.R. (Suiza). *Probabilistic treatment of uncertainties: malfunctioning of discharge works and sliding of concrete dam under earthquake*
- R.15. FELL, R., BOWLES, D. S. ANDERSON, L. R. BELL, G. (Australia). *The status of methods for estimacion of the probability of failure of dams for use in quantitative risk assessment*
- R. 16. FOSTER, M., FELL, R. (Australia). *Use of event trees to estimate the probatibility of failure of embankment dams by internal erosion and piping*
- R. 17. HOWLEY, I., McGRATH, S., STEWART, D. (Australia). *A business risk approach to prioritising dam safety upgrading decisions*
- R. 18. McDONALD, L., COOPER, B., WAN, C-F (Australia) . *Some lessons from use of risk assessment to aid am safety evaluation*
- R. 19. POLGLASE, L. (Australia). *Meadowbank dam early evacuation plan - Interim non-structural solution to low spillway capacity*
- R. 20. WATSON, D. PERERA, S. (Australia). *Risk assessment issues for dam safety management*
- R. 21. VICK, S.G. (Estados Unidos). *Engineering application of dam safety risk analysis*
- R. 22. DISE, K. M., VICK, S.G. (Estados Unidos). *Dam safety risk analysis for Navajo dam*
- R. 23. CYGANIEWICZ, J.M., SMART, J.D. (Estados Unidos). *U. S. Bureau of Reclamation's use of risk analysis and risk assessment in dam safety decision making*
- R. 24. Del HOYO, R. (España). *The assumable risk*
- R. 25. DE CEA AZAÑEDO, J.C. (España). *The Spanish experience in drafting emergency plans for the risk management of dams*
- R. 26. ANDRÉS, M. de (España). *Design flood definition and reservoir characteristics. Seasonal flood storage influence*
- R. 27. PENAS, J. (España). *Risk assessment in Spanish dam safety legislation*
- R. 28. BEKKOUCHE, A., BENGUEDDACH, B. (Argelia). *Introduction à l'analyse décisionelle appliquée á la sécurité des grand barrages*
- R. 29. FU, X., SHEN, T., CHEN, J., HUANG, W. (China). *Failure probability of gravity dam on rock foundation*
- R. 30. GUILLAUD, C., MAILHOT, J. DESJARDINS, M. (Canadá). *Analyse de risque des ouvrages du complexe de la Rivière Shipshaw*
- R. 31. GAUDETTE, M. (Canadá). *Hydro-Québec integrated approach to ensure the adequacy of the capacity of the existing discharge facilities*
- R. 32. QUACH, T. T., GAGNON, J. ROBERT, B., MARCHE, C. (Canadá). *Upper Ottawa river : a four-step risk assessment*
- R. 33. PEYRAS, L., BONELLI, S., ROYET, P. (Francia). *Formulation des actions de l'eau dans une méthode semi-probabiliste aux états-limites pour la justification des barrages-poids*
- R. 34. De LALEU, V., REVERCHON, B., CAULT, J.-B., LEFRANC, M. (France). *La politique de maintenance des ouvrages et matériels de production hydroélectrique d'Électricité de France. Une expérience d'analyse de risque simplifiée, appliquée à l'optimisation de la maintenance d'un grand canal*
- R. 35. FRY, J.-J., PEYRAS, L., CATHALA, F., MÉRIAUX, P., RIESTERER, J.-M. (Francia). *Exemples de l'intérêt de bases de données relatives au vieillissement des ouvrages hydrauliques*
- R. 36. BISTER, D., LE DELLIOU, P. (France). *Analyse de risque et crue de danger*
- R. 37. ROYET, P., CHAUVET, R. (France). *Établissement du plan particulier d'intervention (PPI) du barrage de Bimont et information de la population/Preparation of a specific emergency plan (SEP) for Bimont dam and information to the public*
- R. 38. AMDAL, T., RIISE, D. (Noruega). *Possibility of failure for Veneno dam, Norway - An analysis with focus on the reliability of the flood diversion works*
- R. 39. FUNNEMARK, E., ODGAARD, E., EKKJE, S.A. (Noruega). *Risk analysis of the Valdalen dam*
- R. 40. BARTSCH, M., GUSTAFSSON, A., (Suecia). *Risk analysis of the Steitevare rockfill dam*
- R. 41. RETTEMEIER, K., FALKENHAGEN, B., KÖNGETER, J. (Alemania). *Risk assessment - New trends in Germany*
- R. 42. MGALOBEOV, Y.B., NOVOZHENIN, V.D. BELLENDIR, E.N. IVASHINTSEV, D.A.KLIMOVITCH V.I., KUZNETSOV, V.S. PROKOFJEV, V.A. STEFANISHIN, D.V. VEKSLER, A.B., LASCHENOV, S.I. (Rusia). *Reliability assessment of hydraulic structures in their designing and operation in Russia*
- R. 43. SIEBER, H.U. (Alemania). *Hazard and risk assessment considerations in German standards for dams - Present situation and suggestions*
- R. 44. KOPUSTINSKAS, V., THEDÉEN, T., YANG, J. (Suecia). *Safety study of the Kaunas dam in Lithuania*
- R. 45. ANDRIOLO, F.R., MAIONCHI, A., RICARDINO, R. (Brasil). *Uncertainty evaluation - Risk management : accidents, incidents, failures, respon sabilities, and cost*
- R. 46. MEDEIROS, C.H. de A.C. (Brasil). *Probabilistic risk assessment technique as an approach to study hydraulic fracturing mechanism in embankment dams*
- R. 47. KRAUCH H. W., VIANNA de ANDRADE, R. PIASENTIN, C., SARKARIA, G. S. (Brasil). *Effective risk analyses and management during desing and construction of Itaipu hydroelectric projet*
- R. 48. TSCHERNUTTER, P., AIGNER, E., SCHARLER, (Austria). *Risk analyses performed for the foundation of the fill dams at Birecik dam and hydropowerplant*

Las condiciones para la aceptación del AR son, según Vick (1997):

- ▼ La voluntad social y política de admitir un riesgo residual.
- ▼ La información transparente del público sobre el riesgo y sobre los elementos técnicos relacionados con él.
- ▼ La iniciativa de algunas personas en la aplicación de esta técnica a la evaluación de la seguridad de las presas en algunos países (Canadá, R.S.A., Rumanía).
- ▼ La actitud de consultores a propósito de la recomendación de su aplicación.
- ▼ El tipo de presas prevalente en cada país. Los modos de fallo de una presa de hormigón se adaptan mejor a un análisis cuantitativo que los de presas de materiales sueltos. Las causas ocultas, como la erosión interna, raramente permiten reconstruir el fenómeno y, en consecuencia, su probabilidad de ocurrencia estará basada más sobre un juicio y opinión que sobre el análisis.

Otros países, reticentes a usar el AR, exponen sus métodos para evaluar la seguridad de las presas, como ocurre con Suiza. Su situación particular muestra un nivel de seguridad elevado por lo que la probabilidad de fallo calculada por aplicación del AR sería débil y el beneficio de esta práctica discutible. También se argumenta la existencia de una vigilancia meticulosa, la profesionalidad de sus ingenieros, y un sistema de prealerta como medio para reducir el riesgo.

En otras naciones como Francia, el Reino Unido, Rumanía y en ciertos organismos de los Estados Unidos, se preparan actualmente recomendaciones en función del riesgo. Pero los países más avanzados son Canadá y Australia; en particular BC-Hydro realiza un gran esfuerzo en este sentido (Hartford, Salmon y otros).

En la República Sudafricana una evaluación abreviada del riesgo ya se ha realizado sobre 320, de las 770 presas existentes.

#### 4.3. DOMINIOS DE APLICACIÓN

Aunque la incertidumbre es un factor clave para la conceptualización de la seguridad y para la evaluación de las decisiones financieras, el AR es una aproximación razonable. Se exponen seis dominios de aplicación del estudio con los siguientes títulos :

- ▼ 1) evaluación de la seguridad
- ▼ 2) toma de decisiones
- ▼ 3) recomendaciones y legislación
- ▼ 4) clasificación de los niveles de riesgo
- ▼ 5) planes de alerta y emergencia
- ▼ 6) criterios de aceptación del riesgo

#### 4.3.1. Evaluación de la seguridad

##### Aproximaciones deterministas y probabilistas

Se suscita la relación con las aproximaciones deterministas utilizadas hasta ahora concluyendo que ambos métodos son complementarios. El AR tiene el mérito de reconocer la subjetividad inherente al proceso de toma de decisiones. Los coeficientes de seguridad no aportan ninguna protección contra el carácter subjetivo de la toma de decisiones ni contra el error humano, en tanto que el AR complementa a las normas y permite una mejor aproximación a la realidad.

Por el contrario, un argumento a favor del mantenimiento de los coeficientes de seguridad es que aportan un nivel de confianza aceptado durante muchos años.

El Bureau of Reclamation así como el US Corps of Engineers continúan usando los coeficientes de seguridad para el cálculo de la estabilidad estructural en sus nuevos programas basados en la noción de riesgo. Sin embargo, la incertidumbre inherente a los propios coeficientes es un anacronismo, y un "coeficiente de seguridad flotante" (Kreuzer 1996) podría constituir una solución de compromiso. Según este concepto el coeficiente de seguridad variaría con la fiabilidad de los datos disponibles.

Se puede concluir que la utilización conjunta de los puntos fuertes de las normas de seguridad y del AR constituye un objetivo razonable.

Sobre la cuestión de la seguridad de las presas el AR se separa fundamentalmente de las aproximaciones deterministas por las razones siguientes :

- ▼ El análisis determinista es un proceso deductivo a partir de un modelo analítico mientras que la evaluación de riesgo conduce a conclusiones inductivas dentro de una perspectiva de conjunto.
- ▼ El AR maneja variables e incertidumbres molestas pero omnipresentes en la vida de las presas, frente a las evaluaciones deterministas que se limitan al análisis de sensibilidad a distintos parámetros.
- ▼ En su aplicación el AR reemplaza un análisis de estados límites por otro, paso a paso, de los procesos que conducen a los fallos, pensado en términos de probabilidad.
- ▼ En sus resultados el AR sustituye los valores únicos y fijos por probabilidades acumuladas.

##### El AR como aproximación causa-efecto

Contrariamente a la evaluación determinista los conceptos probabilistas tienen una escala de tiempos a lo largo de todo el recorrido. Es esencial tener en cuenta todas las causas de fallos, incluyendo las que resulten de inspecciones recientes, que pueden poner en evidencia puntos débiles. Las causas de

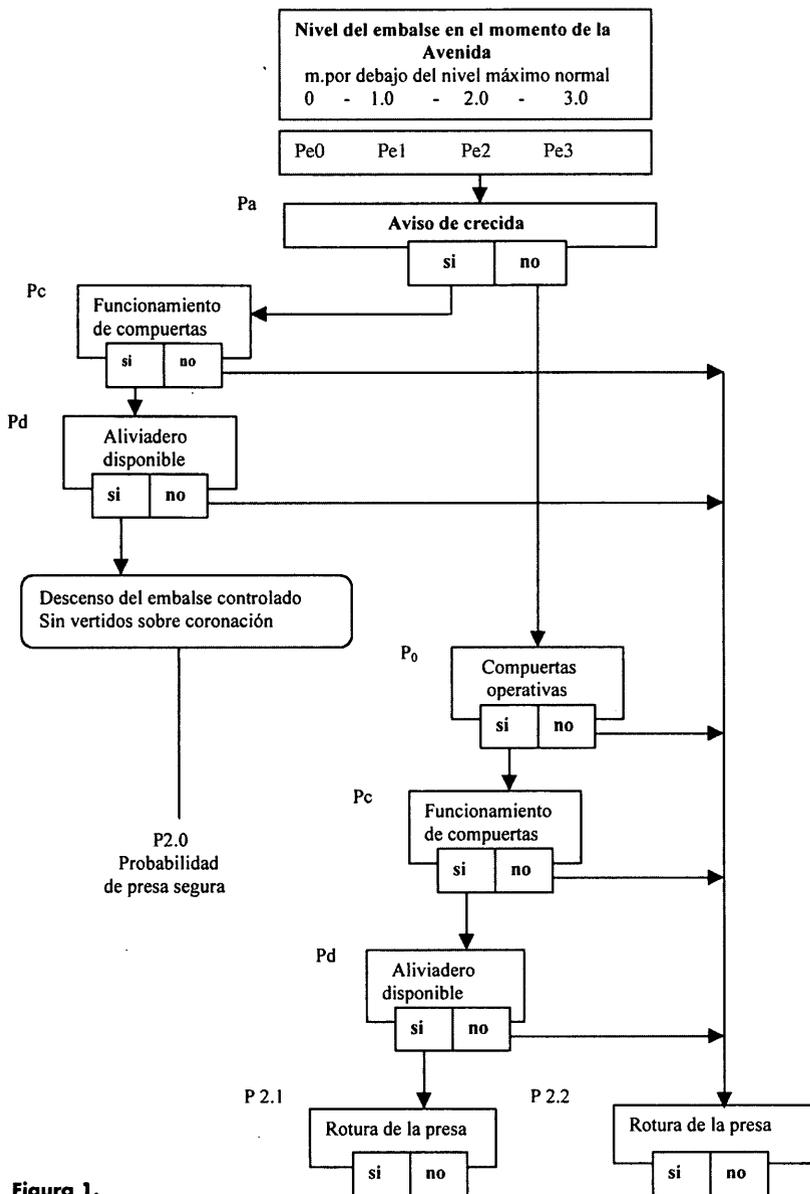


Figura 1.

fallo "apocalípticas" (avenidas extremas, o el seísmo máximo posible) no constituyen siempre el mayor riesgo.

Considerado el riesgo como el producto de una débil probabilidad por un valor elevado de las consecuencias, se pueden citar como ejemplos característicos la obstrucción de un aliviadero con avenidas medias o toda clase de errores humanos como la inobservancia del aumento de fugas controladas.

La etapa siguiente es el análisis de la respuesta de la presa, para el que se utilizan normalmente los árboles de fallo, representación secuencial de sucesos externos y actuaciones humanas, como puede verse en el ejemplo de la fig. 1.

Las probabilidades pueden estar definidas por un juicio experto subjetivo, por un análisis objetivo, o por una combinación

de los dos criterios. La credibilidad de un árbol de fallos depende mucho de la justificación de los valores numéricos, esencial para la aceptación del AR cuyo objetivo es señalar la reducción selectiva de las incertidumbres en la medida de lo posible.

El resultado del cálculo se expresa a la vez en pérdida de vidas humanas y en términos económicos pero para las evaluaciones preliminares esta última etapa es frecuentemente abandonada, limitando la utilización de las probabilidades de fallo a la determinación de los esfuerzos necesarios para mejorar la seguridad.

La evaluación de las consecuencias es, sin embargo, necesaria para la preparación de los planes de alerta y emergencia, así como para la clasificación de los riesgos.

**4.3.2. La toma de decisiones. Consideraciones sobre la relación coste/beneficio y los seguros**

El AR ha demostrado su utilidad para los cálculos coste/beneficio poniendo en evidencia la relación existente entre la reducción de los riesgos y los costes que esta reducción genera.

Más corrientemente el AR es utilizado por los ingenieros para:

- ▼ Comparar soluciones de nuevas presas o para la restauración de las antiguas.
- ▼ Evaluar el riesgo durante la construcción o el primer llenado del embalse.
- ▼ Evaluar el impacto económico de la vigilancia y del sistema de alerta.
- ▼ Evaluar las primas de seguros y servir de base para las negociaciones.

Los principales riesgos que se analizan son el hidrológico, el geológico y en menor medida el de origen sísmico.

El análisis de riesgo está de actualidad en proyectos financiados por el sector privado, con mayor conciencia de su importancia. También puede ser utilizado para maximizar el rendimiento de las inversiones durante la fase de proyecto, lo que será de gran utilidad en la fase de explotación.

Una ventaja de poner en práctica un AR se deriva de que los valores extremos no son los más importantes para las cuestiones de seguridad. La mayor parte de los datos empleados se obtienen de series tangibles, como es el caso de la función de probabilidad para una crecida durante la construcción, que puede ser estimada con mucha más seguridad que la crecida de proyecto. Del mismo modo, los ingenieros experimentados estiman los costes y duraciones basados en valores medios. Las incertidumbres provienen más frecuentemente de

“errores flagrantes”, como la retirada de la financiación, o de un incumplimiento de las normas exigibles.

Es necesario indicar que el AR aplicado al aseguramiento de las presas existentes solo es aceptado en ciertas condiciones:

- ▼ Si el propietario está obligado a asegurarse por ley y es más aconsejable referirse a un AR antes que adoptar un parámetro simplificado como puede ser el volumen del embalse.
- ▼ El reagrupamiento en un pool es un medio de reducir las primas para asegurar el riesgo catastrófico.
- ▼ Si los esfuerzos son recompensados e interesa demostrarlo con un AR.
- ▼ Si las compañías de seguros lo exigen.
- ▼ Si existen los suficientes datos para realizar el estudio.
- ▼ Si el ejercicio del AR no es reducido a un ejercicio académico porque la seguridad de la presa sea manifiestamente elevada.
- ▼ Si la evaluación de las primas es una función de las consecuencias esperadas.

Las compañías de seguros suelen distinguir entre los “casos de pérdidas probables” y los “casos de pérdidas máximas previsibles”.

Algunos proponen como único parámetro, para determinar las primas, el volumen del embalse, en tanto que en Suecia y Noruega las primas percibidas por un pool de seguros son idénticas para las 1.300 presas existentes.

#### 4.3.3. Recomendaciones y legislación

Generalmente, los países que reglamentan sus presas en materia de seguridad son favorables a la noción del riesgo. El Corps of Engineers y el Bureau of Reclamation están desarrollando programas en este sentido.

En la clasificación de presas se nota una fuerte tendencia a utilizar criterios de riesgo en lugar de criterios geométricos. Tal es el caso de varios países entre los que se encuentra España. Las ventajas son la racionalidad en relación a los valores sociales comúnmente aceptados y la flexibilidad que permite la adaptación a las condiciones cambiantes tanto de la presa como de su entorno.

Un interés añadido es el potencial didáctico del AR como ayuda para establecer medidas correctoras de todo tipo.

A pesar de estas ventajas es difícil concluir el “nivel de seguridad suficiente”. Las administraciones deben utilizar la legislación en vigor en cada país, tratando de mejorar la seguridad de forma objetiva.

#### 4.3.4. Clasificación de los niveles de riesgo

La clasificación de las presas en función del riesgo ha de tener en cuenta su propio estado y los daños que se pudieran

producir aguas abajo. El AR es un elemento útil para la resolución del problema.

En esta clasificación se tienen en cuenta :

- ▼ Los elementos resistentes (presa, cimiento, etc.)
- ▼ Los elementos de reducción de las solicitaciones (aliviaderos y desagües, etc.)
- ▼ El entorno, envejecimiento y eventos poco habituales
- ▼ Factores humanos (explotación y mantenimiento, sabotajes, etc.)

Se trata de evaluar tres tipos de probabilidades: las de las causas, la de rotura y la del número de víctimas eventuales. Las pérdidas económicas son valores deterministas.

Es habitual la clasificación de los diferentes niveles de riesgo con apelativos genéricos (débil, significativo, elevado) refiriéndose a los diferentes escenarios (hidrológico, sísmico, etc.). En algunos países se eleva este número a 4 o 5. Otras veces se calculan las pérdidas incrementales en la hipótesis de existencia o no de la presa con los escenarios más pesimistas.

En Canadá y USA la clasificación de los peligros se basa únicamente en las consecuencias, sin tener en cuenta el estado de la presa, con el término “clasificación de las consecuencias”. Del mismo modo se emplea el término “población en riesgo” al objeto de obviar el problema de cuantificar las vidas humanas.

El USBR distingue tres categorías según la “pérdida de vidas (PDV) anual media estimada”, con valores  $PDV > 0,01$   $0,01 > PDV > 0,001$   $PDV < 0,001$ . El término PDV es el producto de la probabilidad por la pérdida de vidas humanas, es decir  $0,001$  indica un periodo de retorno de 1.000 años para una víctima o de 10.000 años para 10 víctimas. La confianza pública se considera crucial y en lugar de usar el término “riesgo aceptable” se utiliza el de “protección pública”, al objeto de atenuar las controversias de origen emocional.

Las recomendaciones canadienses distinguen cuatro categorías de consecuencias incrementales, haciendo la distinción entre las pérdidas de vidas humanas, las económicas y las medioambientales; las pérdidas más severas de uno u otro grupo determinan la clasificación de las presas.

La legislación sudafricana afecta a todas las presas de altura superior a 5 m o con un embalse superior a 50.000 m<sup>3</sup> y distingue tres tipos de eventos: sumersión sin roturas, rotura con buen tiempo y rotura durante una crecida. Solo el tercero sirve para la clasificación de los riesgos en débil, significativo y elevado. No se tiene en cuenta el estado de la estructura que se controla ulteriormente por la aplicación del AR.

Los propietarios de un conjunto de presas tienden a establecer un orden de prioridades en materia de seguridad que habrán de ser afrontadas con presupuestos limitados, para lo que utilizan técnicas simples. Por su propia naturaleza estas investigaciones preliminares comportan una alta subjetividad y excesivo peso de las bases de datos históricas. La utilización de estas

## Q-76. LA UTILIZACIÓN DEL ANÁLISIS DE RIESGOS EN LOS PROCESOS DE DECISIÓN RELATIVOS A LA SEGURIDAD DE PRESAS Y SU GESTIÓN

bases de datos exige que cada tipo de fallo sea considerado en el contexto específico de cada una de las presas, lo que es raramente posible. Estas técnicas se deben reservar a una etapa de selección preliminar y se deben completar siempre con un estudio más detallado de las presas que tengan una tasa elevada de defectos y que requieren, normalmente, investigaciones complementarias.

Una clasificación basada en índices de las presas suizas ha sido presentada por Lafitte (1996) y actuaciones análogas han sido realizadas en Brasil y Sudáfrica.

La evaluación de las consecuencias es necesaria, al menos cualitativamente. De nuevo las incertidumbres se multiplican según el modo e importancia del fallo, adelanto de la alarma sobre la llegada de la onda de avenida, infraestructuras existentes, etc. Las pérdidas de vidas humanas y las económicas están afectadas por diversos factores de forma diferente. En estas condiciones es útil empezar por definir escenarios deterministas de la forma más realista posible.

### 4.3.5. Planes de emergencia

Los planes de alerta y emergencia necesitan del AR para dibujar las zonas inundables con la precisión necesaria porque el equipo de crisis tiene necesidad de ser guiado por un escenario de deterioros físicos a los cuales será referido durante las intervenciones de emergencia.

Hay un buen número de ejemplos de análisis de riesgo de roturas de presas: unos para rotura completa, otros para condiciones de avenidas torrenciales, para diversos mecanismos de rotura de diques, probabilidades de submersión, etc.

La existencia de presas en cascada y de poblaciones situadas aguas abajo exige una estimación de los tiempos de encadenamiento de los sucesos derivados de la rotura de cada una de ellas.

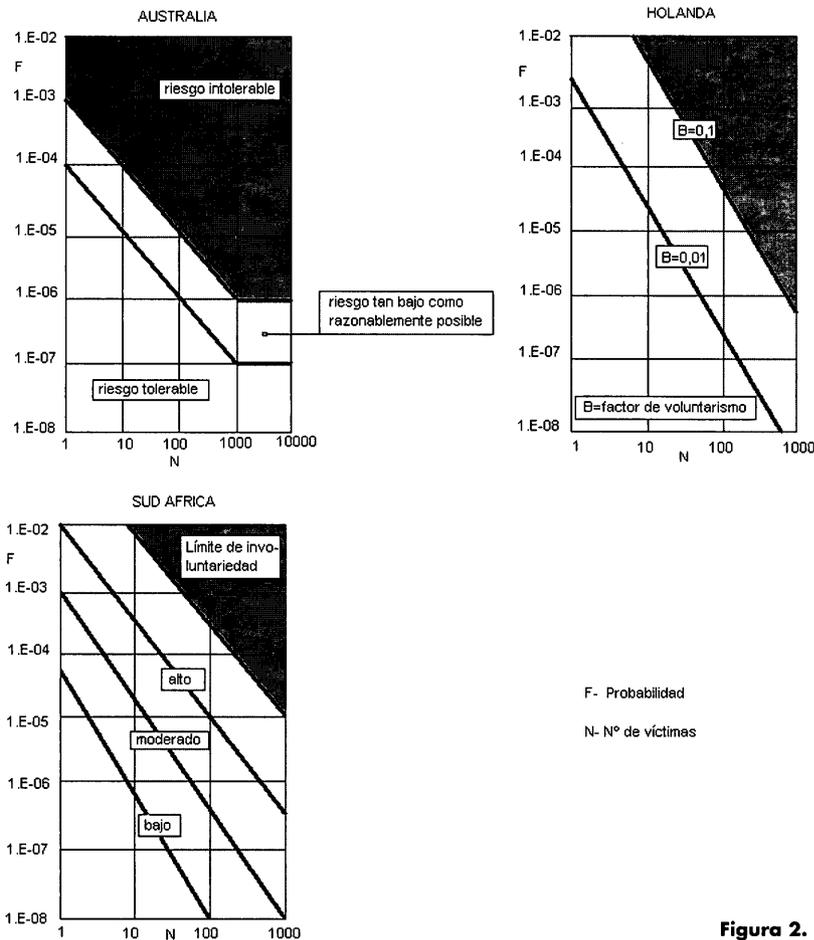


Figura 2.

### 4.3.6. Criterios de aceptación del riesgo

En general la sociedad acepta el riesgo derivado de las presas si las reglas del arte son respetadas. El nivel de protesta después de un accidente con víctimas varía según las respuestas a preguntas de orden ético, social, económico, medioambiental y psicológico, Reid (1992). Lo importante es la confianza en los expertos y autoridades, que crece con la comunicación.

De Almeida (1997) distingue la diferente percepción popular de las inundaciones naturales frente a las producidas por la rotura de una presa.

De las estadísticas de accidentes mortales resultantes de actividades humanas se infiere

que el riesgo socialmente admisible ha sido establecido. Es necesario cuantificar el riesgo involuntario como una forma de valorar las vidas humanas sin recurrir a unidades monetarias.

El riesgo socialmente aceptable (RSA) se representa generalmente en forma de diagramas F/N donde F indica las probabilidades acumuladas de fallo y N el número de vidas perdidas.

La figura 2 representa tres ejemplos que sugieren umbrales de separación de los riesgos inaceptables, con una zona de maniobra calificada como de riesgo "tan débil como razonablemente posible". Quiere esto decir que no se aceptará si hay una posibilidad razonable de evitarla pero si fuese técnicamente difícil o excesivamente costosa podría ser admitida.

Los diagramas de riesgo socialmente aceptable (RSA) se basan en evaluaciones de las estadísticas relativas a los accidentes y en la percepción del riesgo en cada país. El riesgo para una presa dada es juzgado según su posición en el diagrama.

Los sudafricanos evalúan el riesgo socialmente aceptable según cinco categorías: pérdidas monetarias, sociales, medioambientales, población en riesgo y riesgo anual de muerte por hora de exposición.

Pero hay opiniones escépticas sobre el empleo de estos diagramas alegando rigidez (Hartford y Muller), y aunque son

de gran utilidad para juzgar el efecto de diferentes opciones para reducir el riesgo de pérdida de vidas humanas, no son satisfactorios en lo que concierne al punto de vista del público afectado. Un juicio de valor y una actitud comunicativa se consideran más adecuados actualmente. Se prefiere abandonar las leyes dualistas (sí/no) y favorecer las buenas prácticas.

#### **4.4. ADQUISICIÓN DE DATOS**

Los datos necesarios para llevar a cabo un análisis de riesgos son de tres tipos:

- ▼ bases estadísticas de roturas e incidentes
- ▼ juicio de ingenieros experimentados
- ▼ tratamiento analítico

##### **4.4.1. Estadísticas sobre las roturas y los incidentes**

Las bases estadísticas de roturas e incidentes son utilizadas principalmente para emitir un juicio sobre las probabilidades concernientes a los árboles de fallos, para efectuar análisis coste/beneficio sobre presas pequeñas y para contrastar los juicios.

Los boletines de ICOLD sobre roturas e incidentes (1983), aguas agresivas (1989), reacción de los álcalis (1991) y sobre presas de menos de 30 m de altura (1995 y 1997) contienen importantes series estadísticas. También las descripciones detalladas de roturas e incidentes encierran grandes enseñanzas: ICOLD (1983) y USCOLD (1975, 1988).

Los incidentes precursores de roturas son del mayor interés por su mayor abundancia y porque son más escasamente el resultado de un error humano.

Nuevos intentos de establecimiento de bases de datos tales como el "Programme National sur le Comportement des Barrages", de M. McCann proporcionarán estimaciones más fiables. Los puntos que hacen más útiles las descripciones de los incidentes son:

- ▼ Reportaje en tiempo real y utilización de información de primera mano.
- ▼ Informaciones dadas por especialistas en fichas estándar. Los reportajes periodísticos no se consideran fiables.
- ▼ Información sobre el comportamiento de la presa antes del incidente.

Así, el progreso pasa por una mejor calidad de las informaciones recogidas y por su difusión a escala internacional.

Es una opinión muy extendida que los datos estadísticos son más útiles para las decisiones preliminares que para las concernientes a la seguridad y al coste final por no reflejar suficientemente las condiciones de la presa en cuestión. En ningún caso se deben utilizar estos datos para juzgar cuantitativamente la seguridad de una presa por los siguientes motivos:

- ▼ El tamaño de la muestra suele ser muy pequeño.
- ▼ Las estadísticas se refieren al efecto del fallo y raramente a la causa.
- ▼ Hay una cierta reticencia a comentar los casos observados, sobre todo en algunos países.
- ▼ Los avances técnicos y los criterios de proyecto utilizados en cada país son muy diferentes.
- ▼ Raramente se incluyen los errores humanos.

Por otra parte, la utilización de datos estadísticos sin tratamiento perjudica a las presas de superior calidad. Por ejemplo, la sumersión puede tener un cierto número de causas primeras: capacidad de evacuación insuficiente, erosión de la coronación de la presa o asentamiento excesivo, negligencia o imposibilidad de bajar el nivel del embalse antes de la llegada de la avenida, obstrucción del evacuador o mal funcionamiento de las compuertas, laderas inestables, etc. Esta distinción es fundamental para entrar en los árboles de fallos: por consiguiente los datos estadísticos solo serán utilizados si hay posibilidad de establecer tales distinciones.

##### **4.4.2. Juicio (criterio)**

Es a menudo el árbitro entre los datos estadísticos y los resultados del análisis. Por una parte, es útil en lo que concierne a la credibilidad del caso en cuestión y, por otra, ayuda a validar o refutar los resultados analíticos. En el dominio del AR el juicio alcanza todo su valor; es decir, el juicio sustenta a la vía analítica y no al contrario. Por ejemplo, definir un modo de fallo es comprender por el juicio un resultado analítico. Veamos algunos ejemplos.

La fisuración de presas de hormigón es un fenómeno estable dentro de un campo de compresiones e inestable si la compresión es débil o se presentan tracciones o cizallamientos. El juicio técnico puede así matizar la idea general de que la fisuración es siempre peligrosa.

Ocurre lo mismo para el riesgo reducido que entraña el sifonamiento en un núcleo arcilloso delgado pero muy compactado comparativamente con la idea de que un núcleo grueso es siempre más seguro.

Otro ejemplo concierne a los caminos de fallo. El juicio permite identificar el camino más probable y compararlo con los resultados analíticos (envolvente de fallos) a fin de estudiar las diferentes opciones bajo un ángulo crítico.

Sin embargo hay límites. Es necesario admitir un hecho psicológico. No se puede fiar al juicio la identificación de fenómenos de escasa probabilidad. Igual que para el sesgo estadístico, se puede atenuar el sesgo psicológico por diferentes medios (examen por colegas cualificados, debates con otros expertos, etc.). Esta estrategia obliga a los intervinientes a sostener sus tesis. Otra aproximación puede hacerse sobre el proceso analítico a tener en cuenta. El cuadro

teórico para el cálculo de probabilidades de las observaciones es la teoría de Bayes,

Es más difícil asegurar la fiabilidad de los datos de base en un análisis basado en el riesgo que en el caso de un cálculo determinista. Por esta razón es necesario que esté basado en los conocimientos de expertos, como elemento esencial para reforzar la confianza (Hartford 1999).

Cualquiera que sea el juicio debe ser defendible para ser útil y debe de apoyarse en la disciplina y racionalidad.

#### 4.4.3. Análisis

Los datos analíticos utilizados en el AR son generalmente los resultados de conceptos probabilistas que analizan conjuntos estocásticos de variables aleatorias para presentarlos de forma cuantitativa; por ejemplo, una función de densidad de probabilidad.

Generalmente, las probabilidades de los sucesos y fallos son evaluadas analíticamente. Se pueden dar como ejemplos la integral de interferencia de las cargas con las distribuciones de resistencia como medida de la probabilidad de fallo, el análisis de los árboles de fallo, la simulación aleatoria del tipo Monte-Carlo, los métodos Bayesianos, etc.

Para tener en cuenta la existencia de valores máximos y mínimos en las distribuciones de los parámetros físicos se utilizan exclusivamente distribuciones bornadas.

En el dominio del análisis de fiabilidad es fundamental la cuantificación de las incertidumbres; o de otro modo, la incertidumbre está asociada a los parámetros de partida y no al resultado, que es la probabilidad de fallo.

En suma, un modelo de ayuda a la decisión e identificación de los principales parámetros es una condición previa en la búsqueda de la condición de datos fiables.

#### 4.5. ORIGEN Y TRATAMIENTO DE LAS INCERTIDUMBRES

##### 4.5.1. Origen

En el dominio de las presas, la incertidumbre es un fenómeno omnipresente y bien conocido, que no siempre se tiene en cuenta. La primera tarea de un AR consiste en examinar su origen. La tabla 1 indica los más corrientes.

Un ejemplo del lado determinista es el hecho de que los valores extremos, tales como las crecidas o los seismos de largo periodo de retorno, son poco útiles para el AR. Los ingenieros son conducidos hacia el determinismo calculando valores "máximos probables" al objeto de alejar la incertidumbre. Otro ejemplo es el comportamiento frágil de los materiales, en casos tales como la fisuración del hormigón por tracción.

Las investigaciones sobre los orígenes de las incertidumbres pueden ser caras pero su omisión comprometería el resultado y, lo que es peor, supondría una actitud retrógrada.

**TABLA 1**

Origen/Tipo	Ejemplo de origen	Tratamiento analítico
Física	Conocimiento imperfecto de la geología, hidrología y comportamiento mecánico.	Densidad de probabilidades bornadas Simulación tipo Monte-Carlo
Estadística	Dispersión de una muestra a otra	Desviación típica, error medio, límites de confianza
Epistemológica	Modelos matemáticos simplificados	Simulación Monte-Carlo Teoría de Bayes Árboles de fallos
Decisión	Ideas humanas subjetivas sobre una condición oculta	Árboles de fallos Teoría de Bayes
Predicción	Incertidumbre futura	Arboles de fallos Teoría de Bayes
Reacción del público	Falta de confianza	Comunicación
Error humano	Ver 4.5.3	Teoría de errores groseros

#### 4.5.2. Tratamiento

Se pueden distinguir tres formas de abordar la incertidumbre:

- ▼ rodearla de información suplementaria
- ▼ evitarla por una modificación del proyecto o la realización de actuaciones
- ▼ tomar medidas preventivas (auscultación, prealerta) y de formación.

El tratamiento de los datos geológicos o geotécnicos es esencial (ASCE 1996). Los geólogos aceptan el riesgo y dudan poco en razonar en términos probabilistas, pero sus esfuerzos para limitar la incertidumbre son a veces considerados como un freno al progreso de los estudios del proyecto. Por otra parte, las variables aleatorias de los parámetros geotécnicos son utilizadas de forma inmediata en los modelos deterministas al objeto de evaluar la seguridad estructural, con el riesgo de perder de vista las consecuencias que pueden derivarse de las siguientes causas:

- ▼ estructura espacial de la fundación heterogénea y anisotropía
- ▼ estudio incierto por medio de un pequeño número de muestras
- ▼ influencia del agua del embalse sobre el macizo rocoso diaclasado

Entre las primeras tentativas de aplicación del AR al tratamiento de la incertidumbre geotécnica se puede citar a Mello (1977 y 1988), Harr (1977), Hek (1983), y Whitman (1984).

Borges y Londe (1975) distinguen las tres fuentes de incertidumbre ya relacionadas y Einstein (1995), presenta métodos estadísticos de aplicación a macizos rocosos.

Morgenstern (1995), Vick y Steward (1996) proponen un puente entre la teoría y la práctica a la vez que Christian (1996) presenta una aplicación del análisis de fiabilidad al estudio de estabilidad de taludes y plantea de nuevo la relación entre el coeficiente de seguridad tradicional y el índice de fiabilidad.

Hoeg (1996) señala el interés de la auscultación para mejorar la calidad de los datos de partida utilizados en el análisis de riesgos.

Lombardi (1979) demuestra que toda tentativa de reducir las incertidumbres por reconocimientos in situ debe ser orientada hacia el fin buscado. Sin embargo, esta recomendación, bastante evidente, es a menudo insatisfactoria por una cuestión de facilidad o por argumentos económicos.

Para disminuir la incertidumbre sobre las condiciones del cimiento de una presa en el caso de roca muy fracturada se puede recurrir a la inyección y drenaje al objeto de reducir la

posibilidad de deslizamientos y la dispersión de los parámetros mecánicos. Desde el punto de vista del riesgo el mecanismo ha mejorado. Aunque esto parece trivial, este ejemplo muestra que el razonamiento basado en la noción de riesgo (reducción de la incertidumbre en lugar de su cuantificación respecto al macizo no tratado) señala el elemento fundamental de la mejora de la seguridad.

En hidrología el AR permite cuantificar el umbral de sustracción aceptable, condición que en el cálculo determinista es considerada contraria a la noción de seguridad. El hecho de poder evaluar este valor constituye ciertamente un progreso tanto del arte del ingeniero como en lo que concierne a los aspectos económicos unidos a las medidas correctoras a poner en práctica. Un ejemplo llamativo es el concepto francés de "caudal de rotura inminente", que permite juzgar el riesgo de rotura durante un vertido sobre la presa. La incertidumbre de estimación de la crecida extrema es atenuada por la estimación, más fácil, de la crecida que provoca una altura de la lámina vertiente que conduce a la rotura de la presa.

No se dispone más que raramente de datos estadísticos sobre la secuencia causa efecto de los incidentes derivados de una crecida. El seguimiento de recomendaciones tales como las establecidas por el Comité Francés sobre la conducta a seguir durante un incidente sería una condición previa para la recogida de datos directos.

Lo más difícil es poder estimar la incertidumbre de los eventos escasos y de sus consecuencias. Es el punto débil del AR, citado por sus adversarios, y es necesario admitir que es un problema irresoluble para nuestra profesión. Toda tentativa directa de evaluar la probabilidad de rotura debida a la crecida máxima probable (PMF) está condenada al fracaso. Pensar lo contrario es engañarse.

Es necesario, también, reconocer que el nivel de incertidumbre tolerable depende del margen de seguridad. Se puede igualmente evitar esta dificultad reemplazando en la medida de lo posible las estadísticas de los valores extremos por las "estadísticas de cantidades medias" basadas en conjuntos de datos más fiables, proposición defendida por el profesor V. de Mello (1977).

#### 4.5.3. Error humano

Si el AR no integrase el error humano no sería por ello inválido pero sí incompleto, dada su importancia para la evaluación realista de la seguridad de una presa.

Cualquiera que sea la aproximación adoptada para cuantificar el impacto del error humano se encuentra que no es bueno incorporarlo matemáticamente en un AR derivado de incertidumbres físicas Lind (1983), Ditlevsen (1981)...

Una aproximación que trata de cuantificar el error humano de la industria es presentada por Cameron (1993) y sería interesante su aplicación al problema de las presas. Por otra

parte, Lecornu (1998) señala la importancia de tener en cuenta el comportamiento humano para reducir los errores en la concepción y la vigilancia.

En lo que concierne a las estadísticas de fallo de las obras de ingeniería civil se ha probado que el término "error humano" es muy difuso para los modelos de causas de fallo cuantitativas. En efecto, es necesario diferenciar al objeto de tener en cuenta la realidad específica de cada presa. Por ejemplo, el juicio sobre la componente humana puede estar unido a:

- ▼ los modos de fallo más probables y a su "visibilidad"
- ▼ a la complejidad geológica y al conocimiento de la misma
- ▼ a la fiabilidad de los datos sobre las crecidas
- ▼ al tipo de evacuador, con o sin compuertas
- ▼ a la presencia de aparatos de medida y a su fiabilidad
- ▼ a la competencia y a los conocimientos del personal de vigilancia

La cuantificación del error humano debe de incluir todas las etapas: concepción, proyecto, construcción y explotación de la presa, y es útil su justificación según las siguientes categorías:

- ▼ falta de atención, negligencias
- ▼ subestimación de la influencia
- ▼ conocimientos insuficientes
- ▼ falta de experiencia
- ▼ falta de autoridad en la toma de decisiones
- ▼ incapacidad para comunicar
- ▼ confianza en otros

Este análisis es útil para la evaluación de las acciones correctoras necesarias y hace más eficaces los programas de formación.

Tener en cuenta el factor humano parece especialmente apropiado como consecuencia de que los medios financieros a consagrar a las presas son limitados. Además, el factor humano adquiere más importancia en el cuadro de programas restringidos y de presiones económicas y financieras que tienden a limitar los reconocimientos técnicos y el control de calidad de proyectos financiados con fondos privados.

## **5. CONCLUSIONES**

El análisis de riesgo, en tanto que combinación de juicio subjetivo y de rigor científico es una aproximación formal y consecuente para evaluar la verosimilitud de un suceso no deseado. Su aplicación ha suscitado gran interés en todo el mundo y a pesar de sus deficiencias es cada día más acep-

tado. La investigación permanente contribuirá a reducir los defectos y a mejorar su puesta en práctica, Lafitte (1993).

Uno de los problemas principales es la validez de las hipótesis emitidas para reducir las incertidumbres. Estas hipótesis están apoyadas en el juicio de expertos, basado sobre la observación de un número creciente de presas. Este juicio hace del análisis de riesgo un instrumento más flexible pero también más vulnerable por el hecho de que las experiencias particulares, de asociaciones o de países perciben la noción de riesgo de forma diferente. Aceptar estos parámetros culturales va en contra de la percepción tradicional del ingeniero, más acostumbrado a utilizar criterios numéricos. Sin embargo, el juicio de los expertos permanece como un elemento esencial en los procesos de decisión para sistemas complejos, suscita el debate y contribuye así a la eficacia de la comunicación.

Los ingenieros tratan de medir la incertidumbre y el análisis de riesgo pone de manifiesto que un juicio atinado es más eficaz que un modelo matemático. En consecuencia, muchos autores demandan un esfuerzo de investigación extensiva para mejorar la confianza en el cálculo de las probabilidades de cada suceso, predecir mejor las consecuencias y cuantificar más adecuadamente los impactos sociales y medioambientales.

La investigación sobre estos temas debe de recogerse en informes imparciales y detallados de forma que sean útiles para su aplicación práctica. En tanto que las roturas y particularmente el gran número de incidentes menores solo estén disponibles en forma de listas sin testimonios directos de las personas responsables (y esto de forma limitada) el soporte estadístico continuará siendo parcial.

En lo que concierne a la seguridad de las presas en el mundo entero, todos los países deberían dar cuenta de forma transparente de los fallos observados. La historia muestra que los que han tenido tal actitud no soportaron reproches.

El AR como un útil para la optimización económica de un proyecto no es una novedad. Sin embargo, el contraste entre la reducción de costes y las ventajas resultantes de las investigaciones previas constituye una preocupación creciente. En ciertos casos la noción del riesgo en materia de retorno de la inversión conduce a unos valores superiores a los de origen geológico o hidrológico. La realización de un AR puede ser la base de un juicio correcto.

Las contribuciones a la cuestión 76 demuestran que la evaluación del riesgo tiene más valor que una simple ayuda a las decisiones en materia de seguridad. Completa a los métodos tradicionales para establecer un programa de vigilancia o para rehabilitar una presa existente y es también de gran ayuda para las decisiones a propósito de nuevos proyectos. En resumen, la evaluación del riesgo concierne tanto a las cuestiones de seguridad como a las económicas. ■