

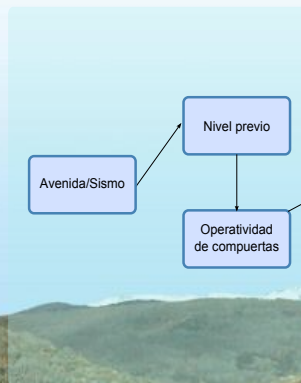
GUÍAS TÉCNICAS DE SEGURIDAD DE PRESAS

GUÍA TÉCNICA DE EXPLOTACIÓN DE PRESAS Y EMBALSES TOMO 1

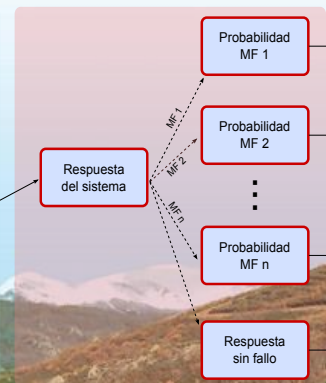
ANÁLISIS DE RIESGOS APLICADO A LA GESTIÓN DE SEGURIDAD DE PRESAS Y EMBALSES

P - 8

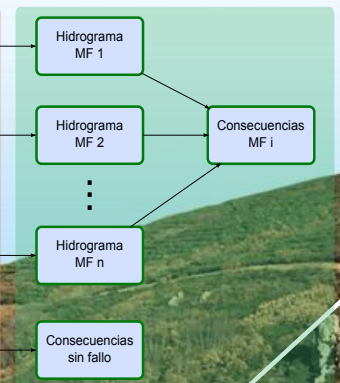
SOLICITACIONES



RESPUESTA DEL SISTEMA



CONSECUENCIAS



*priorización de
inversiones*

transparencia

sostenibilidad

gobernanza

*gestión
integral
de seguridad*



COLEGIO DE INGENIEROS DE
CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL
DE GRANDES PRESAS

GUÍAS TÉCNICAS DE SEGURIDAD DE PRESAS

GUÍA TÉCNICA DE EXPLOTACIÓN DE PRESAS Y EMBALSES TOMO 1

ANÁLISIS DE RIESGOS APLICADO A LA GESTIÓN DE SEGURIDAD DE PRESAS Y EMBALSES



**COLEGIO DE INGENIEROS DE
CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS**



**COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE
GRANDES PRESAS**

Foto portada: Presa de la Requejada

Coedita:

Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

ISBN: 978-84-38004-57-9

Comité Nacional Español de Grandes Presas

ISBN: 978-84-89567-19-1

Depósito Legal: M-37804-2012

Imprime: Exce Consulting Group

Presentación

El marco normativo que define los aspectos generales y los criterios de la Seguridad de las Presas es competencia del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) a través de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente y de su Dirección General del Agua.

El desarrollo de este marco normativo comenzó en 1967 con la “Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas”, que ha estado vigente durante la época de mayor actividad en el proyecto y construcción de presas y que, aún hoy, sigue siendo de aplicación.

En el año 1996 se aprobó el “Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses” en el que se actualizaron los conceptos y criterios sobre seguridad de presas que habían evolucionado de forma muy significativa desde la publicación de la Instrucción. Este Reglamento, que incide más específicamente en los temas relativos a la seguridad, ha tenido una aplicación parcial aunque progresiva gracias a su enfoque global de la seguridad.

La coincidencia en la aplicación de ambos documentos normativos (Instrucción y Reglamento) y la necesidad de disponer de un único cuerpo normativo de seguridad de presas, embalses y balsas ha llevado al MAGRAMA a redactar las Normas Técnicas de Seguridad (NTS), actualmente en proceso de aprobación.

Las Guías Técnicas de Seguridad de Presas, redactadas por grupos de trabajo compuestos por profesionales expertos en este campo, se vienen editando por el Comité Nacional Español (SPANCOLD) de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD) con la colaboración del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (CICCP). Presentan el estado del arte en los diversos aspectos relativos a la seguridad de las presas y dan recomendaciones para la evaluación y consecución de los objetivos de seguridad establecidos por las Normas. Constituyen así unas Guías Técnicas de referencia para el desarrollo tecnológico de los criterios normativos, y son utilizadas por los profesionales de presas, tanto en el ámbito español como en el internacional.

La colección de Guías Técnicas que SPANCOLD viene publicando desde 1997 se compone de los siguientes documentos:

1. Seguridad de Presas (*Compendio de obligaciones legales*)
2. Criterios para proyectos de Presas y sus obras anejas

1. Presas de Hormigón (*La actualización de la parte correspondiente a Hormigón Compactado con Rodillo (HCR) se ha editado recientemente y se ha entregado en versión inglesa durante la celebración en Zaragoza del Simposio Internacional RCC 2012.*)
2. Presas de Materiales Suelos (*Edición en 2013*)
3. Estudios geológicos - geotécnicos y de prospección de materiales
4. Avenida de proyecto
5. Aliviaderos y Desagües
6. Construcción de Presas y control de calidad
7. Auscultación de las presas y sus cimientos
8. Explotación, Conservación y Mantenimiento. *En proceso de redacción y edición. Se compone de tres tomos. El primero lo constituye la monografía que aquí se presenta:*
 1. **Análisis de riesgos aplicado a la gestión de seguridad de Presas y Embalses**
9. Aspectos ambientales (*Edición en 2013*)

Este documento presenta el estado actual del Análisis de Riesgos, que se ha constituido como una herramienta de gran utilidad en la gestión de Presas y Embalses. Su metodología pretende servir de apoyo a la gobernanza de estas importantes instalaciones, aportando recomendaciones, fundamentos, referencias y ejemplos nacionales e internacionales en los que sustentar la implantación de sistemas de gestión integral de la seguridad de estas importantes infraestructuras hidráulicas.

Con ello, se dota a los titulares, administraciones, reguladores, consultores, usuarios, servicios de protección civil y todo tipo de agentes y asociaciones vinculadas a la explotación de presas y embalses de un cuerpo de conocimiento especialmente útil para la justificación y priorización de inversiones, inspirado en los principios de transparencia y sostenibilidad. De esta forma, puede dar respuesta y complementar la legislación vigente, sin que, en ningún caso, sustituya a ésta ni a las buenas prácticas ingenieriles.

Por último, expresar mi agradecimiento al Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, así como al Comité Técnico de Seguridad de Presas de SPANCOLD y al equipo de trabajo que ha asumido la tarea de redacción de la presente monografía.

José Polimón

Presidente del Comité Nacional Español de Grandes Presas (SPANCOLD)

Prefacio

La edición de la presente Monografía por parte del Comité Nacional Español de Grandes Presas (SPANCOLD) ha sido posible gracias al desarrollo del proyecto BIA 2006-08948, financiado por el Ministerio Español de Ciencia e Innovación.

Dicho proyecto, titulado “Aplicación del Análisis de Riesgos a los programas de conservación, mantenimiento, rehabilitación y gestión de la Seguridad de Presas y Embalses”, perteneciente al Plan Nacional de I+D 2004-2007 fue otorgado en Diciembre de 2006 a la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), actuando como Investigador Principal Ignacio Escuder Bueno.

El proyecto ha contado con la participación de SPANCOLD bajo la figura de Ente Promotor Observador, y como tal, el Comité de Técnico Seguridad de Presas de SPANCOLD, presidido por Arturo Gil García y con la eficaz colaboración de Eduardo Rojo Martínez como secretario de dicho comité, ha llevado a cabo la coordinación de la edición de esta Monografía.

La principal fuente del texto que se presenta corresponde con el capítulo de revisión del estado del arte de la Tesis Doctoral de Armando Serrano Lombillo, titulada “Desarrollo de una herramienta completa de análisis y evaluación de riesgos en seguridad de presas”, dirigida por Ignacio Escuder Bueno y Manuel Gómez de Membrillera Ortuño, defendida en Marzo de 2011, y financiada por el mencionado proyecto BIA 2006-08948.

El objetivo fundamental de esta Monografía es guiar al lector de forma estructurada y apoyándose en más de 100 referencias científicas, técnicas y prácticas publicadas en los últimos años. El hilo conductor que da estructura al texto es la concepción e implantación de modelos de riesgo para el análisis, evaluación y gestión de la seguridad de presas. Desde esta perspectiva, los trabajos realizados en el ámbito de la Confederación Hidrográfica del Duero, impulsados por Liana Ardiles López y Daniel Sanz Jiménez, han permitido conformar un conjunto de referencias que constituye uno de los ejemplos internacionales más completos y documentados en los últimos años.

En cualquier caso, la monografía es el resultado del enriquecimiento y puesta al día de dicho texto básico con:

- Las discusiones y aportaciones continuas de los miembros del Comité Técnico de Seguridad de Presas de SPANCOLD.

- Las enriquecedoras experiencias prácticas publicadas llevadas a cabo por distintos titulares en España (Confederación Hidrográfica del Duero - Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino; Agencia Catalana del Agua; Iberdrola) desde el año 2008.
- Distintas referencias recientes a las mejores prácticas internacionales en la materia, como las presentadas en el Tercer Foro Internacional del Análisis de Riesgos, Seguridad de Presas y Gestión de Infraestructuras Críticas, celebrado en Valencia en Octubre de 2011, organizado por la UPV y el Department de Homeland Security Norteamericano (DHS, USA).

Muchas gracias a todos los que la habéis hecho posible.

Índice general

I Memoria	1
1. Introducción	3
2. Glosario	7
3. La gestión de la seguridad basada en riesgo	21
4. El proceso del análisis de riesgo	25
4.1. Los pasos de un análisis de riesgo	25
4.2. La identificación y caracterización de modos de fallo	27
5. El modelo de riesgo	31
5.1. Introducción	31
5.2. Arquitectura del modelo de riesgo	31
5.2.1. Planteamiento	31
5.2.2. Escenario normal	33
5.2.3. Escenario hidrológico	35
5.2.4. Escenario sísmico	38
5.2.5. Ejemplo	42
5.3. Estudio de solicitaciones: avenidas y sismos	42
5.3.1. Las solicitaciones en el análisis de riesgo	42
5.3.2. Estimación de los sismos de cálculo	44
5.3.3. Estimación de los hidrogramas de avenida	44
5.3.4. Ejemplo	45
5.4. Estudio de niveles de embalse	46
5.4.1. Los niveles previos en el análisis de riesgo	46
5.4.2. Obtención de la relación entre nivel previo y probabilidad	46
5.4.3. Datos necesarios	47
5.4.4. Ejemplo	50
5.5. Estudio de fiabilidad de órganos de desagüe	51
5.5.1. La fiabilidad de los órganos de desagüe en el análisis de riesgo	51
5.5.2. El proceso de estimación de la fiabilidad	51
5.5.3. Ejemplo	55
5.6. Estudio de laminación	56
5.6.1. La laminación en el análisis de riesgo	56
5.6.2. Cálculo de la laminación	56

5.6.3. Particularidades de la laminación en el análisis de riesgo . . .	57
5.6.4. Ejemplo	59
5.7. Estudio de probabilidades de fallo	60
5.7.1. La estimación de las probabilidades de fallo en el análisis de riesgo	60
5.7.2. Estimación mediante técnicas de fiabilidad	62
5.7.3. Estimación mediante juicio de experto	63
5.7.4. Metodologías específicas para la estimación de probabilidades de fallo	63
5.7.5. Ejemplo	64
5.8. Estudio de hidrogramas de rotura	64
5.8.1. La estimación de los hidrogramas de rotura en el análisis de riesgo	64
5.8.2. Cálculo de hidrogramas de rotura	66
5.8.3. Cálculo de los caudales pico mediante relaciones empíricas .	66
5.8.4. Ejemplo	67
5.9. Estudio de consecuencias	68
5.9.1. La estimación de consecuencias en el análisis de riesgo	68
5.9.2. El proceso de estimación de consecuencias	70
5.9.3. Obtención de curvas de consecuencias	72
5.9.4. Ejemplo	73
5.10. Cálculo de riesgo	75
5.10.1. Planteamiento	75
5.10.2. Ejemplo	79
5.11. Niveles de detalle	79
6. Evaluación de riesgo y ayuda a la toma de decisiones	83
6.1. Introducción	83
6.2. Recomendaciones de tolerabilidad del USBR	84
6.3. Recomendaciones de tolerabilidad del ANCOLD	84
6.4. Recomendaciones de tolerabilidad del USACE	86
6.5. Indicadores de eficiencia	86
6.6. Ejemplo	90
7. Hacia herramientas de gestión integral de apoyo a la gobernanza en seguridad de presas	93
 II Apéndices	 97
A. Estimación de la fiabilidad de compuertas	99
A.1. Introducción	99
A.2. Lógica de los árboles de fallo	99
A.3. Simbología	101
A.4. Ejemplos	104
A.5. Combinación de probabilidades	107

B. Obtención de probabilidades mediante juicio de experto	113
B.1. Introducción	113
B.2. Identificación de las necesidades de estudio	114
B.3. Selección del nivel de estudio y del líder del proceso	114
B.4. Selección de expertos y revisores externos	116
B.5. Preparación de las sesiones	116
B.6. Obtención de las probabilidades	117
B.6.1. Preliminares	117
B.6.2. Presentación de la información	117
B.6.3. Discusión de los factores a favor y en contra	118
B.6.4. Emisión de probabilidades (primera ronda)	118
B.6.5. Comparación de resultados y reemisión de probabilidades . .	120
B.7. Agregación de resultados	121
B.8. Comentarios para la aplicación a la estimación de la fiabilidad de compuertas	121
C. Estimación de pérdida de vidas	123
C.1. Introducción	123
C.2. Metodología de Graham (1999)	125
C.2.1. Población en riesgo	125
C.2.2. Severidad de la inundación	126
C.2.3. Tiempo de aviso	127
C.2.4. Entendimiento de la severidad de la inundación	130
C.2.5. Resultados	131
C.2.6. Discusión sobre la Metodología de Graham (1999)	132
C.3. Otras metodologías	132
C.3.1. Modificaciones a la Metodología de Graham (1999)	132
C.3.2. Metodología SUFRI	133
C.3.3. Metodología de Jonkman	134
C.3.4. LIFESim	136
C.3.5. Metodología de BCHydro	137
D. Estimación de consecuencias económicas	139
D.1. Estimación de daños directos	139
D.1.1. Estimación del valor del uso del suelo	140
D.1.2. Curvas calado-daños	141
D.1.3. Resultados	143
D.2. Estimación de daños indirectos generales	144
D.3. Estimación de daños debido a la destrucción de la presa	145
D.3.1. Coste de reconstrucción de la presa	146
D.3.2. Otros daños debidos a la inexistencia de la presa	148
Bibliografía	161

Parte I

Memoria

Capítulo 1

Introducción

Desde la rotura de la presa de Teton (USA) en 1976, el mundo ha evolucionado muy significativamente en la forma de entender las presas, las inundaciones y el conjunto de infraestructuras críticas de las que dependen el funcionamiento de las sociedades modernas y el bienestar de los ciudadanos.

Dado que la sociedad ha venido demandando un incremento en los niveles de seguridad y fiabilidad de las infraestructuras consideradas esenciales, el diseño, la construcción y operación de presas debería integrarse en un marco de gestión de riesgo que permita de forma efectiva mitigar las amenazas tanto naturales como antrópicas. Así, estrategias integradas de gestión de riesgos han ganado mucha importancia en los últimos años y los esfuerzos realizados en su implementación incluyen ya de forma sistemática aspectos como sostenibilidad, resiliencia y participación pública.

En este contexto, el análisis de riesgos ha supuesto un auténtico cambio de paradigma que ha permitido avanzar en la evaluación y gestión de los riesgos de inundación, así como de todos aquellos riesgos que en definitiva puedan afectar a los ciudadanos, al medio ambiente y a nuestro propio desarrollo.

Reflejo de este cambio de paradigma son la Directiva Europea de Inundaciones de 2007 (2007/60/CE) o la Directiva Europea de Protección de Infraestructuras Críticas de 2008 (2008/114/CE). En Estados Unidos, siguiendo el camino comenzado por el Bureau of Reclamation en la segunda mitad de la década de los 90 del siglo pasado, desde 2005, el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE) y el organismo regulador de la energía hidroléctrica en dicho país (FERC) han puesto en marcha sus propios procesos de gestión de la seguridad de presas sobre la base de información de riesgo, mientras otros países como Francia, en 2008, han promulgado leyes específicas para llevar a cabo el proceso a escala nacional.

Estas prácticas y legislaciones a nivel mundial reconocen y emplazan, de forma explícita, a llevar a cabo análisis de riesgos como herramienta de gestión propia de países modernos, de manera que se refuercen los procesos de gestión de riesgo desde la mejora en la predicción de fenómenos naturales, pasando por la adecuada operación y mantenimiento de infraestructuras hasta la necesidad de buena praxis para minimizar los impactos sobre los ciudadanos y el medio ambiente.

En el campo específico de presas y embalses, el entendimiento y el reconocimiento de los distintos factores de riesgo presentes en las actividades relacionadas con su seguridad constituye la base conceptual para la confección de sistemas lógicos o modelos orientados a informar la toma de decisiones en seguridad de presas. El propio Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RD 16 de Enero de 2008) recoge la necesidad de contemplar la gestión del riesgo como un elemento fundamental de la Seguridad de las Presas, siguiendo el ejemplo de algunos de los países más desarrollados del mundo.

Sin embargo, hasta fechas relativamente recientes, la seguridad de presas y embalses se había centrado casi exclusivamente sobre la estructura u obra de ingeniería, y con un enfoque eminentemente determinista, consistente en controlar los riesgos mediante el seguimiento de reglas y procedimientos sancionados por la práctica así como verificar coeficientes de seguridad, entendidos como una medida conservadora y prudente, ignorando sistemáticamente la parte asociada a las consecuencias derivadas de un fallo en la seguridad.

De hecho, el reconocimiento efectivo de la doble componente del riesgo de inundación a nivel legislativo puede afirmarse que se produce en España en el año 1995, con la publicación de la “Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones” (BOE de 14 de Febrero de 1995).

La trascendencia de dicha norma legal consiste en el reconocimiento explícito de la componente de *consecuencias* como un factor determinante en el riesgo de inundación. Además, la mencionada “Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones” adquiere una especial importancia al recoger la obligatoriedad de redactar e implantar Planes de Emergencia de Presas para aquellas que previamente hayan sido clasificadas como A o B en relación a su *riesgo potencial*.

Más allá de esa importancia concedida a las consecuencias de inundación, la Directriz de 1995 impone a los propietarios de presas nuevas obligaciones derivadas del entendimiento completo del riesgo. Si hasta la década de los noventa los propietarios de presas se ocupaban fundamentalmente de gestionar la componente de la respuesta de sus estructuras frente a acciones diversas (mediante el cumplimiento de códigos como la Instrucción para el Proyecto Construcción y Explotación de Grandes Presas de 1967), a partir de 1995, con la obligación de redactar e implantar Planes de Emergencia, adquieren responsabilidades en la gestión de la componente de consecuencias.

También el Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses de 1996, haciéndose eco de esta realidad, recogía todas las prescripciones que en materia de Planes de Emergencia de Presas habían sido promulgadas un año antes en la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones de 1995, dando un paso más allá al establecer que el criterio básico que debe guiar las actuaciones en seguridad de presas es el *riesgo potencial*.

Más allá del contexto legislativo español, europeo y mundial, una serie de condicionantes prácticos han marcado el desarrollo en los últimos 15 años de técnicas de

análisis de riesgos a partir de las cuales llevar a cabo una gestión moderna, eficiente y transparente en seguridad de presas:

- La *responsabilidad pública* de los titulares de presas recogida en las distintas legislaciones, unida a la demanda social de mayores niveles de seguridad y de justificación del uso de los fondos públicos y privados.
- La necesidad de priorizar las acciones correctoras necesarias para conseguir la mayor y más rápida reducción de riesgos posible.
- La necesidad de optimizar la gestión de sistemas de recursos hídricos así como de aumentar la capacidad de regulación de los mismos para dar respuesta a retos como el Cambio Climático, que se manifiesta con severas sequías y grandes avenidas.
- La dificultad de construcción de nuevas estructuras por motivos fundamentalmente sociales y medioambientales, que previsiblemente hará necesario alargar la fase de explotación de las estructuras existentes más allá de la vida útil inicialmente prevista para las mismas.
- El envejecimiento del parque de presas (la mayoría de las estructuras supera los treinta años de antigüedad y, un porcentaje muy amplio los cincuenta años en explotación), así como la diferencia entre el conocimiento ingenieril actual y el existente cuando éstas fueron diseñadas y construidas.

Como podrá deducirse la presente Monografía, todo ello implica, a día de hoy, una continua inversión en investigación y desarrollo (por ejemplo mejoras continuas en las estimaciones y análisis de incertidumbre, desarrollos de software, etc.). Por tanto, puede decirse que el análisis, evaluación y gestión de riesgo requiere también de una componente formativa e investigadora continua. El trabajo desarrollado constituye un ejemplo de los beneficios que para la sociedad se derivan de la inversión en investigación, desarrollo e innovación.

Cabe también destacar el hecho de que la convivencia entre los estándares (códigos) de seguridad y las técnicas de análisis de riesgo como apoyo a la toma de decisiones no solo es conveniente sino necesaria, y se encuentra en la propia génesis de la elaboración de modelos de riesgo como los que se detallan en el presente documento.

En resumen, algunos de las ventajas (y retos) que el Análisis de Riesgos incorpora a la gestión de seguridad de presas son:

- Incorporar a distintos actores en el proceso, fundamentalmente en las tareas de estimación de consecuencias (protección civil, administraciones, etc.) y en algunos casos en la propia estimación de las solicitudes (operadores de otras presas en el sistema, etc.), de manera que éstos se sientan comprometidos e integrados en el proceso.
- Mantener este proceso como un proceso vivo y continuado en el tiempo.
- Identificar las mejores y más justificadas medidas de mitigación de riesgo.

- Proveer o adoptar procedimientos claros para llevar a cabo los análisis de riesgos así como las recomendaciones de tolerabilidad que inspiren la evaluación del riesgo y la toma de decisiones.

Con todo ello en mente, el contenido de la presente Monografía pretende consolidar la información más actualizada sobre las mejores prácticas en análisis, evaluación y gestión de riesgo en seguridad de presas, sin renunciar a la componente didáctica que aporta el hecho de comenzar con un capítulo de *Glosario* así como la intercalación de continuos *ejemplos de aplicación* según avanza el desarrollo del texto, además de los cuatro *Apéndices* de naturaleza eminentemente práctica con los que se completa el documento.

Por último, una lectura ordenada cronológicamente del conjunto de las contribuciones de la Confederación Hidrográfica del Duero [47, 46, 12, 9, 10, 111, 8, 11, 112, 114, 105, 113, 51, 52] puede ayudar a consolidar el conjunto de aspectos conceptuales tratados, a visualizar el proceso completo de implantación de estas herramientas y la utilidad práctica de las mismas, de una forma estructurada y completa, de acuerdo con las mejores prácticas internacionales.

Capítulo 2

Glosario

Riesgo. El *riesgo* es la combinación de tres conceptos: qué puede pasar, cómo de probable es que pase y cuáles son sus consecuencias [80]. En el análisis de riesgos aplicado a seguridad de presas, el *qué puede pasar* se refiere al fallo de la presa (ver definición de modo de fallo). El *cómo de probable es que pase* es la combinación de la probabilidad de que se presenten unas determinadas cargas y la probabilidad condicional de rotura de la presa dadas dichas cargas (ver definición de probabilidad de fallo). Por último, las *consecuencias* son aquellas que se deriven del fallo de la presa, incluyendo entre otras las consecuencias económicas y la pérdida de vidas (ver definición de consecuencias).

Existen diversas formas de representar el riesgo (ver definiciones de gráfico FN y gráfico fN). Sin embargo, en ocasiones resulta práctico reducir a un único número los tres conceptos anteriores, utilizando a tal efecto el producto de la probabilidad de fallo por sus consecuencias¹. Cuando las consecuencias son la pérdida de vidas, este término también es conocido como *pérdida de vidas anualizada* o también *riesgo social*. En contraposición, está el concepto de *riesgo individual*, que es la probabilidad de que al menos una persona pierda su vida y que en ocasiones se supone igual a la probabilidad de rotura de la presa.

Existen varios tipos de riesgo:

Riesgo total. Es el riesgo total de inundación aguas abajo. Está producido por los casos en los que la presa falla y los casos en los que no falla. Conceptualmente se puede entender como:

$$R_T = \sum p(c) \cdot [p(f|c) \cdot C(c, f) + p(nf|c) \cdot C(c, nf)]$$

donde $p(c)$ es la probabilidad de que se presenten unas determinadas cargas o sollicitación, $p(f|c)$ es la probabilidad condicional de rotura dada dicha sollicitación, $C(c, f)$ son las consecuencias en caso de fallo, $p(nf|c)$ es la probabilidad de no fallo y $C(c, nf)$ las consecuencias de no fallo.

¹Más formalmente, la integral extendida a todos los posibles eventos de las consecuencias multiplicadas por su probabilidad de ocurrencia.

Riesgo de fallo. Es la parte del riesgo total que es producida por la rotura de la presa:

$$R_f = \sum p(c) \cdot p(f|c) \cdot C(c, f)$$

Riesgo de no fallo. Engloba las situaciones de inundación aguas abajo en las que no se produce la rotura de la presa:

$$R_{nf} = \sum p(c) \cdot p(nf|c) \cdot C(c, nf)$$

Riesgo incremental. Es la parte del riesgo que es exclusivamente atribuible al fallo de la presa, es decir, descontando de las consecuencias del fallo de la presa aquellas consecuencias que se hubiesen producido incluso si la presa no hubiese fallado:

$$R_{\Delta} = \sum p(c) \cdot p(f|c) \cdot C_{\Delta}(c, f) = \sum p(c) \cdot p(f|c) \cdot [C(c, f) - C(c, nf)]$$

donde $C_{\Delta}(c, f)$ son las consecuencias incrementales.

Probabilidad de fallo. En el contexto del análisis de riesgos de presas, el concepto de *fallo* no se limita exclusivamente a la rotura catastrófica de la presa sino que abarca cualquier suceso que acarree consecuencias negativas. En este sentido, los términos de fallo y rotura se emplean de manera intercambiable en este documento, dándoles el significado más amplio. Conceptualmente, la *probabilidad de fallo* de la presa se puede definir mediante la siguiente ecuación:

$$p(f) = \sum p(c) \cdot p(f|c)$$

Como se puede ver, la probabilidad de fallo tiene dos componentes: la correspondiente a las cargas o *solicitud* ($p(c)$) y la correspondiente a la *respuesta del sistema* ($p(f|c)$).

Una característica de la metodología de Análisis de Riesgo es que no se limita en su planteamiento a un única forma de fallo sino que se estudian todas las posibles maneras en que la presa pueda fallar. Cada una de ellas se conoce como *modo de fallo* (ver definición más abajo). Así, la probabilidad total de fallo es la suma de las probabilidades de cada modo de fallo.

Por otra parte, en el análisis de riesgos en presas la palabra probabilidad se utiliza con dos significados [13], en función del tipo de incertidumbre con la que tratan (ver también definición de incertidumbre más abajo):

Probabilidad objetiva. Frecuencia observada de eventos que ocurren aleatoriamente. Esta probabilidad está relacionada con la incertidumbre aleatoria o natural.

Probabilidad subjetiva. Grado de confianza en un resultado, basado en la información disponible. Esta probabilidad está relacionada con la incertidumbre epistémica.

En realidad es habitual que ambos tipos de incertidumbre se den simultáneamente en la definición de una variable. Un ejemplo de frecuencia observada sería la probabilidad de que se presente una determinada avenida, obtenida a partir de una distribución de probabilidades anuales de excedencia. La probabilidad condicional de rotura de una presa para una determinada situación puede ser un ejemplo donde predomina la incertidumbre subjetiva. Esta probabilidad no es una cualidad intrínseca de la presa sino que está basada en la información disponible y la percepción que sobre ella tienen los ingenieros. Por lo tanto, según vaya aumentando el conocimiento sobre una presa, esta probabilidad irá cambiando.

Por último, la probabilidad de fallo en un análisis de riesgo suele tratarse de una probabilidad *anual*, es decir, es la probabilidad de que en un año cualquiera la presa falle. Normalmente esto se debe a que las solicitudes se tratan de forma anualizada ($p(c)$ tiene unidades de 1/año) y a que el resto de probabilidades que se manejan son adimensionales.

Consecuencias. Existen varios efectos adversos o *consecuencias* que se pueden dar al producirse el fallo de una presa:

Daños a personas. En principio, además de contemplar la pérdida de vidas humanas, los daños a las personas también pueden incluir otros aspectos como el número de heridos de mayor o menor gravedad, pero por su difícil cuantificación los análisis cuantitativos suelen centrarse sólo en el primer aspecto.

Daños económicos directos. Son los ocasionados directamente por el impacto de la inundación y son los más visibles. Incluyen el coste de los daños a la propia presa.

Daños económicos indirectos. Son los que se dan tras el impacto del evento y reflejan la interrupción de la economía y otras actividades en la zona.

Otros daños. Como pueden ser los daños medioambientales, el trastorno social, la pérdida de reputación, la afección al patrimonio histórico o culturales... todos ellos difícilmente cuantificables y por lo tanto tratados habitualmente de forma cualitativa.

Como ya se ha adelantado en la definición de riesgo, en el análisis de riesgo es habitual tratar con *consecuencias incrementales*. Esto quiere decir que si viene una avenida y la presa falla, sólo se imputan al fallo de la presa las consecuencias adicionales debidas al fallo y no aquellas que se hubiesen producido igualmente si la presa no hubiese fallado. A efectos del cálculo de consecuencias esto significa que es necesario calcular las consecuencias en caso de fallo y en caso de no fallo, para después, mediante una resta, obtener las consecuencias incrementales.

El apartado 5.9 trata el tema de las consecuencias con mayor detalle y ofrece un resumen de las metodologías existentes para su estimación.

Escenario de solicitud. 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 o cuando se enfrenta a un sismo y es conveniente realizar dichos cálculos por separado en lo que se conoce como escenarios de solicitación. Los escenarios de solicitación más habituales son [13]:

- Escenario normal
- Escenario hidrológico
- Escenario sísmico
- Otros escenarios

Los escenarios hidrológico y sísmico tratan eventos inusuales (*¿qué pasa cuando se presenta una avenida? ¿qué pasa cuando se presenta un terremoto?*) mientras que el escenario normal (o estático) trata la situación normal, día a día, en la que no hay sismos ni avenidas (*¿qué pasa en un día cualquiera?*). La categoría de *otros escenarios* engloba acciones de sabotaje, vandalismo [44] u otras situaciones que no puedan ser incluidas en los otros tres escenarios. En teoría se podría estudiar también la combinación de varias solicitaciones (por ejemplo sismo y avenida) pero en la práctica, la probabilidad de ocurrencia simultánea suele ser tan pequeña que su riesgo resulta despreciable al compararlo con los demás riesgos.

Modo de fallo. 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 se asocia a un determinado escenario de solicitación y tiene una secuencia lógica, la cual consta de un evento inicial desencadenante, una serie de eventos de desarrollo o propagación y culmina con el fallo de la presa.

Dependiendo del alcance y objetivo del análisis, se puede restringir la definición de modo de fallo a aquellos que impliquen potencialmente la pérdida de vidas humanas o incluir cualquier modo de fallo con potencial para producir un vertido incontrolado de caudales y por tanto con potencial para causar daños de cualquier tipo (económicos, sobre la vida humana, etc.) e incluso cualquier mecanismo que provoque algún tipo de daño (incluso sin necesidad de que se produzca un vertido), por ejemplo uno que origine consecuencias económicas por pérdida de misión. Así mismo, el análisis de los modos de fallo no se ciñe exclusivamente a las estructuras de retención de un embalse, sino que tiene en cuenta cualquier elemento incluido en el sistema presa-embalse.

El procedimiento por el cual se lleva a cabo la identificación y caracterización de modos de fallo se trata con más detenimiento en el apartado 4.2.

Gráfico fN. Un gráfico fN es una forma de representar el riesgo. En él se representa en el eje vertical la probabilidad de rotura (f) y en el horizontal las consecuencias (N). Así, el riesgo sería la dimensión que combina los dos ejes, es decir el riesgo sería menor en la esquina inferior izquierda y crecería en dirección a la

esquina superior derecha. Las líneas diagonales en sentido ortogonal al descrito serían líneas de isorriesgo. Habitualmente, se emplea una escala doble logarítmica.

Una primera manera de emplear estos gráficos es para representar la probabilidad y consecuencia de todos los posibles eventos, o en términos prácticos, de todas las ramas individuales del árbol de eventos (ver definición de árbol de evento más abajo). La figura 2.1 muestra un ejemplo de este tipo de representación, aunque a efectos de evaluación de riesgo, lo habitual no es representar todas las parejas fN por separado sino agregarlas por modos de fallo, por escenarios de sollicitación o por presa (figura 2.2). Para representar esta suma, en el eje vertical se toma la suma de todas las probabilidades y en el eje horizontal la media ponderada de las consecuencias, que se puede obtener fácilmente dividiendo el riesgo anual total por la probabilidad anual total.

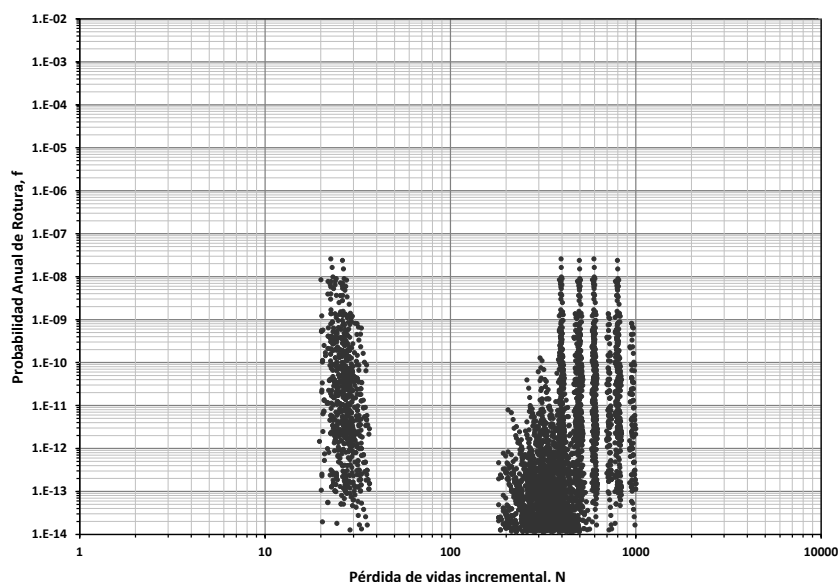


Figura 2.1: Ejemplo de representación de parejas fN.

Gráfico FN. Una de las representaciones más extendidas del riesgo son los gráficos fN, que no son más que la forma acumulada de los gráficos fN. De esta forma, en lugar de puntos discretos se tiene una curva, donde el eje horizontal representa las consecuencias (N) y el eje vertical representa la probabilidad de que se superen dichas consecuencias (F). La figura 2.3 muestra un ejemplo de gráfico FN. Como se puede ver, el gráfico es monótonamente decreciente, lo cual se deriva del hecho de que es un gráfico de probabilidad de excedencia acumulada. También es habitual el uso de escalas dobles logarítmicas.

A pesar de su uso extendido, las curvas FN tienen algunos inconvenientes como que su interpretación es más compleja que los gráficos fN, sobre todo para

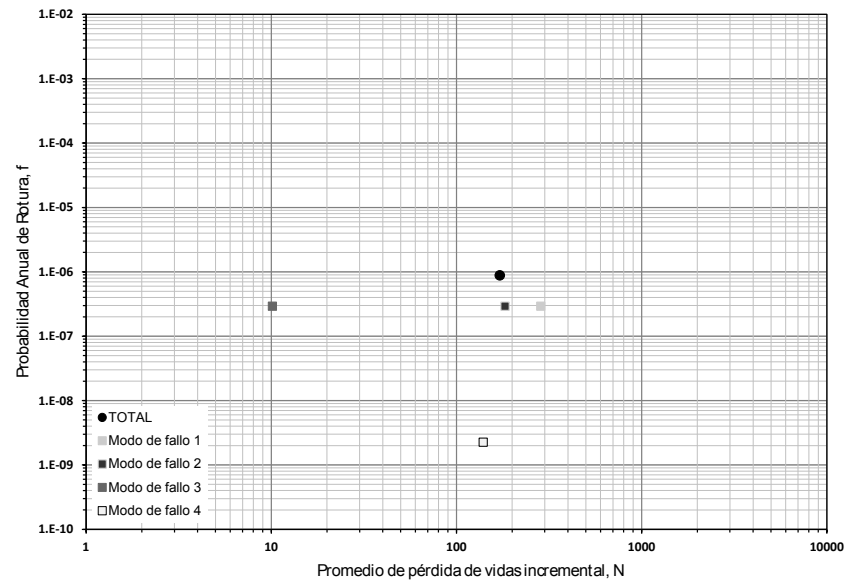


Figura 2.2: Ejemplo de gráfico fn.

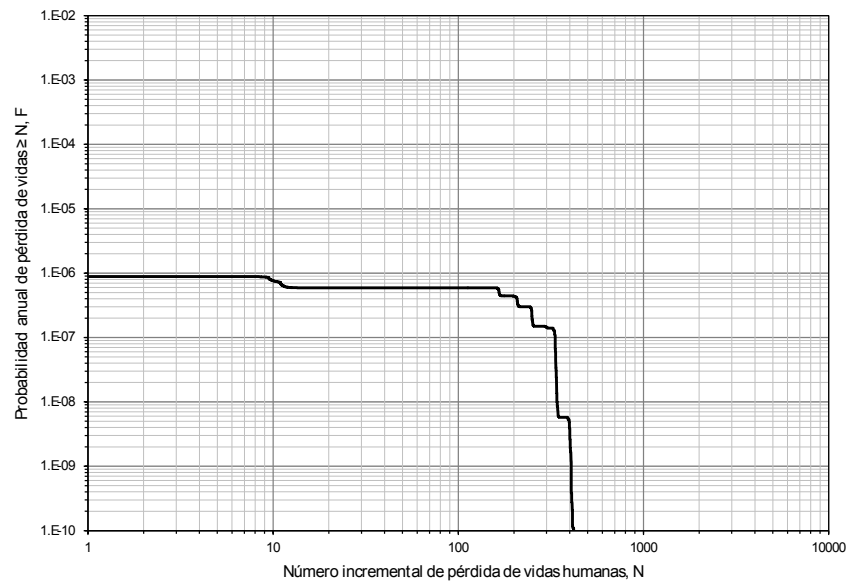


Figura 2.3: Ejemplo de gráfico FN.

gente no acostumbrada a interpretar gráficas FN², o que se ha demostrado que pueden ser una forma inconsistente de fijar recomendaciones de tolerabilidad (ver [53] para la demostración).

Árbol de eventos. Un *árbol de eventos* es una representación de un modelo lógico que incluye todas las posibles cadenas de eventos que se derivan de un evento inicial. Como su propio nombre indica se fundamenta en la estructura matemática conocida como *árbol* y que es ampliamente utilizada en muchos otros ámbitos. La figura 2.4 muestra un ejemplo de árbol junto con la nomenclatura empleada para referirse a sus partes.

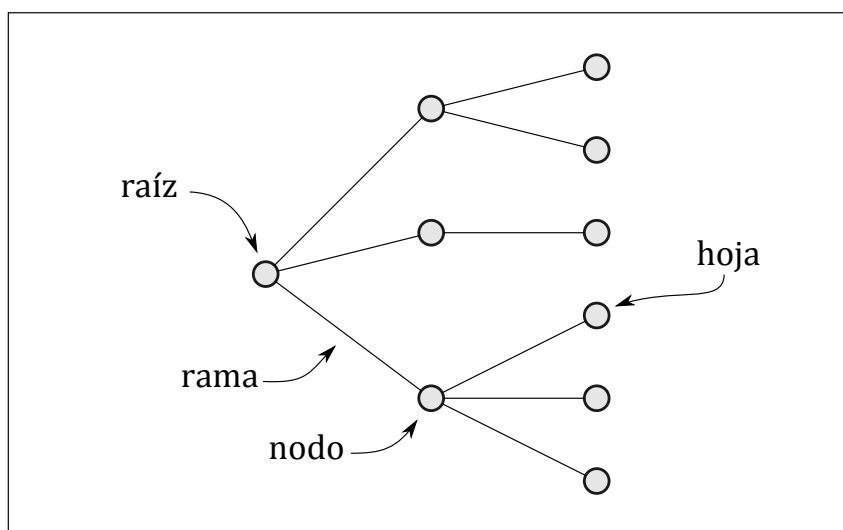


Figura 2.4: Ejemplo de árbol.

Cada nodo del árbol representa un *evento*. El nodo raíz recibe el nombre de *evento inicial*. Las ramas que parten de un evento representan los posibles resultados del evento correspondiente. En general, estas ramas deben representar eventos *mutuamente excluyentes* y *colectivamente exhaustivos*. Por lo tanto, el resultado de un evento siempre se verá reflejado en una y sólo una rama. Así, si a cada rama se le asigna una probabilidad, la suma de las probabilidades de todas las ramas que parten de un nodo cualquiera será 1.

En cuanto al significado de las probabilidades que aparecen en los árboles de eventos, excepto para el evento inicial, éstas son siempre probabilidades condicionales. Es decir asumen que todos los eventos precedentes (nodos padres) ya han ocurrido. Por ejemplo, en la figura 2.5 se muestra un árbol de eventos con dos eventos: estación y momento del día. Como se puede ver, las probabilidades asignadas en el segundo evento (momento) son condicionales a la estación y son por lo tanto distintas en el subárbol correspondiente a verano y en el subárbol correspondiente a invierno.

²Este inconveniente no es despreciable a la hora de transmitir los resultados de riesgo a las personas encargadas de la toma de decisiones.

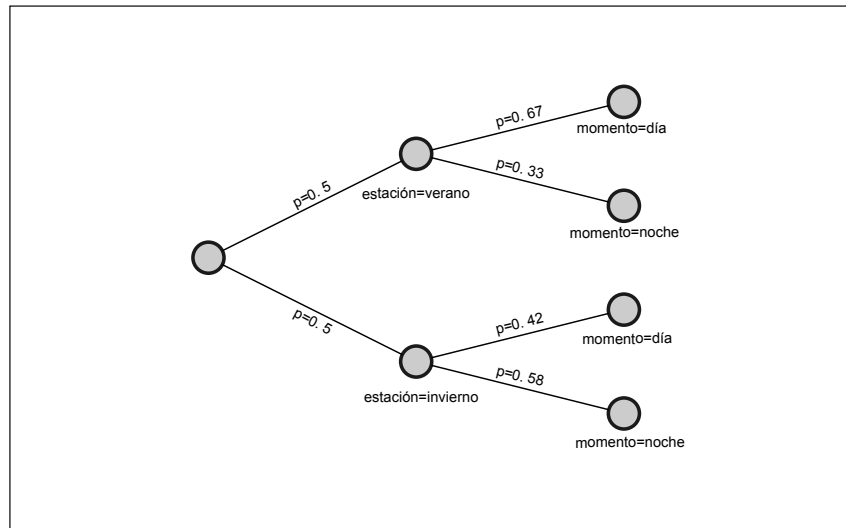


Figura 2.5: Ejemplo de árbol de eventos mostrando los eventos estación (verano/invierno) y momento (día/noche) y sus probabilidades condicionales.

Cada posible camino entre el evento inicial y cada una de las hojas del árbol de eventos representa una de las posibles cadenas de eventos que pueden ocurrir. Cada una de estas cadenas de eventos será única y diferente a las demás y vendrá caracterizada por los resultados de todos los eventos que se han ido produciendo en el árbol (caracterizados por los valores que habrán tomado ciertas variables representativas). Todos estos valores componen por lo tanto una firma o huella dactilar que identifica a cada uno de los caminos y que se conoce como *pedigrí*.

Para calcular la probabilidad de que se produzca una de estas cadenas de eventos se deben multiplicar todas las probabilidades condicionales de las ramas que lo forman. Si se ha seguido la norma de que para cada evento sus ramas sean mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivas, la suma de las probabilidades de todos los posibles caminos será 1. En la figura 2.6 se muestra el cálculo de las probabilidades de todas las posibles cadenas de eventos para el ejemplo mostrado anteriormente. Se comprueba que la suma de todas ellas da 1.

Diagrama de influencia. Los *diagramas de influencia* son una representación conceptual compacta de la lógica de un sistema. En su forma más genérica, un diagrama de influencia es cualquier representación que incluya las relaciones entre posibles eventos, estados del entorno, estados del sistema o subsistemas, y consecuencias.

Un diagrama de influencia ofrece una representación visual de un modelo de riesgo. En él, cada variable del sistema se representa mediante un nodo y cada relación mediante un conector. A partir de un diagrama de influencia, es posible construir el árbol de eventos que después se puede emplear para llevar a cabo el cálculo [119].

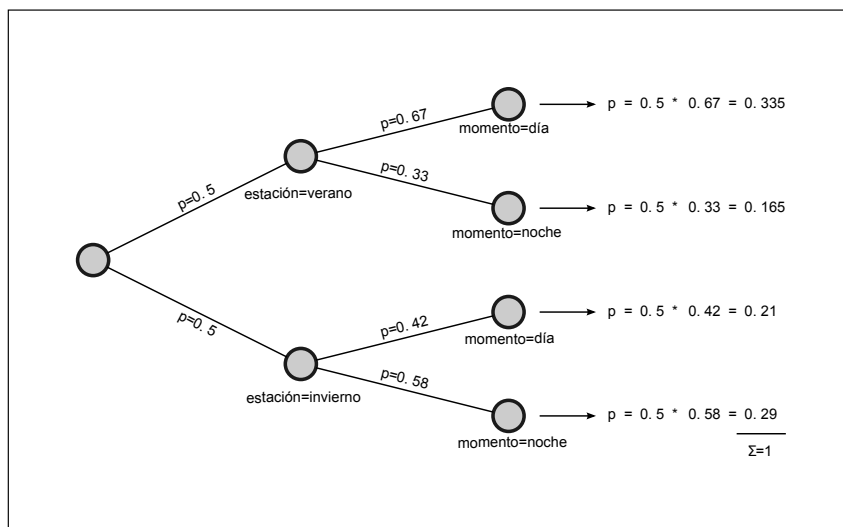


Figura 2.6: Cálculo de las probabilidades de todas las posibles cadenas de eventos para el ejemplo de la figura 2.5.

La figura 2.7 muestra un ejemplo de diagrama de influencia. Atendiendo a la dirección de los conectores, se puede decir que el nivel máximo depende de la avenida y del nivel previo.

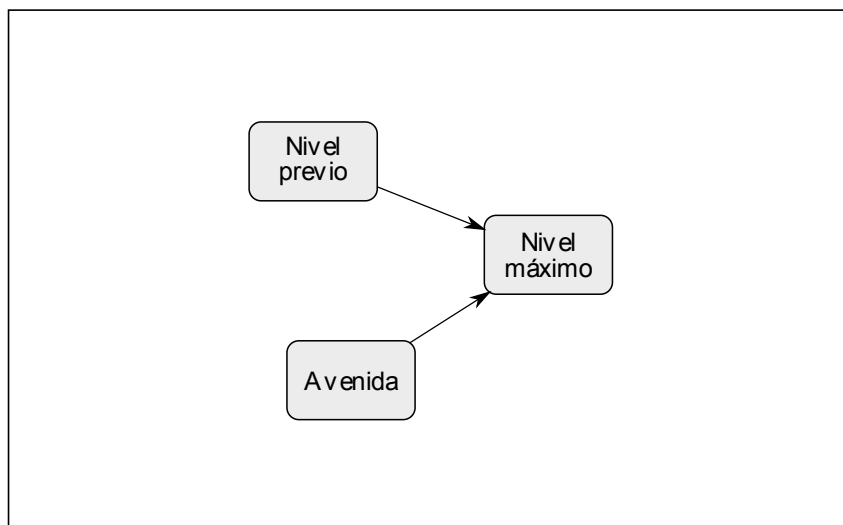


Figura 2.7: Ejemplo de diagrama de influencia.

Por último, la figura 2.8 muestra un ejemplo de las dos representaciones (equivalentes) del mismo modelo, mediante diagrama de influencia y mediante árbol de eventos.

Árbol de fallo. Los árboles de fallo son una herramienta lógica deductiva en la cual se postula un evento superior indeseado, el fallo, y se deducen sistemáticamente todas las posibles maneras en que el fallo puede producirse.

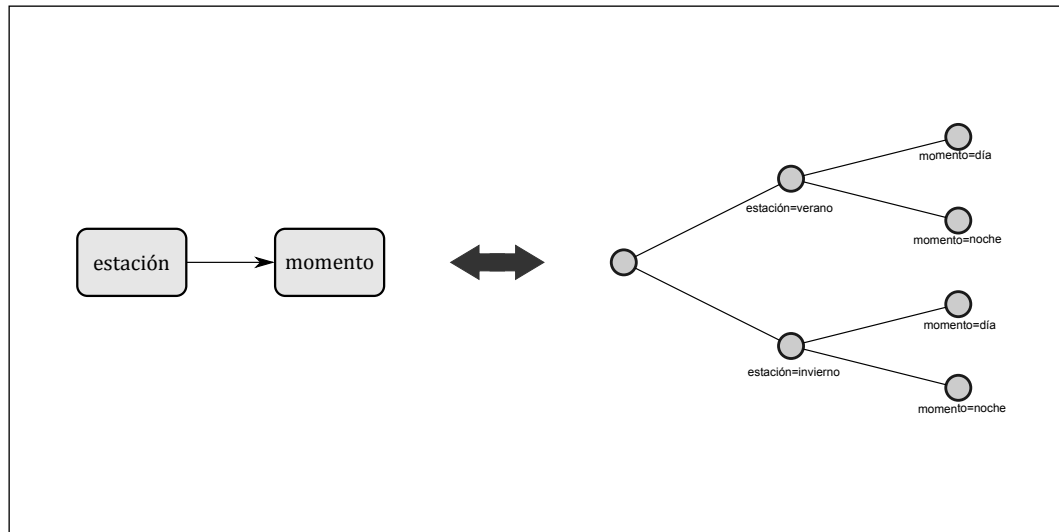


Figura 2.8: Correspondencia entre diagramas de influencia (izquierda) y árboles de eventos (derecha).

El objetivo de un análisis de árboles de fallo (FTA, del inglés *Fault Tree Analysis*) es desarrollar todos los eventos o combinaciones de eventos que pueden hacer que ocurra un fallo. Los eventos del árbol pueden ser de cualquier tipo: fallos mecánicos, fallos humanos, condiciones externas, etc. El fallo o evento indeseado que se analiza se llama evento superior (*top event*)³ y se dibuja en la parte superior del diagrama. Debajo de él se dibujan los eventos que pueden hacer que el evento superior ocurra y así sucesivamente de forma recursiva hasta llegar al nivel inferior del árbol en el que se dibujan los eventos base (*basic events*), que son aquellos que no necesitan ser desarrollados más allá. La figura 2.9 muestra un ejemplo de árbol de fallo (la simbología empleada en los árboles de fallo se explica en el apéndice A).

Un árbol de fallo no es una representación de un sistema físico sino de cómo se puede producir un fallo. Por ejemplo, en el árbol de fallo de una compuerta no tienen por qué aparecer todas las piezas de la compuerta sino todos los eventos que pueden contribuir a que la compuerta deje de funcionar. Además, como todo modelo, los árboles de fallo nunca pueden aspirar a ser completamente exhaustivos.

Cada nodo de un árbol de fallo representa un evento binario (que puede ocurrir o no). Por ejemplo la compuerta funciona o no funciona, hay suministro eléctrico o no lo hay, se rompe un pistón o no se rompe, etc. Los eventos se relacionan entre sí mediante puertas lógicas (puertas AND, puertas OR, etc.). El apéndice A contiene una explicación de los distintos tipos de nodos y puertas de un árbol de fallo.

³Se aportan los términos en inglés, ya que son los términos que suelen manejarse en los programas informáticos y documentación disponibles.

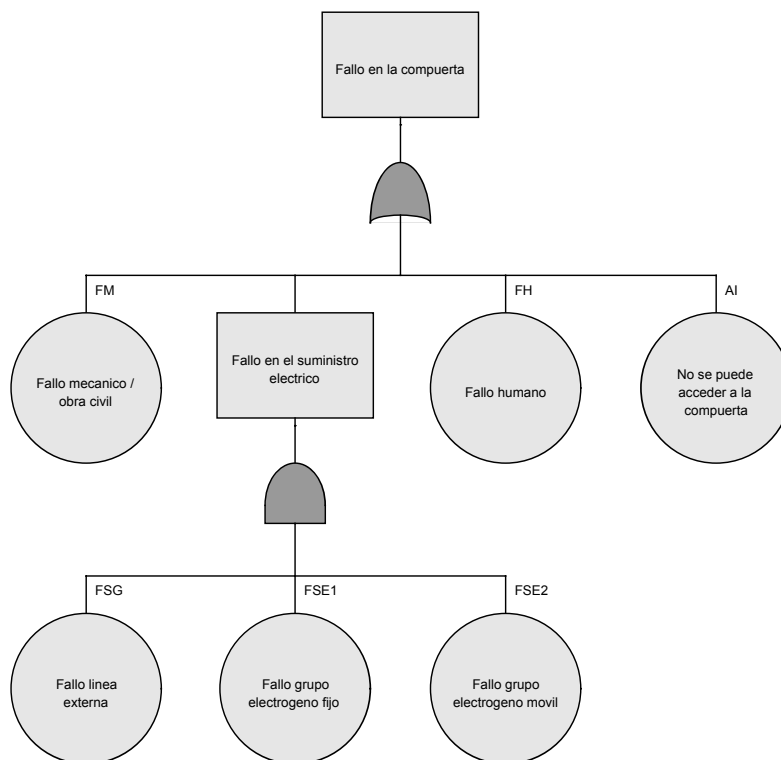


Figura 2.9: Ejemplo de árbol de fallo.

Un árbol de fallo se puede emplear como herramienta cualitativa para analizar la lógica de un sistema. No es necesario asignar ningún tipo de número al diagrama para que éste sea útil. Sin embargo una vez se ha desarrollado el árbol de fallo, es posible obtener la probabilidad de ocurrencia del evento superior asignando probabilidades de ocurrencia a cada uno de los eventos base. Una vez estas estimaciones se han asignado, el cálculo de la probabilidad del evento superior es una cuestión algebraica que los programas informáticos de hoy en día han automatizado.

Por último, no se debe confundir un árbol de fallo con un árbol de eventos. El árbol de eventos representa una manera de razonar inductiva (de lo específico a lo general). Se parte de un suceso de inicio y se va avanzando paso a paso, explorando todas las posibilidades hasta que se llega al fallo. En contraposición, los árboles de fallo representan una forma de razonar deductiva (de lo general a lo específico). Se parte de un fallo del sistema y se exploran todas las posibles causas que pueden haberlo producido. Por lo tanto, se podría decir que la principal diferencia entre ambos métodos es la dirección del análisis. En la práctica se usa una combinación de los dos métodos. Para representar el modelo global de riesgo de una presa se emplea un árbol de eventos y para estimar algunas de las probabilidades de dicho árbol (por ejemplo, la fiabilidad de compuertas), se pueden utilizar árboles de fallo.

Evaluación de riesgo. La Evaluación de Riesgo es el proceso por el cual se evalúa

la importancia del riesgo asociado a la rotura de una presa. La fase de evaluación de riesgo es el punto en el que los juicios y valores se introducen en el proceso de decisión (implícita o explícitamente) al incluir la consideración de la importancia de los riesgos estimados [34].

Para servir como base a la evaluación de riesgo, el HSE (*Health & Safety Executive*) [69] estableció los conceptos de riesgo inaceptable, tolerable y ampliamente aceptable, conceptos en los que se basan en gran medida la mayoría de las recomendaciones de tolerabilidad internacionales.

- Un riesgo inaceptable (del inglés *unacceptable risk*) es aquel que la sociedad no puede aceptar, independientemente de los beneficios que pueda reportar.
- Riesgo tolerable (del inglés *tolerable risk*) es aquel con el que la sociedad está dispuesta a convivir obteniendo a cambio ciertos beneficios como contrapartida. Es un riesgo que no se considera despreciable y que por lo tanto no se puede ignorar, que es adecuadamente gestionado y vigilado por el propietario y que es reducido si ello es factible.
- Riesgo ampliamente aceptable (del inglés *broadly acceptable risk*) es aquel que en general puede ser considerado como insignificante y adecuadamente controlado. Sin embargo, los riesgos asociados a las presas, debido al gran potencial de consecuencias que suelen tener, no suelen poder ser clasificados en esta categoría.

Los tres conceptos se ilustran en la figura 2.10.

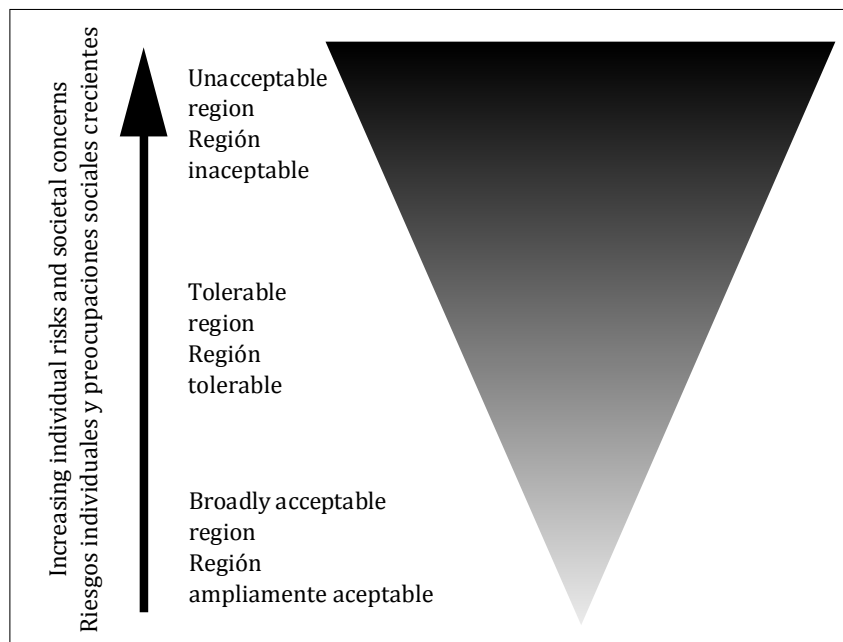


Figura 2.10: Marco de referencia del HSE para la tolerabilidad del riesgo (traducido de [69]).

Relacionado con el concepto de riesgo tolerable está el criterio ALARP (del inglés *As Low As Reasonably Practicable*) que en español significa *tan bajo como sea razonablemente práctico*. Significa que para que un riesgo se pueda considerar tolerable, se deben aplicar aquellas medidas de reducción de riesgo siempre que sus costes no sean desproporcionadamente grandes respecto de los riesgos que reducen.

Otros dos conceptos centrales en la evaluación de riesgo son los de *equidad* y *eficiencia*. Equidad es el derecho que tienen todos los ciudadanos a ser tratados de manera justa, sin discriminación a favor o en contra de ninguno de ellos. En este contexto, esto se traduce en que ningún ciudadano debe estar sometido a riesgos excesivamente altos. El concepto de eficiencia se refiere a la necesidad de emplear los recursos limitados para reducir los riesgos lo más posible. Dicho de otro modo, la equidad está relacionada con el *riesgo individual* mientras que la eficiencia trata de minimizar el *riesgo social* o colectivo.

Sin embargo, de forma inherente, existe un conflicto entre equidad y eficiencia, ya que las medidas más efectivas para reducir el riesgo individual pueden no ser las más eficientes para reducir el riesgo total sobre el conjunto de la población. Existe por lo tanto un compromiso para obtener el equilibrio adecuado en la toma de decisiones entre equidad y eficiencia.

Todos estos conceptos son los que han servido de base para que distintos organismos internacionales formulen recomendaciones sobre tolerabilidad de riesgo. El capítulo 6 trata las más relevantes.

Incertidumbre. El proceso del análisis de riesgos incorpora una serie de incertidumbres que afectan de forma muy importante a la comprensión e interpretación de los resultados de probabilidad obtenidos. El término incertidumbre engloba principalmente dos conceptos de naturaleza distinta: variabilidad natural e incertidumbre epistémica, como se observa en la figura 2.11.

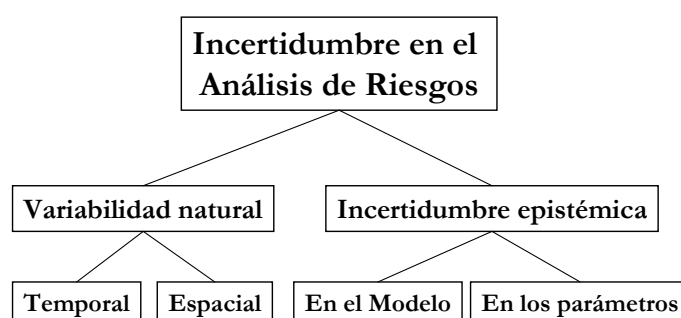


Figura 2.11: Taxonomía de la incertidumbre en el Análisis de Riesgos (adaptado de [68]).

Se entiende por variabilidad natural a la aleatoriedad inherente a los procesos naturales, que se manifiesta como la variabilidad a lo largo del tiempo de fenómenos que tienen lugar en un punto concreto del espacio (variabilidad temporal) o como la variabilidad a lo largo del espacio de fenómenos que

tienen lugar en distintos puntos pero de forma simultánea (variabilidad espacial). Un ejemplo clásico de variabilidad temporal lo constituye la magnitud de la avenida de un río en una sección concreta o la intensidad de un evento sísmico en un emplazamiento. La variabilidad natural se trata mediante modelos matemáticos que se ajustan de forma que puedan reproducir, de manera más o menos aproximada, el fenómeno analizado. Cuantos más datos se disponga, mejor será el ajuste realizado, pero la variabilidad inherente al fenómeno no se puede reducir.

La incertidumbre epistémica es la derivada de la falta de conocimiento, bien sea por escasez o por ausencia total de datos, o por ignorancia en la capacidad de comprensión de los mecanismos que operan sobre un determinado fenómeno. Esta incertidumbre se puede reducir mediante la recopilación de más información, más datos y mediante ampliación del conocimiento. Por el contrario, esta incertidumbre es muy difícil de cuantificar. La incertidumbre epistémica se puede dividir en dos categorías: incertidumbre en el modelo e incertidumbre en los parámetros. La incertidumbre en el modelo se refiere a la ignorancia sobre la medida en la que un modelo reproduce fielmente la realidad. Refleja la incapacidad de representar la realidad o de identificar el mejor modelo. La incertidumbre en los parámetros se deriva de la limitada capacidad para estimar de forma adecuada los mismos a partir de un número limitado de datos procedentes de ensayos o de calibración, y de las limitaciones inherentes a las técnicas estadísticas empleadas en su estimación.

En la práctica, se suele modelar parte de la incertidumbre epistémica como si fuera variabilidad natural. Un caso típico son los parámetros geotécnicos o de los materiales. Se modelan como si presentaran variabilidad natural (se tratan como variables aleatorias) cuando en realidad podrían ser conocidos empleando los suficientes recursos para ello (tiempo y recursos económicos).

Análisis de cribado. El análisis de cribado (también conocido como *screening*), consiste en un análisis semi-cuantitativo basado en los principios de riesgo. El análisis de cribado se suele aplicar a grupos de presas. En él, habitualmente en lugar de estimar cada una de las probabilidades que intervienen en la ecuación de riesgo se estiman índices a partir de la información existente, obteniendo finalmente un índice de riesgo para cada una de las presas estudiadas. Esta metodología es útil para ordenar inicialmente las presas según su importancia en cuanto a seguridad y poder así focalizar los esfuerzos posteriores. Existen varios casos documentados del uso de estas técnicas tanto en España [47, 38, 64, 62] como internacionalmente [29].

Capítulo 3

La gestión de la seguridad basada en riesgo

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 diseñar medidas que aumenten la seguridad de la población en caso de rotura de presa.

Actualmente, gracias al Análisis de Riesgo, se cuenta con una herramienta que permite 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 solicitudes (hidrológicas, sísmicas o cualquier otra) hasta las consecuencias, pasando por la respuesta del sistema. Este modelo de riesgo se nutre de la información que proporcionan los distintos documentos de seguridad de la presa y que se encuentran en su Archivo Técnico. Algunos de los documentos más relevantes son 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 una de estas cuestiones tiene.

Además, la comparación con recomendaciones internacionales de tolerabilidad de riesgo permite contextualizar el estado actual de la presa (ver capítulo 6). Este proceso se denomina *Evaluación de Riesgo*. 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 eficacia y 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.

La figura 3.1 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.

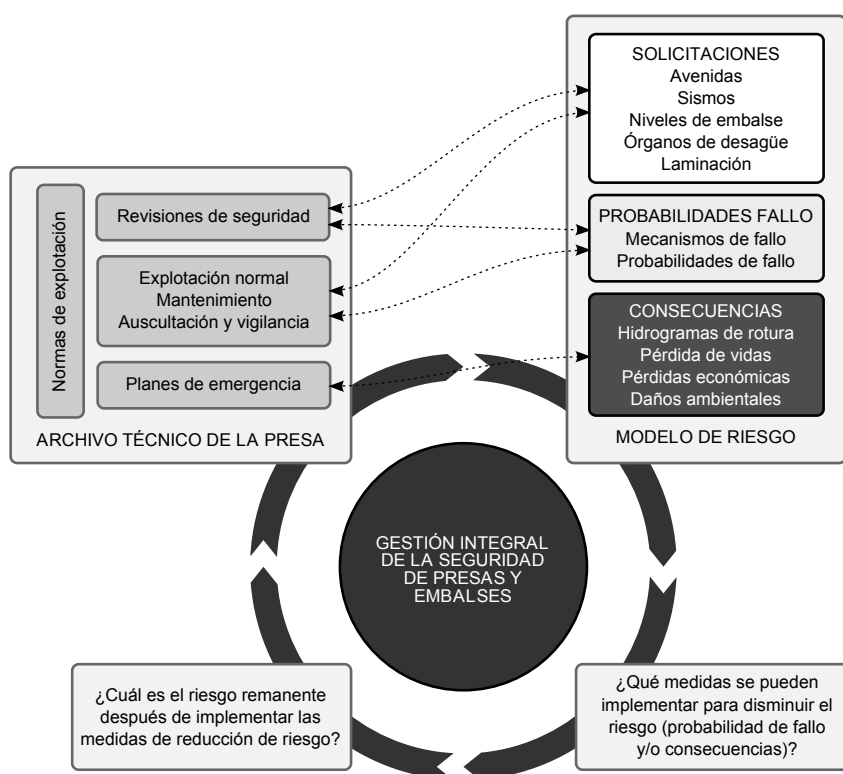


Figura 3.1: Gestión integral de la seguridad de presas y embalses y vínculos entre el modelo de riesgo y los documentos del Archivo Técnico (adaptado de [118]).

Como se puede ver, el modelo de riesgo está dividido en tres áreas: las solicitudes, las probabilidades de fallo (también conocidas como 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.

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, una revisión de seguridad de una presa se puede beneficiar de los resultados que se extraigan de un 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.

Capítulo 4

El proceso del análisis de riesgo

4.1. Los pasos de un análisis de riesgo

El presente apartado expone los pasos de los que consta un Análisis de Riesgo. Para ello se apoya en el esquema mostrado en la figura 4.1.

El primer paso en un Análisis de Riesgo consiste como en cualquier otro tipo de estudio en determinar su alcance, objetivos y plazos. No siempre es recomendable realizar un análisis de riesgo con el máximo nivel de detalle. En ocasiones, un proceso iterativo en el que la primera vez que se analiza el riesgo de una presa o de un grupo de presas se hace con un menor grado de detalle puede ser más eficiente al identificar aquellas presas y/o aspectos que deben ser estudiados con mayor detalle. El capítulo 5 contiene algunas recomendaciones acerca del nivel de detalle en cada una de las partes de un análisis de riesgo. En esta fase previa también se debe conformar el equipo de profesionales que formará parte del análisis y que deberá incluir al gestor de la presa. También es muy positiva la posibilidad de contar con algún revisor externo.

El proceso de revisión del Archivo Técnico es especialmente relevante en un Análisis de Riesgo. No se trata únicamente de recopilar la información, sino que dicha información es discutida en una o varias sesiones de grupo. En este punto del análisis es posible que se identifiquen necesidades de estudios adicionales. La puesta en valor, estructuración y revisión de la información del Archivo Técnico es en sí mismo uno de los beneficios inmediatos de realizar un Análisis de Riesgo.

Una vez todo el grupo ha tenido la ocasión de consultar la información de la presa, se debe realizar una inspección de la presa, para comprobar su estado actual e identificar posibles problemas en ella. Esta visita de campo se remata con una discusión en grupo sobre el estado actual de la presa.

La identificación de modos de fallo es un proceso que se realiza en grupo y que trata de identificar, describir y estructurar todas las posibles formas en que la presa puede fallar, sin restringirse a una lista predeterminada de comprobaciones (ver apartado 4.2).



Figura 4.1: Esquema del proceso de Análisis de Riesgo.

Los siguientes puntos del análisis de riesgo (arquitectura del modelo, análisis de las cargas, probabilidades de fallo y consecuencias y cálculo de riesgo) consisten en la elaboración de un *modelo de riesgo* cuantitativo y se tratan en el capítulo 5.

Como ya se ha expuesto al explicar el esquema general de la gestión de la seguridad basada en riesgo, la Evaluación de Riesgo consiste en responder a la pregunta de si los riesgos existentes son tolerables. El capítulo 6 discute las recomendaciones existentes en el panorama internacional.

El proceso de análisis de riesgo debe aplicarse sobre el estado actual de la presa, pero también sobre el estado futuro de la presa tras la posible aplicación de las medidas de reducción de riesgo que se estimen oportunas, para así poder evaluar su eficacia y eficiencia. Además es un proceso que se debe actualizar y revisar en el tiempo al ir cambiando las condiciones de la presa.

4.2. La identificación y caracterización de modos de fallo

Dentro del proceso global del análisis de riesgo, la identificación de modos de fallo es el paso previo a la realización del modelo de riesgo (ver figura 4.1). Es un paso muy importante ya que si un modo de fallo relevante no es capturado en las sesiones de identificación de modos de fallo, el modelo de riesgo no lo capturaría y el riesgo calculado podría estar muy alejado del real. Dicho de otra manera, la identificación de modos de fallo establece el alcance y la robustez del modelo de riesgo.

La identificación de modos de fallo es central al enfoque basado en riesgo. No es de extrañar por lo tanto que se venga utilizando desde hace tiempo. En los años 60 la industria aeroespacial, que ha sido pionera junto con la industria nuclear en la aplicación de metodologías basadas en riesgo, desarrolló un proceso sistemático conocido con el nombre de FMEA (Failure Modes and Effects Analysis).

El FMEA consta de varios pasos. En primer lugar se hace una lista de todos los componentes del sistema y su función. Se identifican todos los posibles peligros (*hazards* en inglés) y todas las posibles maneras en que alguno de los elementos del sistema puede dejar de funcionar correctamente y los efectos que ello tendría. Se analizan primero los efectos locales (sobre el propio elemento) y después progresivamente se llega a ver el efecto sobre el sistema completo. En primera instancia se estudian todos los modos de fallo sin atender a su probabilidad de ocurrencia. Existen tablas y planillas para guiar el proceso.

Posteriormente el FMEA se extendió y recibió el nombre de FMECA (Failure Modes Effects and Criticality Analysis). En el FMECA, además de los pasos del FMEA, se añade uno último en el que los modos de fallo se gradúan cualitativamente en función su probabilidad de ocurrencia. Esto es de aplicación limitada en los análisis de riesgo cuantitativos como los que se describen en este documento porque la probabilidad de ocurrencia se obtendrá de forma más rigurosa al aplicar el proceso completo.

Para obtener información sobre el FMEA y el FMECA, se puede consultar por ejemplo [13, 31, 138, 74, 128]. En la actualidad, estas metodologías se siguen empleando en multitud de industrias [106].

Aunque estas metodologías han sido aplicadas a la evaluación de la seguridad de presas, han surgido también metodologías específicas. Entre éstas destaca la aplicada en Estados Unidos por la FERC (Federal Energy Regulatory Commission). La metodología se expone en el capítulo 14 (*Dam safety performance monitoring program*) del documento “*Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects*” [56] y se resume a continuación.

La Agencia Federal Reguladora de Energía Norteamericana, que se encarga de reglamentar, normalizar y regular la distribución energética en los Estados Unidos, plantea en este documento una técnica para desarrollar un programa de auscultación y comportamiento de presas (*Dam Safety Performance Monitoring Program*) que han aplicado en sus centrales hidroeléctricas. Dicha metodología propone procedimientos para evaluar la seguridad de la presa y su funcionamiento basándose en el análisis de modos de fallo.

FERC respalda esta metodología argumentando que la integración entre el análisis de modos de fallo vinculado a los planes de auscultación y vigilancia, y la redacción del informe técnico, da lugar a un programa de seguridad de presas más eficiente. Los pasos fundamentales que conforman el *Dam Safety Performance Monitoring Program* son:

- Formación de un grupo de trabajo para realizar el análisis de modos de fallo.
- Recopilación de la documentación y los datos de la presa para que sean revisados por el grupo de trabajo formado.
- Entrevista con el personal que más conoce la presa: encargados, vigilantes, y a ser posible, con los que hayan participado en la construcción de la misma.
- Revisión exhaustiva y comprensión integral de la documentación disponible de la presa.
- Realización de la sesión de identificación de modos de fallo y asignación a cada uno de ellos una valoración cualitativa, según la siguiente gradación:

Grado I: Modos de fallo que claramente se consideren factibles al existir alguna condición o estado sintomático detectado, resultar la serie de eventos probables e implicar consecuencias potenciales importantes.

Grado II: Modos de rotura considerados igualmente factibles, aunque con menores posibilidades de ocurrir o consecuencias reducidas.

Grado III: Modos de fallo para los que la información disponible resulta, a todas luces, insuficiente aunque se estiman factibles y con consecuencias potenciales de magnitud elevada. Requieren una campaña de investigación urgente.

Grado IV: Modos de rotura descartados y cuya aparición no se considera razonable.

- Consideración de las necesidades de vigilancia y auscultación, y las medidas reductoras de riesgo para los modos de fallo identificados.
- Elaboración de un documento que englobe la totalidad del trabajo realizado.

Todos estos pasos se realizan con la ayuda de un ingeniero que hace el papel de facilitador o guía del grupo de trabajo durante todo el proceso.

En España esta metodología ha sido adaptada, extendida y aplicada para realizar un análisis de riesgo cuantitativo [60]. Otros ejemplos de realizaciones de identificación de modos de fallo españoles son los realizados en la Agencia Catalana del Agua [15], Iberdrola [45] o la Confederación Hidrográfica del Duero [114, 9, 11]. Por otro lado, también se han desarrollado herramientas más específicas que ayudan a estructurar las sesiones de trabajo y aportan cuadernillos y tablas de apoyo [61]. Las ventajas que ofrecen estas últimas herramientas son:

- Sirven de guía para las sesiones de identificación de modos de fallo.
- Ofrecen una colección de modos de fallo para presas de hormigón y de materiales sueltos que:
 - ayuda a identificar modos de fallo típicos para que nunca sean pasados por alto,
 - ayuda a estructurar las definiciones para que sean coherentes, consistentes, auditables y más fácilmente cuantificables y
 - ayuda a vincular los modos de fallo con la auscultación de la presa.

Capítulo 5

El modelo de riesgo

5.1. Introducción

Este capítulo trata sobre la confección del modelo de riesgo, que se corresponde con la parte del esquema de los pasos del análisis de riesgo que se resalta en la figura 5.1.

En primer lugar se presenta una serie de arquitecturas genéricas de modelos de riesgo para los distintos escenarios de sollicitación. A continuación, se dedica un apartado para cada una de las entradas al modelo de riesgo. Finalmente, se dedica un apartado al cálculo del modelo de riesgo y otro a dar unas recomendaciones sobre el nivel de detalle a emplear en cada uno de los cálculos.

Cada uno de los apartados se remata con un ejemplo. El ejemplo no se corresponde con ningún caso real y su objetivo es puramente demostrativo.

5.2. Arquitectura del modelo de riesgo

5.2.1. Planteamiento

El primer paso para la confección de un modelo de riesgo es definir su arquitectura. Al definir la arquitectura se decide qué variables se van a incluir en el modelo y cuáles van a ser sus relaciones. Además, en función de los modos de fallo que se hayan planteado durante la identificación y caracterización de modos de fallo, será necesario realizar un modelo de riesgo para cada uno de los escenarios de sollicitación que se vayan a estudiar. En este apartado se presentan tres arquitecturas genéricas para los escenarios normal, hidrológico y sísmico. Los modelos de riesgo se representan mediante diagramas de influencia (ver definición en capítulo 2).

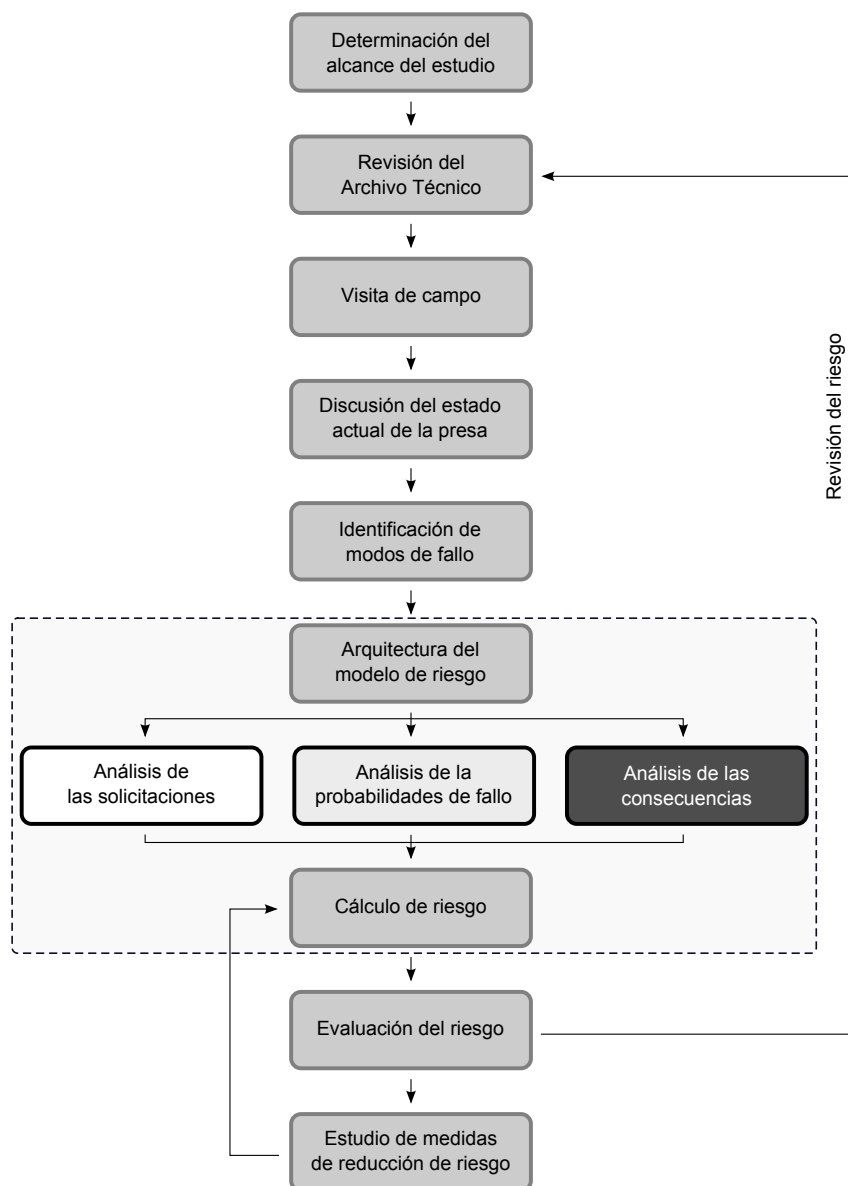


Figura 5.1: Esquema del proceso de Análisis de Riesgo, resaltando los procesos específicos de la arquitectura y cálculo de modelo de riesgo.

5.2.2. Escenario normal

En este apartado se expone la anatomía de un modelo de riesgo estándar para el escenario normal, con el objetivo de introducir los trabajos que será necesario completar y que son discutidos en los siguientes apartados.

Los trabajos a realizar se han dividido en tres grupos que se corresponden con los tres términos de la ecuación del riesgo:

- Trabajos correspondientes a la modelización de las solicitudes.
- Trabajos correspondientes a la modelización de la respuesta del sistema.
- Trabajos correspondientes a la modelización de las consecuencias.

Para identificarlos, en la figura 5.2 se ha utilizado el mismo código de colores (blanco, gris claro y gris oscuro) que en el esquema general del análisis de riesgo (figura 5.1).¹

El primer nodo del diagrama se corresponde con la solicitud, que está representada por el nivel del embalse. La información de partida suele ser la curva de probabilidad de excedencia del nivel de 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 analizar alguna posible situación futura (por ejemplo, una restricción de niveles de explotación) se puede recurrir a la simulación. Estos temas se tratan con más detalle en el apartado 5.4.

Los siguientes nodos, en color gris claro, contienen la información de los modos de fallo. El diagrama tendrá una rama por cada modo de fallo que se quiera incluir. La probabilidad de fallo de cada modo de fallo se podrá modelar en el diagrama mediante uno o más nodos. El apartado 5.7 trata el cómo asignar probabilidades a cada uno de los pasos de un modo de fallo. El objetivo es obtener una curva que relacione nivel de embalse con probabilidad anual de rotura.

Cada modo de fallo es seguido por un nodo en el que se estima el hidrograma de rotura. Para ello es necesario estudiar la forma de rotura, que puede ser distinta para cada modo de fallo, y obtener los hidrogramas de rotura. De cara al árbol de eventos, es habitual caracterizar el hidrograma de rotura por alguna variable significativa (normalmente el caudal pico), con lo que en estos nodos simplemente se debe obtener una curva que relacione nivel de embalse con dicha variable. En cualquier caso siempre será necesario contar con una serie de hidrogramas completos de rotura para poder posteriormente realizar las simulaciones de inundación en el siguiente punto. El apartado 5.8 discute los métodos existentes para realizar estos estudios.

¹En la figura 5.2 se ha incluido un listado de los trabajos a realizar para los tres escenarios (normal, hidrológico y sísmico) y ya sobre el propio diagrama de influencia se indica cuáles de ellos son necesarios para el escenario normal.

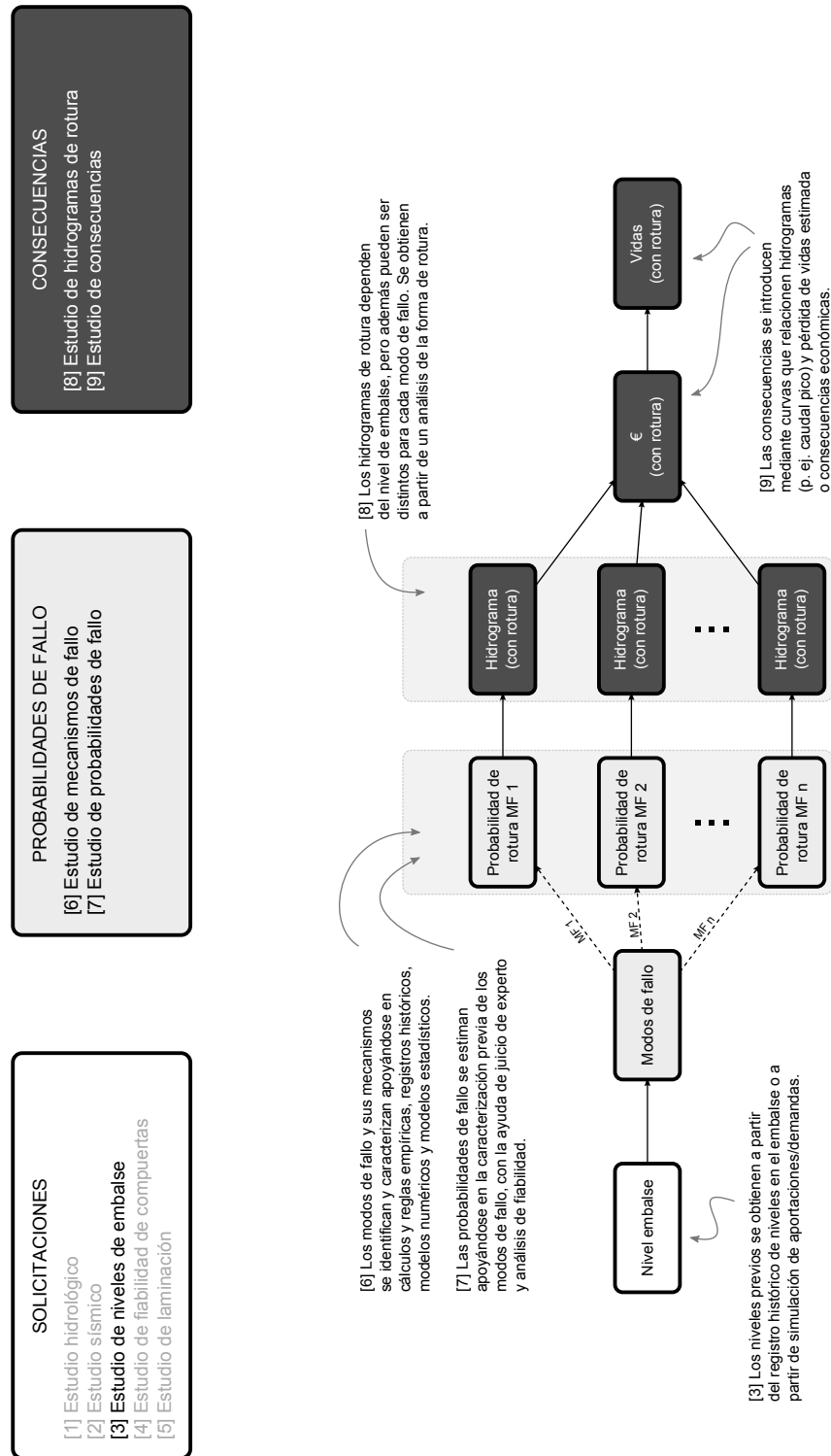


Figura 5.2: Diagrama de influencia de un modelo de riesgo estándar para el escenario normal mostrando los trabajos a realizar para caracterizar cada una de las variables.

Por último, están los nodos dedicados a la estimación de consecuencias propiamente dicha. En ellos se deben introducir relaciones entre consecuencias e hidrogramas de rotura. En el escenario normal, las consecuencias en caso de no rotura son en principio nulas, por lo que no es necesario evaluarlas para obtener las consecuencias incrementales. El caso mostrado en la figura 5.2 es el más simple posible, pero se podría afinar más el cálculo si se disgregan las consecuencias en función de otras variables como podría ser el momento del día, de la semana o del año o también el tiempo de aviso o el modo de fallo. El apartado 5.9 discute los distintos tipos de consecuencias que se pueden dar y las metodologías existentes para estimarlas.

La figura 5.3 muestra de forma resumida los datos que son necesarios como mínimo para alimentar un árbol de eventos en escenario normal. Por supuesto, si se tienen en cuenta otros factores (estacionalidad, día/noche, mayor desagregación de los modos de fallo, etc.) sería necesario incorporar más relaciones que las mostradas en la figura.

5.2.3. Escenario hidrológico

El presente apartado resume los estudios necesarios para realizar un modelo de riesgo estándar en escenario hidrológico (figura 5.4).

El primer nodo introduce la avenida entrante al embalse. Será necesario realizar un estudio hidrológico probabilístico, que obtenga la probabilidad anual de excedencia de las posibles avenidas. Aunque la figura no lo muestra, es posible incorporar estudios hidrológicos estacionales. El apartado 5.3 trata los estudios hidrológicos.

El siguiente nodo (nivel previo) es muy parecido al nodo de nivel de embalse del escenario normal. La diferencia conceptual entre este nivel previo y el nivel de embalse del escenario normal es que aquel representa el nivel de embalse en un día cualquiera del año y este representa el nivel de embalse en el momento anterior a la llegada de la avenida más grande del año. Por lo tanto, los comentarios del apartado 5.4 son enteramente de aplicación aquí también. De manera simplificada, es posible en algún caso no incorporar esta variable suponiendo que la presa se encuentra siempre a su Nivel Máximo Normal (NMN). Esto está del lado de la seguridad, es decir, ofrecerá probabilidades de rotura mayores. En climas secos con avenidas severas (como en el caso del clima mediterráneo) donde es habitual que las presas se encuentren muy por debajo de su NMN, esta simplificación puede ser excesivamente alejada de la realidad y ofrecer resultados demasiado conservadores y que por lo tanto no serían comparables con resultados de otras presas obtenidos considerando la fluctuación real de niveles.

La fiabilidad de los órganos de desagüe es la probabilidad de que cuando venga una avenida se pueda o no utilizar un determinado órgano de desagüe. Este es un aspecto que es muy difícil de incluir en un cálculo de seguridad tradicional basado en coeficientes de seguridad pero que encaja de forma natural en el enfoque basado en riesgo. El apartado 5.5 discute las distintas razones por las cuáles puede no funcionar un órgano de desagüe y se explica cómo a partir de registros de operaciones,

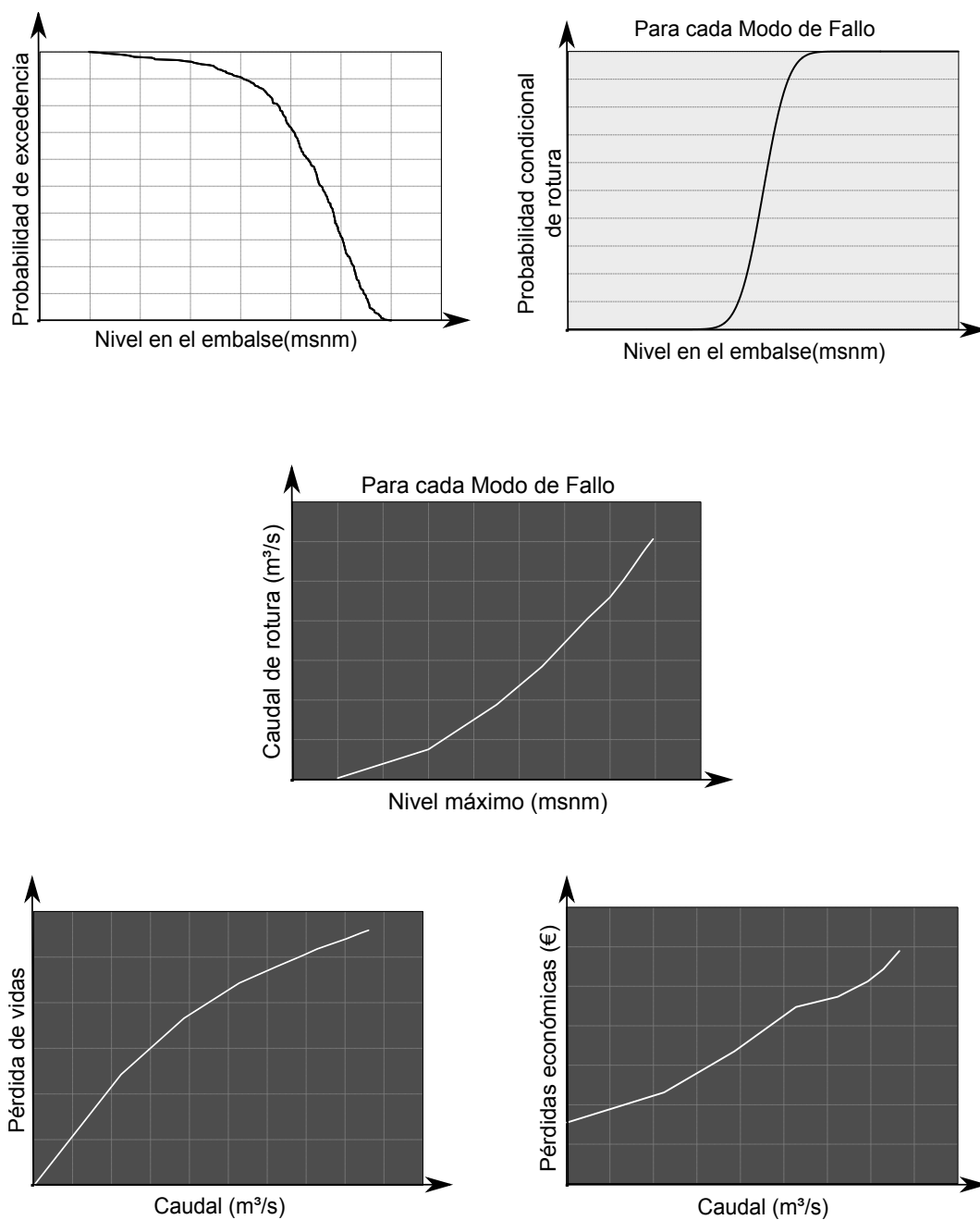


Figura 5.3: Resumen de las relaciones básicas para alimentar un modelo de riesgo de escenario normal.

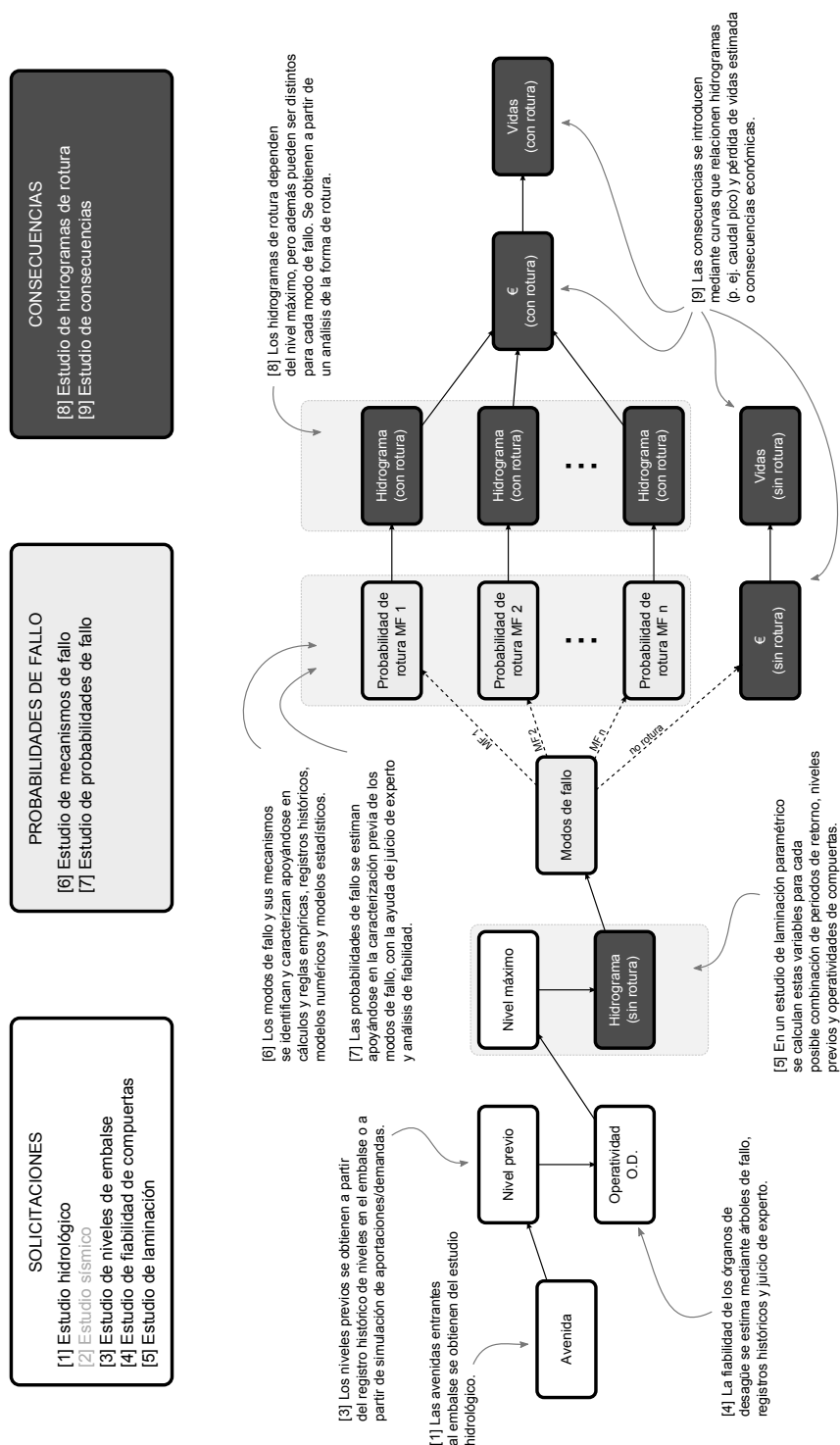


Figura 5.4: Diagrama de influencia de un modelo de riesgo estándar para el escenario hidrológico mostrando los trabajos a realizar para caracterizar cada una de las variables.

juicio de experto y árboles de fallo es posible realizar estas estimaciones.

Los siguientes dos nodos (nivel máximo e hidrograma sin rotura) se obtendrán del estudio de laminación (ver apartado 5.6). Para cada posible combinación de nivel previo, avenida entrante y operatividad de compuertas habrá que obtener estas variables. En función de los modos de fallo a estudiar, en algunos casos será necesario calcular algunas variables adicionales como pueda ser el tiempo de sobrevertido. Para realizar el estudio de laminación es necesario contar con la curva característica del embalse (que relaciona cota y volumen), con las curvas de gasto de los órganos de desagüe y con las normas de gestión de avenidas.

Respecto de los modos de fallo y los hidrogramas de rotura, son en general de aplicación los mismos comentarios que para el escenario normal, con la única variación de que las probabilidades de rotura serán adimensionales en lugar de anuales.

En cuanto a las consecuencias, la única diferencia respecto del escenario normal es que será necesario calcular también las consecuencias en el caso de no rotura para poder calcular riesgos incrementales.

La figura 5.5 muestra un resumen las relaciones descritas.

5.2.4. Escenario sísmico

Por último, se describen los trabajos necesarios para poder completar un modelo de riesgo en escenario sísmico (figura 5.6).

Los dos primeros nodos (que podrían agruparse en uno solo) modelan la probabilidad de presentación del sismo mediante una variable representativa, normalmente la aceleración básica. Esta relación se debe obtener de un estudio sísmico (ver apartado 5.3). En casos en los que la sismicidad sea muy baja es posible prescindir de este escenario completamente ya que el riesgo que aportaría sería despreciable frente al riesgo que aportan los otros dos escenarios.

Como en los dos anteriores escenarios, en el escenario sísmico, también es necesario modelar el nivel de embalse en el momento de presentarse el sismo. Los modos de fallo tienen también una estructura y consideración similar, así como los nodos de hidrograma de rotura.

Finalmente, las consecuencias dependerán en primer instancia del hidrograma de rotura únicamente y como en el caso del escenario normal, no será necesario evaluar las consecuencias en caso de no rotura (porque no hay inundación). Un análisis más refinado podría tener en cuenta las consecuencias combinadas del sismo y la inundación en caso de rotura y evaluar las consecuencias del sismo sin inundación en el caso de no rotura.

La figura 5.7 muestra un resumen las relaciones descritas.

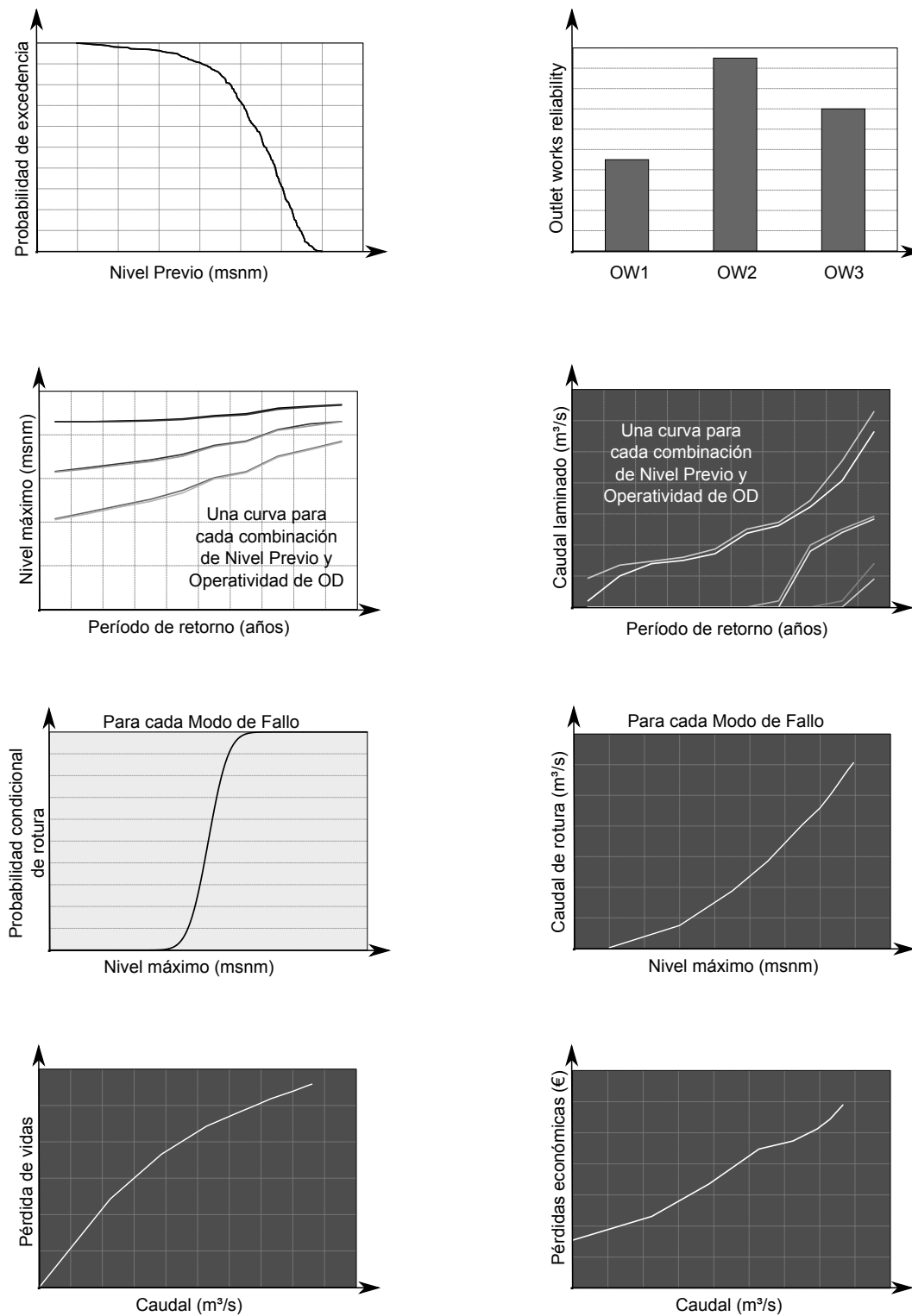


Figura 5.5: Resumen de las relaciones básicas para alimentar un modelo de riesgo de escenario hidrológico.

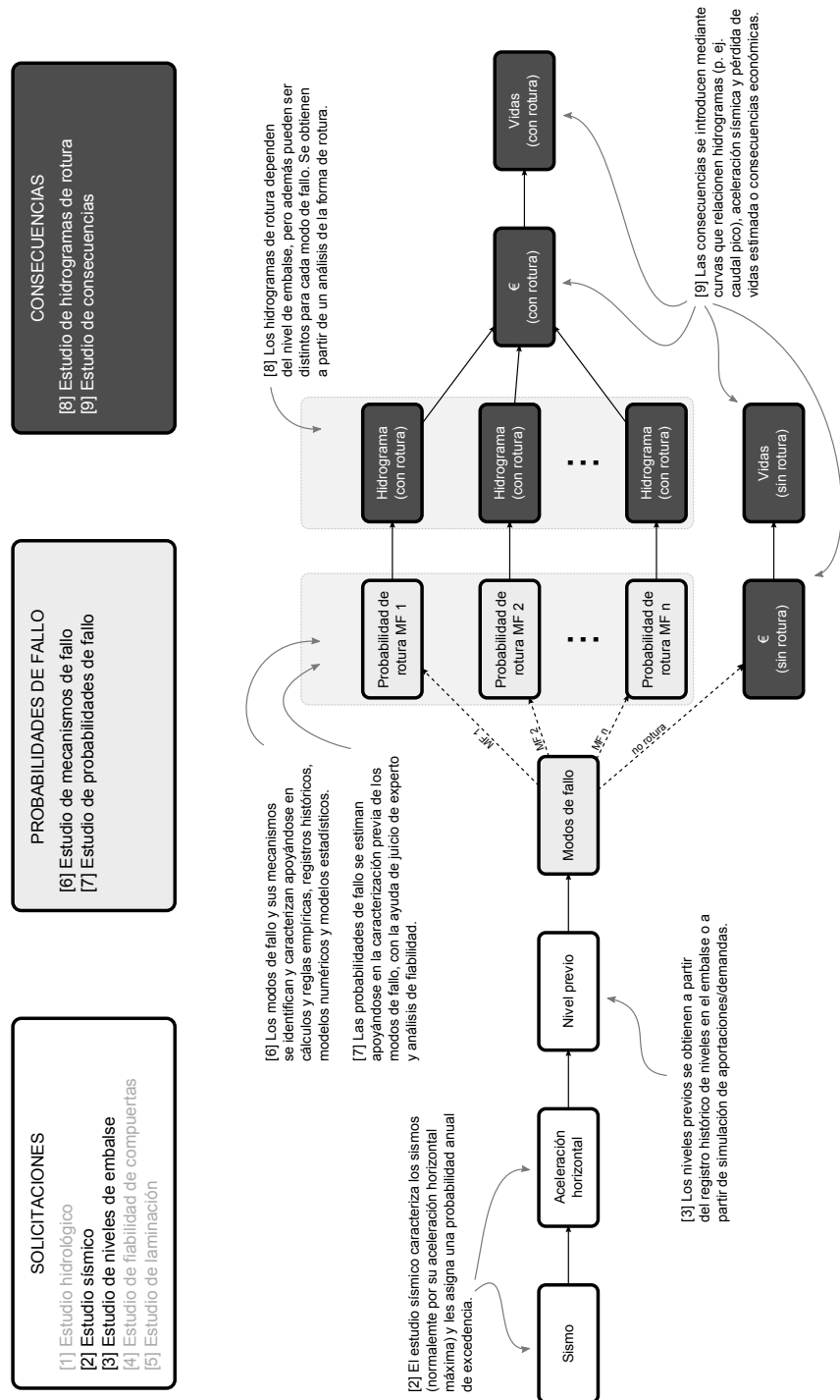


Figura 5.6: Diagrama de influencia de un árbol de eventos estándar para el escenario sísmico mostrando los trabajos a realizar para caracterizar cada una de las variables.

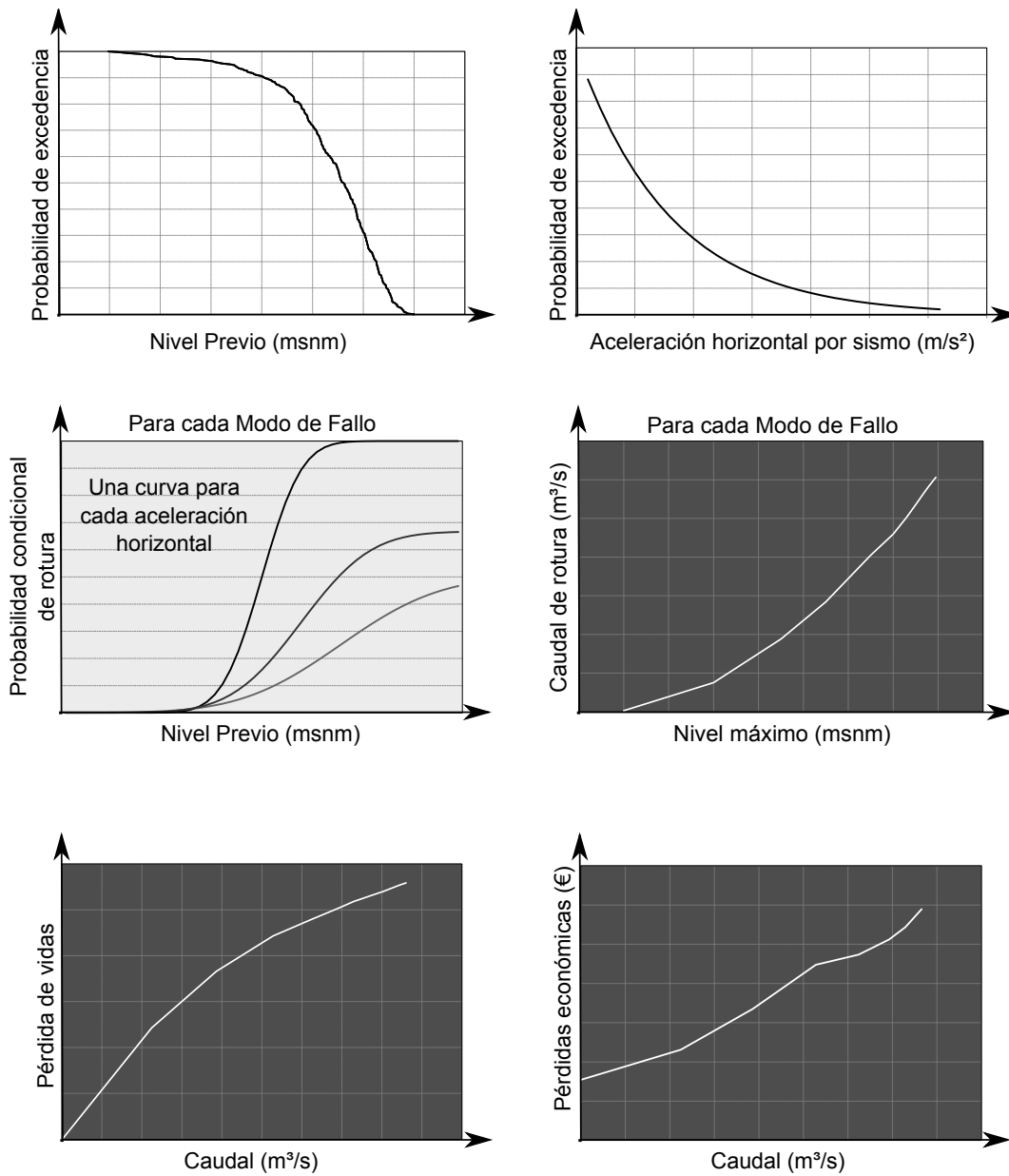


Figura 5.7: Resumen de las relaciones básicas para alimentar un modelo de riesgo de escenario sísmico.

5.2.5. Ejemplo

Se presenta a continuación el ejemplo que se va a seguir a lo largo del capítulo. Se trata de una presa ficticia con las siguientes características generales:

- Presa de hormigón de gravedad
- Cota del NMN = 218.5 m
- Cota de coronación = 222.3 m
- Aliviadero de superficie controlado por 2 compuertas

Se va a analizar el escenario hidrológico. De la identificación de modos de fallo, se han obtenido 2 modos de fallo:

- Deslizamiento de un bloque debido al nivel del embalse y la existencia de altas subpresiones
- Erosión del pie de presa y deslizamiento producido por un sobrevertido

La figura 5.8 muestra la arquitectura del modelo de riesgo adoptada para el ejemplo.

5.3. Estudio de solicitaciones: avenidas y sismos

5.3.1. Las solicitaciones en el análisis de riesgo

Un modelo de riesgo parte de un evento inicial que provoca las cargas a las que es sometida la presa. En el escenario hidrológico este evento es una avenida y en el escenario sísmico este evento es un sismo. En el escenario normal, no hay un evento inusual que desencadene la rotura, ya que modela precisamente la probabilidad de rotura cuando no hay un evento inusual.

El presente capítulo explica cómo se introducen en los modelos de riesgo las avenidas y los sismos. Así, dentro del proceso general del análisis de riesgo, los estudios hidrológico y sísmico forma parte del análisis de las solicitaciones (ver figura 5.1).

En el escenario hidrológico, el fenómeno a estudiar son las avenidas. Estas se pueden caracterizar mediante distintas variables, aunque lo más común es hacerlo a través del valor de su caudal pico Q_p . Además, llevan asociada una cierta frecuencia de ocurrencia, explicitada mediante su probabilidad anual de excedencia PAE (probabilidad de que el caudal pico de la mayor avenida en un año cualquiera supere un determinado caudal Q) o su periodo de retorno T (inverso de la PAE).

En el escenario sísmico, se modela la probabilidad de presentación del sismo mediante una variable representativa, normalmente la aceleración básica.

En el escenario normal, las propias cargas son los niveles diarios de embalse, cuya modelación se explica en el apartado 5.4, sin que intervenga ningún evento inusual como las avenidas o los sismos.

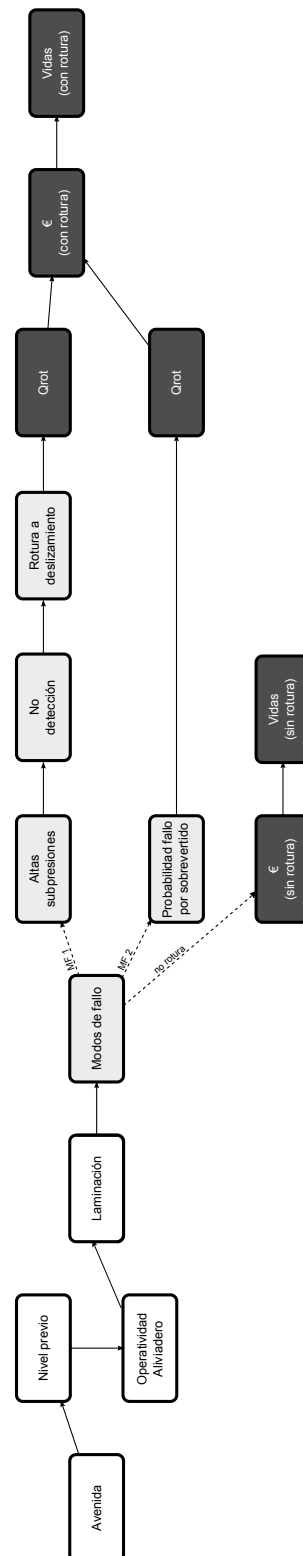


Figura 5.8: Arquitectura del modelo de riesgo del ejemplo

5.3.2. Estimación de los sismos de cálculo

El objetivo del estudio sísmico debe ser la obtención de una serie de sismos para los periodos de retorno que se vayan a estudiar. Para ello, se pueden seguir dos rutas. La primera consistiría en generar sismos sintéticos para los periodos de retorno buscados. La segunda sería trabajar únicamente con un valor que caracterice al sismo y que pueda servir para realizar un análisis simplificado del efecto del sismo, por ejemplo la aceleración horizontal máxima. En esta segunda opción, lo que se busca es la caracterización estadística de dicha variable.

En España, la primera opción se puede llevar a cabo apoyándose en los espectros de respuesta proporcionados por la normativa vigente, en la actualidad la NCSE-02 [95]. Con ellos se pueden obtener acelerogramas sintéticos que después serán utilizados para calcular las probabilidades de fallo. En zonas de alta sismicidad o con condiciones especiales puede ser necesario recurrir a estudios sismotectónicos [33].

En cuanto a la segunda opción, en España, la norma NCSE-02 proporciona un mapa de peligrosidad sísmica con valores de la aceleración horizontal asociada a un periodo de retorno de 500 años [33]. A partir de esta aceleración se puede obtener la aceleración de cualquier periodo de retorno mediante la fórmula propuesta en la NCSE-94 [98]:

$$a_T = a_{500} \cdot \left(\frac{T}{500} \right)^{0,37}$$

5.3.3. Estimación de los hidrogramas de avenida

El propósito del estudio hidrológico en el análisis de riesgo es la obtención de una serie de hidrogramas de avenida completos con un cierto periodo de retorno asociado. Esto significa que deben obtenerse tanto la forma de los hidrogramas como su magnitud (caracterizada normalmente por el valor de su caudal máximo o de su volumen total).

Para conseguir este objetivo, es válido en principio cualquier método que proporcione una colección de hidrogramas de entrada al embalse y sus correspondientes periodos de retorno, como por ejemplo los llamados métodos hidrometeorológicos.

Límites de aplicación

En el contexto del Análisis de Riesgo es habitual trabajar con probabilidades anuales de excedencia del orden de 10^{-4} , 10^{-5} e incluso menos. La primera limitación en la extrapolación de la probabilidad de avenidas tiene como base las características de los datos y la longitud de los registros usados en el análisis. Cada análisis de riesgo puede requerir de un rango de PAEs distinto, y por lo tanto los procedimientos de análisis y las fuentes de datos consultadas se deben seleccionar en función de los requerimientos del proyecto [131].

Generalmente, los datos utilizados para calcular los hidrogramas se basan en registros de menos de 100 años de longitud, aunque pueden alargarse hasta 150 años utilizando información histórica. Existen varios tipos de fuentes de información que sirven para plantear la extrapolación a PAEs suficientemente pequeñas:

- Datos de caudales.
- Datos climatológicos.
- Datos históricos.
- Datos de paleoavenidas.

Los mayores beneficios a la hora de estimar avenidas severas de forma creíble pueden alcanzarse combinando el uso de datos regionales de distintas fuentes. Así, los análisis que se basan en datos e información de precipitaciones, caudales y paleoavenidas regionales deberían ofrecer los resultados más precisos en la caracterización de avenidas con bajas PAE.

La tabla 5.1 presenta una lista de los distintos tipos de datos que pueden usarse como base para la estimación de frecuencias de avenidas, y los límites de extrapolación óptimos para las PAE. En cualquier caso, cada situación es diferente y debe ser evaluada individualmente, siendo importante realizar análisis de sensibilidad para evaluar el nivel óptimo de detalle en cualquier estudio [97].

Tipo de datos usados en el análisis de frecuencia de avenidas	Límite de aplicación en la extrapolación para Probabilidades Anuales de Excedencia	
	Típico	Óptimo
Datos in-situ de caudales	1 / 100	1 / 200
Datos regionales de caudales	1 / 750	1 / 1.000
Datos in-situ de caudales y de paleoavenidas	1 / 4.000	1 / 10.000
Datos regionales de precipitaciones	1 / 2.000	1 / 10.000
Datos regionales de caudales y de paleoavenidas	1 / 15.000	1 / 40.000
Combinaciones de datos regionales y extrapolados	1 / 40.000	1 / 100.000

Tabla 5.1: Tipos de datos hidrometeorológicos utilizados y límites propuestos de extrapolación en el análisis de frecuencia de avenidas [131].

5.3.4. Ejemplo

Las avenidas a introducir en el ejemplo se han obtenido a partir de las avenidas presentes en la Primera Revisión y Análisis General de la Seguridad. Estas avenidas comprenden períodos de retorno desde 10 años a 10,000 años (figura 5.9). Se incluye además una avenida de caudal nulo que se corresponde con el periodo de

retorno $T=1$. En un caso real, se debería comprobar también si el periodo de retorno máximo es suficiente para el análisis que se está llevando a cabo.

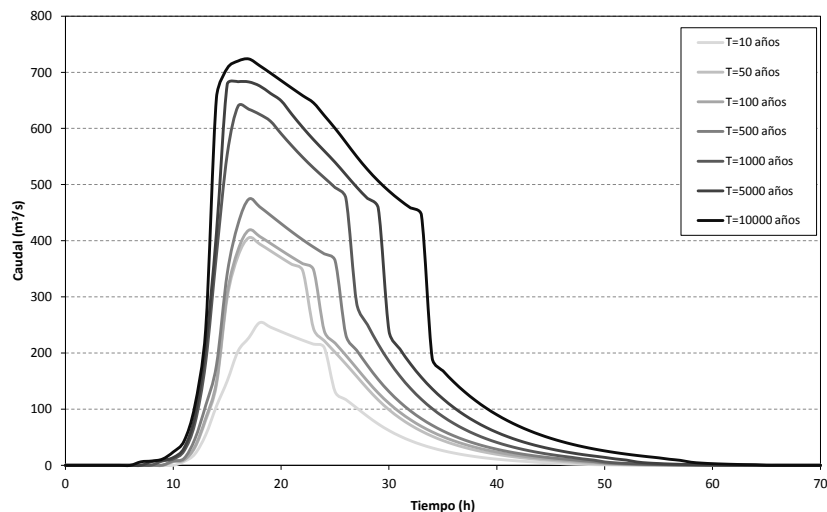


Figura 5.9: Avenidas de 10 a 10.000 años de periodo de retorno.

5.4. Estudio de niveles de embalse

5.4.1. Los niveles previos en el análisis de riesgo

El estudio de los niveles previos tiene el objetivo de analizar la probabilidad de que el embalse se encuentre a un cierto nivel cuando llega la avenida, es decir, define la situación de partida en el embalse para estudiar las cargas que la avenida introduce. Por lo tanto, dentro del proceso general del análisis de riesgo, el estudio de niveles previos forma parte del análisis de las cargas (ver figura 5.1).

Para obtener una relación entre probabilidad y niveles en el embalse se puede utilizar el registro de niveles históricos en el embalse. 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 se debe recurrir a la simulación.

5.4.2. Obtención de la relación entre nivel previo y probabilidad

La relación entre el nivel previo y su probabilidad se suele incluir en el modelo de riesgo mediante una curva de probabilidad de excedencia de niveles en el embalse. Esta curva se obtiene a partir de una serie de datos que puede provenir de una serie real o de series sintéticas, como se explica en el apartado 5.4.3.

Para obtener la curva empírica de probabilidad de excedencia de los niveles en el embalse es necesario ordenar todos los datos de niveles de menor a mayor. De esta forma, la probabilidad de excedencia de cada nivel de embalse se obtiene con la siguiente fórmula [143]:

$$PE_n = 1 - \frac{i_n - 1}{N - 1}$$

donde PE_n es la probabilidad de excedencia de un nivel n , i_n es el número de orden del nivel n dentro de la serie de niveles cuando son ordenados de menor a mayor y N es la longitud de la series de niveles.

Cuando se representan gráficamente los niveles en el embalse y su probabilidad de excedencia se obtiene una curva como la que se muestra en la figura 5.10.

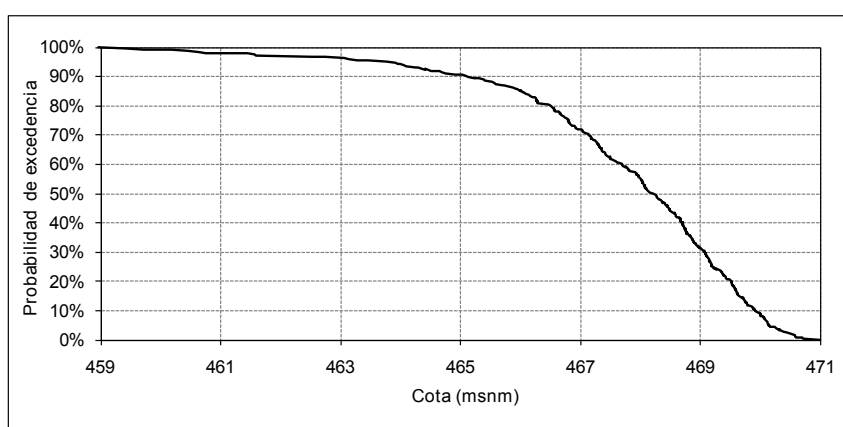


Figura 5.10: Ejemplo de curva de probabilidad de excedencia de los niveles previos en el embalse.

5.4.3. Datos necesarios

Registros históricos

Para obtener una relación entre el nivel previo y la probabilidad normalmente se pueden utilizar los datos disponibles en los registros históricos de mediciones del nivel de agua en el embalse (figura 5.11), aunque estos datos deben cumplir algunas condiciones para poder ser utilizados en el modelo de riesgo.

En primer lugar, los datos deben ser consistentes y fiables, por lo que es necesario filtrar la serie para eliminar los datos erróneos.

Para poder utilizar estos datos es necesario que los datos representen correctamente la distribución de niveles en el embalse, para ello, la longitud de la serie de datos debe ser suficiente para que la variabilidad de los niveles quede correctamente representada. En la bibliografía se afirma que con una longitud de 25 años es suficiente en la mayoría de los casos para variables hidrológicas como el caudal [70]. En cualquier caso, conviene estudiar la influencia de la longitud de la series de datos en

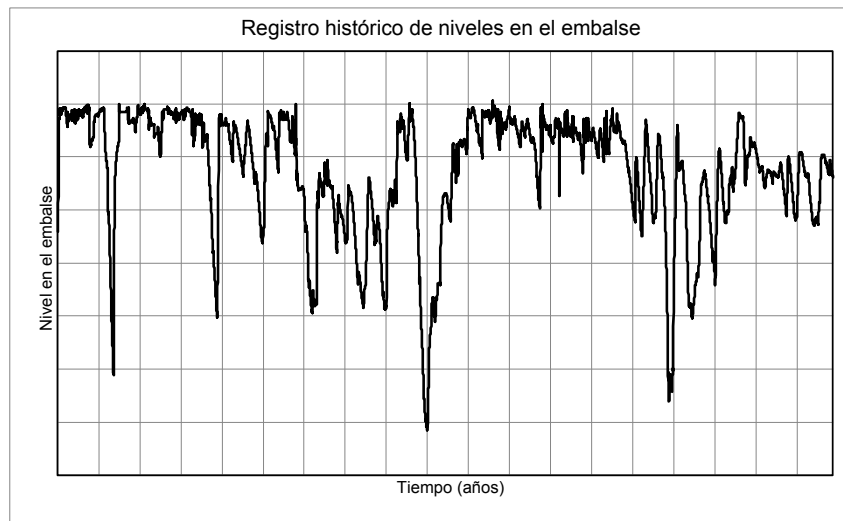


Figura 5.11: Ejemplo de registro histórico de niveles en el embalse.

la forma de la curva de probabilidad obtenida y asegurarse que la longitud tomada es suficiente, ya que la extensión del período de datos puede influir en los resultados [7].

Además, para evitar introducir en la curva de probabilidad los datos que no son representativos de la situación normal del embalse, deben quitarse del análisis los datos correspondientes a situaciones excepcionales como:

- El proceso de llenado del embalse.
- Vaciado del embalse para obras de reparación.
- Otras situaciones que no sean habituales en la explotación normal del embalse.

Para obtener una correcta caracterización de la situación actual de los niveles en el embalse, también es importante eliminar los datos previos a la ocurrencia de algún hecho que modifique considerablemente la variación de niveles, como puede ser la construcción de una presa aguas arriba o un recrecimiento de la presa.

Además, en el escenario hidrológico, es necesario eliminar las situaciones de avenida en el registro, ya que la sobreelevación de nivel provocada por las avenidas es introducida de forma independiente en el modelo de riesgo a través del estudio de laminación.

En general, puede ser suficiente con truncar la curva de probabilidad de excedencia obtenida en el Nivel Máximo Normal del embalse (NMN), suponiendo de esta manera que siempre que el embalse se encuentre por encima del NMN es porque hay una situación de avenida.²

²En un estudio más detallado, se podría eliminar en cada año los niveles alcanzados en el embalse debido a la máxima avenida anual. Estos niveles no tienen por qué coincidir con los niveles máximos anuales en el embalse, por lo que sería necesario analizar las avenidas que han entrado en el embalse en cada año.

En cambio, los datos correspondientes a otras situaciones inusuales en el embalse como periodos de sequía, sí que deben ser incluidas dentro del análisis de los registros históricos de niveles.

En el caso de que los registros de niveles en el embalse no cumplan las condiciones citadas o en el caso de que se desee evaluar alguna posible situación futura (por ejemplo, una restricción de niveles de explotación) se debe recurrir a la simulación para obtener los datos de niveles en el embalse necesarios.

Simulaciones del nivel en el embalse

Una alternativa a la utilización de registros históricos para la obtención de la relación entre el nivel previo y la probabilidad es la realización de una simulación del sistema de aprovechamiento de recursos hídricos. El objetivo de un modelo de simulación es obtener las funciones de distribución de una variable analizando su comportamiento. En este caso, la simulación reproduce el funcionamiento del embalse de acuerdo a las reglas de gestión actuales o propuestas del sistema.

En general, la simulación del funcionamiento del embalse se realiza dentro de una simulación más compleja de la planificación del sistema de recursos hídricos completo, pudiendo incluir varios embalses. Estos modelos consisten en un cálculo secuencial de la localización y uso de los recursos hídricos. Para ello, se utiliza la ecuación de balance de masas teniendo en cuenta las restricciones físicas del agua y las reglas de gestión de las infraestructuras. Existen varios programas desarrollados para la planificación de cuencas como AQUATOOLDMA [126] o HEC-ResSim [83] que pueden facilitar este tipo de cálculos.

Al realizar una simulación del embalse es necesario disponer de una serie de datos [7]:

- Aportaciones, ya sea mediante una serie histórica de aportaciones en el embalse o mediante un análisis estocástico para crear series sintéticas de aportaciones.
- Demandas.
- Gestión del embalse.
- Estimación de pérdidas por evaporación y por infiltración en el terreno.

Aunque la realización de una simulación es más laboriosa que la utilización de los datos históricos, esta opción presenta algunas ventajas [132]:

- Permite contar con un amplio registro de niveles de embalse.
- Los niveles son representativos del funcionamiento del embalse.
- Permite considerar alternativas en la seguridad de la presa y en la planificación o gestión del sistema de recursos hídricos.

5.4.4. Ejemplo

La distribución de niveles previos para el ejemplo se ha obtenido analizando la distribución de niveles históricos en el embalse. Se ha discretizado la curva de probabilidad obtenida en 18 intervalos. La figura 5.12 muestra la curva de probabilidad de excedencia de niveles previos y la discretización empleada.

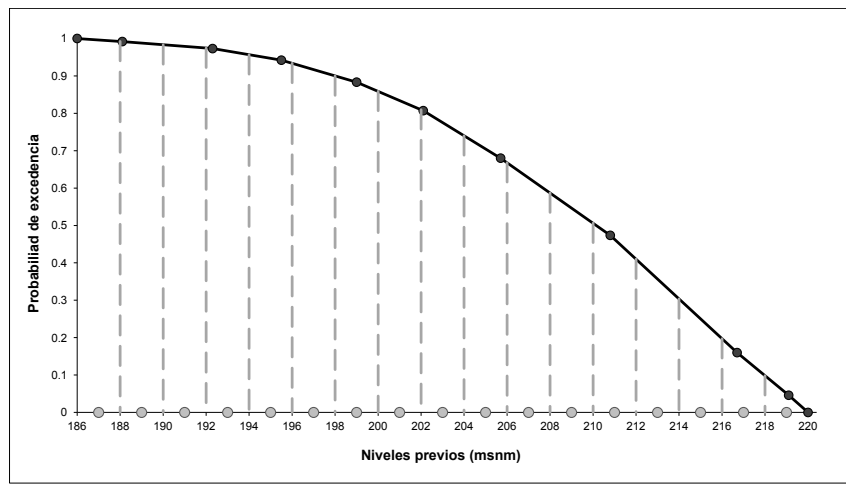


Figura 5.12: Curva de probabilidad de excedencia de niveles previos y discretización empleada.

En el modelo de riesgo es necesario introducir la curva de probabilidad de excedencia (definida por los puntos negros en la figura 5.12) mediante una tabla, tal como se muestra en la tabla 5.2 y los intervalos en los que se quiere realizar la discretización.

Nivel previo (m)	Probabilidad de excedencia
185.5	1
187.6	0.9918
191.8	0.9730
195.0	0.9420
198.5	0.8832
201.6	0.8070
205.2	0.6800
210.3	0.4736
216.2	0.1600
218.6	0.0460
219.5	0

Tabla 5.2: Información de niveles previos introducida en el modelo.

5.5. Estudio de fiabilidad de órganos de desagüe

5.5.1. La fiabilidad de los órganos de desagüe en el análisis de riesgo

La fiabilidad de los órganos de desagüe tiene una gran importancia en la seguridad de las presas, y ha sido parte fundamental en muchos fallos catastróficos. En España, es bien conocido el peso que tuvo en el caso de la presa de Tous, pero en el panorama internacional los casos son múltiples [84].

A pesar de esta importancia manifiesta, tradicionalmente la fiabilidad de los órganos de desagüe ha sido un aspecto difícil de integrar dentro del conjunto de la seguridad de una presa y ha sido tenida en cuenta de forma aislada. Mediante el análisis de riesgo, este apartado queda integrado en el modelo de riesgo y su impacto sobre la seguridad es cuantificable.

Dentro del proceso global del análisis de riesgo, la estimación de la fiabilidad de los órganos de desagüe forma parte de los estudios necesarios para alimentar el modelo de riesgo, más concretamente para alimentar la parte del modelo de riesgo correspondiente a las cargas (ver figura 5.1).

El efecto sobre la seguridad de la presa de la fiabilidad de los órganos de desagüe es indirecto: una baja fiabilidad hace que la probabilidad de alcanzar niveles de embalse altos (o incluso sobrevertidos) durante una avenida sea mayor, lo cual aumenta la probabilidad de rotura.

Por lo tanto, la información que deben incluir estos nodos es la probabilidad de que cada órgano se pueda utilizar para dicho fin, es decir que en el momento en que se presente una avenida cada órgano de desagüe pueda o no ser utilizado. Es habitual y suele ser suficiente hacer la hipótesis de que cada órgano de desagüe (cada vano de un aliviadero, cada tubo de un desagüe) puede funcionar completamente o no funcionar en absoluto. En principio, también se podría hacer un estudio que contemplase escenarios intermedios de funcionamiento parcial aunque habría que valorar si las mejoras en cuanto a precisión de resultados serían relevantes.

No se debe confundir la fiabilidad de los órganos de desagüe con la posibilidad de que sufran un colapso o apertura repentina que provoque una avenida artificial aguas abajo. Este aspecto, también debe ser analizado, pero no como un componente de las cargas del sistema sino como un potencial modo de fallo. Resumiendo, este apartado no trata la posibilidad de que las compuertas se abran cuando no se quiere sino la posibilidad de que no se abran cuando sí se quiere.

5.5.2. El proceso de estimación de la fiabilidad

Como ya se ha explicado, el objetivo que se persigue es estimar la probabilidad de que en el momento en que venga una avenida y se necesite que un determinado órgano de desagüe alivie un cierto caudal, éste efectivamente lo alivie. El análisis de las causas que pueden llevar a que esto no ocurra no se puede limitar al fallo

mecánico ya que la experiencia demuestra que los fallos pueden ocurrir por muy variadas razones [84]. Por lo tanto si se analiza el sistema completo, existen varias razones por las cuales se podría producir el fallo:

- Error humano (ya sea porque no se identifica la necesidad de abrir una compuerta, porque la orden no se transmite, porque la persona encargada de operar una compuerta comete un error, etc.).
- Falta de acceso a la cámara de maniobras (por ejemplo por nieve).
- Fallo mecánico (rotura de una pieza, trabazón, etc.).
- Fallo en la obra civil (que pudiera inutilizar el desagüe).
- Fallo eléctrico (ya sea en el suministro como en los componentes del propio órgano de desagüe).
- Obturación del órgano de desagüe (por ejemplo por troncos).
- Fallo en el software que controla la compuerta o válvula (en caso de existir).
- Otros.

Por lo tanto para estimar la probabilidad global de fallo de la compuerta se deben tener en cuenta todos estos supuestos. La mejor herramienta para combinar todas estas probabilidades y para estudiar en detalle cada una de ellas son los árboles de fallo.

Los árboles de fallo son una herramienta lógica deductiva en la cual se postula un evento superior indeseado, el fallo, y se deducen sistemáticamente todas las posibles maneras en que el fallo puede producirse. El apéndice A explica la técnica de análisis de árboles de fallo con más detalle.

En este sentido hay que tener en cuenta que los árboles de fallo (como muchos otros métodos) no son modelos cuantitativos en sí mismos. En realidad son una herramienta cualitativa que puede ser evaluada cuantitativamente. Por lo tanto, muchas veces se pueden usar los árboles de fallo como herramienta para ayudar a entender un sistema o para ayudar a racionalizar una discusión, sin que se lleguen a evaluar numéricamente. Aún así, el conocimiento que se obtenga del sistema tras modelarlo mediante árboles de fallo será de gran ayuda para la asignación de probabilidades sobre su fiabilidad. En cuanto al nivel de detalle del análisis, éste se puede clasificar en tres categorías:

Somero. Tras discutir todas las posibles causas de fallo, se estima una única probabilidad que englobe todas ellas.

Intermedio. Se realiza un árbol de fallo de alto nivel que desagregue las posibles causas de fallo, pero sin llegar al despiece de los componentes del sistema mecánicos y de otros tipos. Se estiman las probabilidades desagregadas y se calcula la probabilidad global de fallo mediante el árbol de fallo.

Detallado. Se realiza un árbol de fallo lo más completo posible, modelando los distintos componentes mecánicos, del suministro eléctrico y de la cadena de

órdenes. Se estiman las probabilidades desagregadas y se calcula la probabilidad global de fallo mediante el árbol de fallo.

Es recomendable que el análisis que se haga sea como mínimo con un nivel de detalle intermedio ya que intentar estimar la probabilidad mediante un único número es muy difícil y pueden introducirse sesgos e imprecisiones innecesarias. Por el otro extremo, el nivel detallado puede no estar al alcance de todos los análisis, ya sea por falta de datos o por suponer una inversión en tiempo y esfuerzo excesiva. Además, se debe mantener un nivel de detalle similar a lo largo de todo el modelo de riesgo y no es eficiente analizar con un detalle máximo una parte del sistema si otras partes se están estimando de forma más grosera (a no ser que se demuestre que dicha parte tiene una contribución muy alta al resultado final). En cualquier caso siempre se debe hacer un análisis de sensibilidad de los resultados obtenidos. Como mínimo, se deben obtener unos valores pésimos y óptimos que proporcionen una horquilla que acote el resultado.

También hay que tener en cuenta la importancia relativa de cada desagüe en la seguridad de la presa. Por ejemplo si se está analizando la fiabilidad de los órganos de desagüe de una presa con un aliviadero de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ y un desagüe de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, probablemente será más rentable dedicar más esfuerzo a la estimación de la fiabilidad del aliviadero. Similarmente tendrá más sentido realizar un análisis detallado en una presa que dependa mucho de sus órganos de desagüe para la laminación que en una presa con mucha holgura en la seguridad hidrológica. Es posible determinar la importancia relativa de los órganos de desagüe realizando un modelo de riesgo preliminar en el que poder evaluar el efecto de la fiabilidad mediante un análisis de sensibilidad.

La figura 5.13 muestra un árbol de fallo de ejemplo para un análisis de nivel intermedio. El árbol es muy genérico y en un caso real se debería llegar a un nivel de detalle algo mayor al tener en cuenta las particularidades del caso estudiado. En el apéndice A se puede ver un ejemplo de árbol de fallo desarrollado a un nivel de detalle alto y una explicación de la técnica de análisis de árboles de fallo.

Una vez se ha modelado la lógica del sistema mediante árboles de fallo, es necesario estimar las probabilidades individuales. Para ello las herramientas con las que se cuenta son principalmente dos:

Análisis de registros históricos. Consiste en estimar la fiabilidad del sistema o de alguno de sus componentes a partir de la frecuencia con la que ha fallado en el pasado.

En ocasiones los operadores de la presa pueden contar con registros de todas las maniobras que se han realizado en sus órganos de desagüe y especificando si la maniobra se ha llevado a cabo con éxito o si ha habido algún problema. Estos registros deben ser suficientemente largos para ser estadísticamente significativos. Cuando existan varias compuertas en un órgano de desagüe hay que tener en cuenta la posibilidad de que las probabilidades de fallo no sean iguales para todas (por ejemplo vanos exteriores vs vanos interiores) por lo que puede ser útil que los registros estén desagregados por compuertas. No

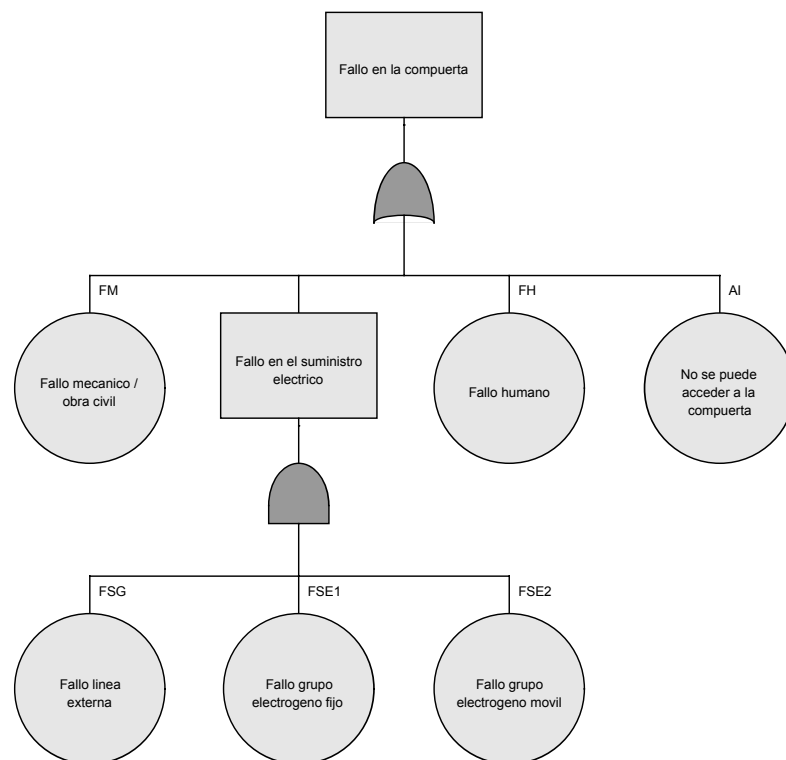


Figura 5.13: Ejemplo de árbol de fallo genérico para un análisis de nivel de detalle intermedio.

todos los operadores cuentan con este tipo de registros, ya que la fiabilidad de los órganos de desagüe no siempre ha recibido este nivel de atención en el pasado. En cualquier caso, los valores que se obtengan de los registros históricos no tienen por qué ser utilizados directamente como la fiabilidad a introducir en el modelo de riesgo, sino que más bien pueden servir como punto de partida para una discusión.

Para poder llevar a cabo un análisis de nivel detallado (ver más arriba) es necesario contar con valores de fiabilidad de cada componente. Este es el enfoque que se ha seguido en otras industrias como la aerospacial donde se realiza una producción en serie y por lo tanto se dispone de bases de datos muy amplias y fiables. Para el campo de las presas estas bases de datos ajenas tienen una utilidad (y disponibilidad) limitada, aunque sí existen bases de datos de algunos de los componentes que pueden ser proporcionadas por los fabricantes.

Asignación de probabilidades por juicio de experto. El proceso para la asignación de probabilidades por juicio de experto en sesiones de grupo es igual al empleado en la asignación de las probabilidades de fallo de los modos de fallo, por lo que son de aplicación los mismos comentarios que se hacen en el capítulo 5.7.

5.5.3. Ejemplo

Se dispone en el ejemplo de un aliviadero de dos compuertas. La fiabilidad individual de cada compuerta se ha estimado mediante juicio de experto a partir de la documentación disponible sobre este órgano de desagüe, estimándose en un 95 %. A partir de este dato y asumiendo independencia entre las distintas compuertas, se ha obtenido la probabilidad de cada operatividad mediante una distribución binomial (figura 5.14).

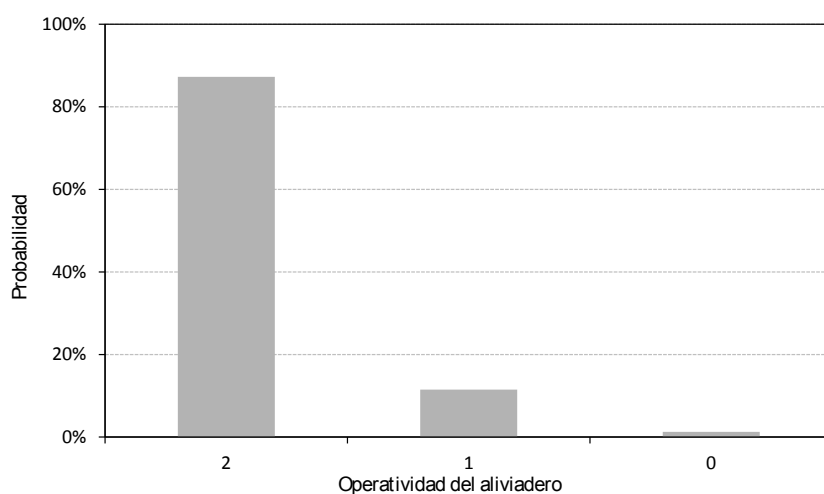


Figura 5.14: Fiabilidad de las compuertas del aliviadero introducida en el ejemplo.

5.6. Estudio de laminación

5.6.1. La laminación en el análisis de riesgo

El estudio de laminación es necesario en un análisis de riesgo para analizar el escenario hidrológico. Su objetivo es conocer la respuesta del sistema presa-embalse frente a las solicitaciones hidrológicas mediante el cálculo del régimen de caudales evacuados por la presa hacia aguas abajo en función del tiempo, así como los niveles alcanzados en el embalse. Esto proporciona los datos necesarios para:

- Calcular las consecuencias aguas abajo de la presa producidas por los desagües realizados en el caso de no rotura de la presa.
- Conocer las probabilidades de alcanzar unas ciertas cargas (nivel máximo en el embalse, posible sobrevvertido, duración de dicha situación...), que servirán para cuantificar las probabilidades de fallo de la presa.

Por lo tanto, dentro del proceso de análisis de riesgo, el cálculo de la laminación se integra en el análisis de las cargas y en el análisis de las consecuencias (ver figura 5.1).

En cuanto a la sistemática de cálculo, para cada posible combinación de nivel previo, avenida entrante y operatividad de compuertas habrá que obtener estas variables. En función de los modos de fallo a estudiar, en algunos casos además del nivel máximo será necesario calcular alguna otra variable como pueda ser el tiempo de sobrevvertido. En cuanto al hidrograma de salida, éste se suele caracterizar por su caudal pico, aunque en función de las características particulares de cada presa, se podría caracterizar por otra u otras variables representativas.

5.6.2. Cálculo de la laminación

En un sistema hidrológico, las variables de entrada $E(t)$ ³, salida $Q(t)$ y almacenamiento $V(t)$ vienen relacionadas por la ecuación de continuidad:

$$\frac{dV}{dt} = E(t) - Q(t)$$

Esta ecuación se debe resolver numéricamente, ya sea mediante una simple discretización directa o mediante métodos más sofisticados como el método Puls modificado y el método de Runge-Kutta.

³En general las entradas al embalse serán función del tiempo y vendrán representadas por los hidrogramas de entrada. Para el caso de embalses de gran magnitud, el desplazamiento de la onda de avenida también dependerá de las dimensiones del embalse, y su llegada a la presa se efectuará a través de una curva de remanso desde la cola del embalse. Así, y dado que se buscan los niveles en la presa, E será función del tiempo, de la superficie de agua en el embalse y de sus dimensiones. En la mayoría de los embalses no es necesaria esta disquisición y se puede considerar que las entradas E al embalse dependen exclusivamente del tiempo; esto significa que la superficie de agua en el embalse se supone horizontal durante todo el proceso, que no existen efectos de remanso en la cola y que en todo instante el caudal que llegue al embalse afecta inmediatamente a los niveles de agua en la presa.

Los datos necesarios para llevar a cabo el cálculo de laminación son:

- Hidrograma de entrada al embalse.
- Nivel previo.
- Curva característica del embalse.
- Curvas de gasto de los órganos de desagüe.
- Consignas de operación de compuertas.

5.6.3. Particularidades de la laminación en el análisis de riesgo

Sobrevertido por coronación

Al contrario que en otro tipo de estudios deterministas, en el Análisis de Riesgo, para cualquier sollicitación se contempla tanto la posibilidad de que la presa resista como la de que no. Por lo tanto, para modelar correctamente los casos en los que se presenten grandes sollicitaciones y la presa no rompa, habrá que modelar el proceso de sobrevertido, integrándolo como parte de la capacidad de respuesta de la presa frente a las sollicitaciones hidrológicas. En este caso se considerará que se produce un vertido no controlado, asimilable al producido por un aliviadero sin compuertas, con una longitud de vertido aproximadamente igual a la longitud de coronación de la presa (o en su caso a la longitud en la que se prevea se producirá el sobrevertido).

Existencia de pretil

La existencia o no de pretil (murete de protección construido en toda la longitud de coronación de la presa para proteger el paso y evitar caídas) en coronación de presa puede influir sobre el cálculo de la laminación, en el caso de que el agua alcance la altura de coronación. Se pueden encontrar pretils macizos que conforman un muro cerrado de una cierta altura, o abiertos.

Por un lado, si el pretil es cerrado, continuo y posee suficiente resistencia para soportar una cierta carga hidráulica sobre su cara de aguas arriba, podría considerársele como una altura añadida a la correspondiente de la presa. Así, se podría absorber una parte del aumento de niveles producido por la avenida y almacenar en el embalse un volumen extra de agua que favorecería la laminación de la avenida.

Por otro lado, si el nivel en el embalse alcanza la coronación y se encuentra con un pretil abierto o semi-cerrado, se producirá un cierto sobrevertido. Se debe considerar la posibilidad de que dicho pretil rompa por efecto de las cargas hidráulicas aplicadas al aumentar el nivel de agua.

En cualquier caso se debe comprobar que la resistencia del pretil es tal que éste puede absorber la carga hidráulica que los niveles en el embalse imponen.

Tratamiento de relaciones no monótonas

En ocasiones, para una misma situación de nivel previo en el embalse y de operatividad de compuertas, una avenida de mayor periodo de retorno y consecuentemente de menor probabilidad anual de excedencia (PAE) da como resultado un nivel máximo de embalse (NMax) menor. Esto puede suceder debido a las consignas de operación de compuertas: al venir una avenida más grande se abren más las compuertas y el nivel máximo alcanzado puede resultar menor. Evidentemente, estos fenómenos sólo tienen lugar en presas reguladas mediante compuertas. Como consecuencia de esto, la relación PAE-NMax resultante puede no ser monótonamente decreciente. La figura 5.15 muestra una relación PAE-NMax de un caso real con esta característica.

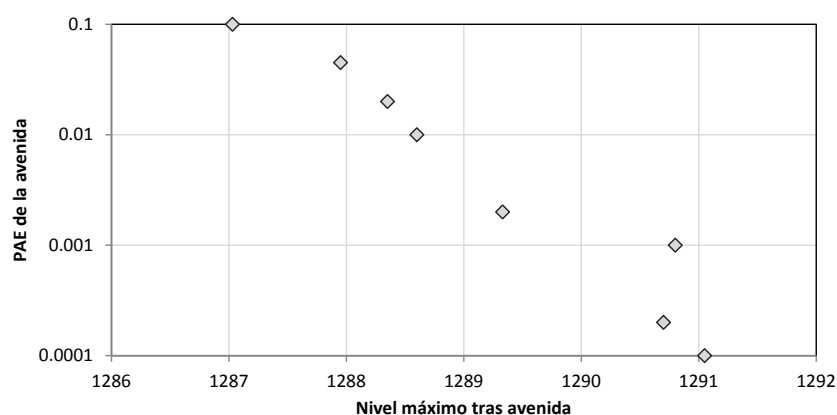


Figura 5.15: Ejemplo de relación PAE-NMáx no monótona.

Dependiendo de cómo se incorporen los resultados de la laminación al modelo de riesgo, en casos así puede ser necesario realizar un postproceso de los resultados del estudio de la laminación antes de incorporarlos al modelo de riesgo. El problema radica en que se tiene una primera variable (magnitud de la avenida) y otra variable derivada de ésta (nivel máximo en el embalse) y normalmente se asume que ambas tienen las mismas probabilidades anuales de excedencia. Sin embargo en los casos en que la gráfica mostrada no es monótona, esta hipótesis no se cumple. Es decir, la PAE de la avenida no coincide con la PAE del nivel máximo. En estos casos, una de dos, o se modela explícitamente la PAE de la avenida y para cada rama del árbol de eventos se calcula el nivel máximo asociado a cada avenida, o se calcula correctamente la relación PAE-NMax.

Sistemas de presas

Es importante tener en cuenta que las solicitaciones hidráulicas a las que está sometida una presa integrada en un sistema de presas 1, 2, 3... (siendo la presa i la situada aguas arriba de la presa $i + 1$, y aguas abajo de la presa $i - 1$) dependen tanto de la hidrología natural entrante en su cuenca, como de los regímenes de explotación de las presas de aguas arriba.

Si en la cuenca correspondiente a la presa i se están produciendo precipitaciones que dan lugar a avenidas, en las cuencas correspondientes a las presas $i - 1, i - 2, \dots$ dichas precipitaciones pueden producir otras solicitaciones que han de ser correspondidas con sueltas de agua en estas presas. Por lo tanto al calcular la laminación de una avenida en una presa i , se podrán tener en cuenta las posibles laminaciones de las presas situadas aguas arriba $i - 1, i - 2, \dots$ en tanto que éstas le suponen una carga hidráulica adicional. Estos caudales se sumarán a las aportaciones de las intercuenas. Del mismo modo, si se considera la posible rotura de una presa que tiene otra presa aguas abajo, el número de escenarios a considerar se verá multiplicado por dos. Todas estas consideraciones aumentan la complejidad de los estudios, por lo que antes de realizarlas se debe analizar la importancia que pueden tener en función del tamaño relativo de los distintos embalse y cuencas.

5.6.4. Ejemplo

Una vez obtenidas las avenidas, los niveles previos y las fiabilidades de compuertas, el siguiente paso en el ejemplo es realizar con la ayuda de una hoja de cálculo la laminación de la presa. Para ello, se ha utilizado la curva característica del embalse y las curvas de gasto de cada uno de los órganos de desagüe, así como unas reglas de operación del embalse. La figura 5.16 muestra el resultado de realizar la laminación para un determinado nivel previo, operatividad y avenida.

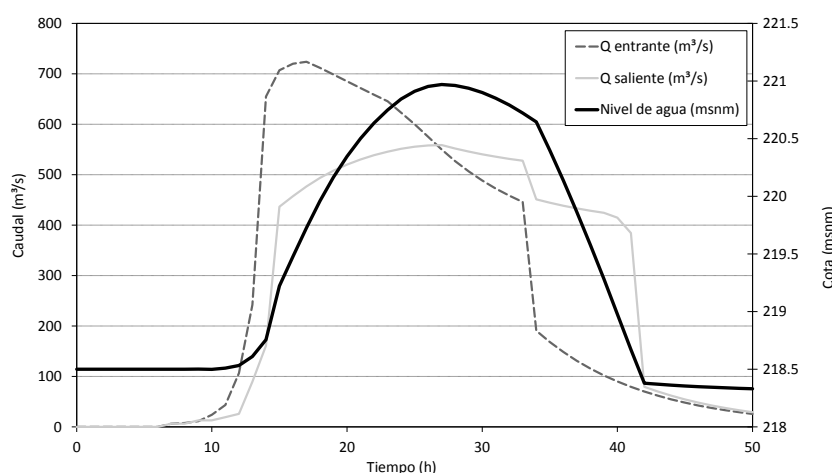


Figura 5.16: Ejemplo de laminación.

Sin embargo, este cálculo de laminación se ha realizado para cada avenida considerada y para cada combinación de operatividad de los órganos de desagüe. El resultado de estos cálculos se puede resumir en una gran tabla donde cada línea representa uno de los cálculos de laminación y que se deberá introducir en el modelo de riesgo. En la tabla 5.3 se muestran las primeras filas de dicha tabla, que se compone de las distintas combinaciones de:

- Nivel previo, NP.
- Probabilidad Anual de Excedencia, PAE (o su inversa el periodo de retorno, T).
- Operatividad del aliviadero, OpA.

Y que ofrece, para cada combinación anterior, el valor de las siguientes variables:

- Nivel máximo alcanzado en el embalse, NMax.
- Altura de sobrevertido, HSob.
- Caudal laminado por la presa, QLam.
- Tiempo de sobrevertido, TSob.

5.7. Estudio de probabilidades de fallo

5.7.1. La estimación de las probabilidades de fallo en el análisis de riesgo

El estudio de las probabilidades de fallo es una de las piezas necesarias para alimentar el modelo de riesgo una vez su arquitectura ha sido definida. En el campo de la seguridad de presas, es un estudio que no suele realizarse fuera del ámbito del Análisis de Riesgo. De las tres componentes del riesgo (solicitaciones, probabilidad de fallo y consecuencias) el estudio trata la segunda (ver figura 5.1). El estudio de probabilidades de fallo es posterior a la identificación de modos de fallo: antes de poder realizar este estudio es necesario haber identificado todos los modos de fallo que se van a incluir en el modelo y haberlos descompuesto en sus mecanismos de fallo.

Para la realización de un Análisis de Riesgo cuantitativo, una vez descompuesto el modo de fallo en pasos bien definidos, se deben estimar las probabilidades de cada uno de ellos. La descomposición se realiza sobre la base de los árboles de eventos y los diagramas de influencia. Para llevar a cabo la estimación de cada probabilidad individual se dispone de varias herramientas, principalmente:

- Las técnicas de fiabilidad
- El juicio de experto
- El uso de metodologías específicas para la estimación de probabilidades de fallo

A su vez, estas herramientas se basan en otras como los modelos numéricos (deterministas y estadísticos), las técnicas Monte Carlo o las tablas estandarizadas de descriptores verbales, tal como se expone a continuación.

En realidad, la anterior clasificación no está compuesta por compartimentos estancos. Por ejemplo, dentro de un mismo modo de fallo es válido estimar algunas probabilidades mediante juicio de experto y otras mediante técnicas de fiabilidad. Tam-

NP	PAE	T	OpA	NMax	HSob	QLam	TSob
186.5	0.0001	10000	0	210.64	0.00	0.00	0
188.5	0.0001	10000	0	211.46	0.00	0.00	0
190.5	0.0001	10000	0	212.34	0.00	0.00	0
192.5	0.0001	10000	0	213.29	0.00	0.00	0
194.5	0.0001	10000	0	214.30	0.00	0.00	0
196.5	0.0001	10000	0	215.38	0.00	0.00	0
198.5	0.0001	10000	0	216.53	0.00	0.00	0
200.5	0.0001	10000	0	217.73	0.00	0.00	0
202.5	0.0001	10000	0	218.97	0.00	0.00	0
204.5	0.0001	10000	0	220.29	0.00	0.00	0
206.5	0.0001	10000	0	221.69	0.00	0.00	0
208.5	0.0001	10000	0	223.09	0.00	11.08	18
210.5	0.0001	10000	0	223.47	0.00	132.57	37
212.5	0.0001	10000	0	224.03	0.23	424.67	41
214.5	0.0001	10000	0	224.12	0.32	481.67	44
216.5	0.0001	10000	0	224.23	0.43	550.11	47
218.5	0.0001	10000	0	224.33	0.53	621.44	50
186.5	0.0001	10000	1	210.64	0.00	0.00	0
188.5	0.0001	10000	1	211.46	0.00	0.00	0
190.5	0.0001	10000	1	212.34	0.00	0.00	0
192.5	0.0001	10000	1	213.29	0.00	0.00	0
194.5	0.0001	10000	1	214.30	0.00	0.00	0
196.5	0.0001	10000	1	215.38	0.00	0.00	0
198.5	0.0001	10000	1	216.53	0.00	0.00	0
200.5	0.0001	10000	1	217.73	0.00	0.00	0
202.5	0.0001	10000	1	218.54	0.00	64.15	0
204.5	0.0001	10000	1	218.82	0.00	199.70	0
206.5	0.0001	10000	1	219.61	0.00	233.76	0
208.5	0.0001	10000	1	220.37	0.00	260.84	0
210.5	0.0001	10000	1	221.13	0.00	284.24	0
212.5	0.0001	10000	1	221.92	0.00	305.54	0
214.5	0.0001	10000	1	222.96	0.00	330.80	0
216.5	0.0001	10000	1	223.35	0.00	421.83	5
218.5	0.0001	10000	1	223.56	0.00	512.76	11
186.5	0.0001	10000	2	210.64	0.00	0.00	0
188.5	0.0001	10000	2	211.46	0.00	0.00	0
190.5	0.0001	10000	2	212.34	0.00	0.00	0
192.5	0.0001	10000	2	213.29	0.00	0.00	0
194.5	0.0001	10000	2	214.30	0.00	0.00	0
196.5	0.0001	10000	2	215.38	0.00	0.00	0
198.5	0.0001	10000	2	216.53	0.00	0.00	0
200.5	0.0001	10000	2	217.73	0.00	0.00	0
202.5	0.0001	10000	2	218.54	0.00	64.15	0
204.5	0.0001	10000	2	218.82	0.00	358.74	0
206.5	0.0001	10000	2	219.04	0.00	420.70	0
208.5	0.0001	10000	2	219.26	0.00	439.64	0
210.5	0.0001	10000	2	219.49	0.00	458.64	0
212.5	0.0001	10000	2	219.77	0.00	480.16	0
214.5	0.0001	10000	2	220.49	0.00	529.21	0
216.5	0.0001	10000	2	220.38	0.00	522.29	0

Tabla 5.3: Primeras filas de la tabla de resultados de laminación.

bién es posible emplear ambos en la estimación de una misma probabilidad ya que las técnicas de fiabilidad requieren de datos que pueden ser estimados mediante juicio de experto.

5.7.2. Estimación mediante técnicas de fiabilidad

Cualquier probabilidad de un modo de fallo que sea modelable mediante un modelo numérico determinista, es candidata a ser evaluada numéricamente mediante técnicas de fiabilidad. Las técnicas de fiabilidad (o análisis de fiabilidad) consisten en propagar las incertidumbres de las entradas a un modelo hasta su resultado, de tal manera que en lugar de un valor determinista, se obtiene una probabilidad.

Un caso paradigmático es el deslizamiento de una presa de hormigón [6], pero existen más aplicaciones. Por ejemplo, Fell et al. [57] desarrollan un árbol de eventos para un modo de fallo por erosión interna. El primer nodo corresponde a la pregunta de si el gradiente existente supera al crítico (para las cargas exteriores consideradas). Esta pregunta se puede responder con un sí o un no (es decir probabilidad 1 a una de las ramas y probabilidad 0 a la otra) si se realiza un modelo completamente determinista de la red de flujo de la presa. Según se vaya introduciendo más parte de la incertidumbre existente en el modelo (por ejemplo, modelación estocástica de la permeabilidad de los materiales) se obtendrán resultados más ajustados y se dejará de tener unas probabilidades de 1 y 0.

En los casos en que se pueda y se opte por llevar a cabo un análisis cuantitativo de las probabilidades condicionales de rotura, los modelos numéricos suelen ir ligados a análisis de tipo Monte Carlo. Las incertidumbres con las que se ha de tratar incluyen: el escenario (niveles de agua, terremotos a considerar, etc.), la manera en que las cargas deben actuar (subpresión, presiones efectivas, etc.) y las propiedades de los materiales. Otra dificultad suele estar en la propia definición de fallo, en particular cuando se estudia el escenario de cargas sísmico. Por lo tanto, aunque el modelo esté construido sobre una base determinista, al menos parte de los parámetros de entrada tienen una estructura estocástica, con lo que la salida del modelo también será de naturaleza estocástica.

Para estimar las probabilidades de rotura se puede utilizar un Monte Carlo crudo o técnicas de diseño de experimentos para reducir el número de ejecuciones del modelo como por ejemplo el Hipercubo Latino. En cualquier caso, el número de realizaciones necesarias para la obtención de una precisión aceptable combinado con el tiempo de ejecución habitual de los modelos, pueden provocar que el problema sea inabordable de forma directa. Una técnica para superar este obstáculo es deducir una función de fallo analítica (superficie límite) a partir de unas pocas ejecuciones del modelo y apoyándose en el juicio ingenieril. También son aceptables en análisis simplificados técnicas como el *First Order Second Moment* (FOSM). Por último, cabe reseñar que además de estudiar la probabilidad de fallo es conveniente correlacionarla con los coeficientes de seguridad.

En la Universidad Politécnica de Valencia, se ha desarrollado una metodología para

la aplicación sistemática de las técnicas de fiabilidad a la hora de estimar probabilidades de fallo que puede ser de ayuda [5].

5.7.3. Estimación mediante juicio de experto

La estimación de probabilidades mediante juicio de experto consiste en recoger la opinión que un individuo tiene respecto de la verosimilitud de un evento. Es por lo tanto una probabilidad subjetiva (ver definición en capítulo 2). Para dar mayor robustez a esta estimación, siempre se realiza un promedio de las estimaciones de varios individuos. Además, existen una serie de reglas de buena práctica que se deben seguir cuando se realizan este tipo de estimaciones (ver apéndice B).

Cuando se estiman las probabilidades mediante juicio de experto, los modelos numéricos también suelen tener un papel relevante. Aunque un modelo numérico no ofrezca directamente una probabilidad de fallo, puede colaborar al entendimiento del problema por parte de los integrantes del proceso. También puede acotar los términos del debate, demostrando que un modo de fallo es más o menos viable, cuantificando el efecto de alguna característica sobre la que se tenga incertidumbre o mediante estudios de sensibilidad. En su papel de informador del proceso de obtención de probabilidades mediante juicio de experto, son válidos tanto los modelos deterministas como los estadísticos o híbridos.

La obtención de probabilidades mediante juicio de experto se presenta con más detalle en el apéndice B.

5.7.4. Metodologías específicas para la estimación de probabilidades de fallo

Con la experiencia que se ha ido acumulando a lo largo de los años en estimación de probabilidades de fallo en presas, han surgido metodologías que de forma más o menos guiada ayudan a estimar probabilidades de fallo. En unas ocasiones se trata de metodologías muy detalladas para un modo de fallo concreto, con tablas y procedimientos que correlacionan distintas variables con probabilidades [57, 22, 28]. En otras, se trata de una colección de recomendaciones, tablas y buenas prácticas que sirven de ayuda a la hora de estimar las distintas probabilidades que pueden surgir en un análisis de riesgo [29].

Otro ejemplo interesante se expone es el desarrollado por Silva et al. [122], en el que se analiza la probabilidad de fallo de taludes. El artículo propone una relación entre el coeficiente de seguridad de un talud y su probabilidad de fallo. En la relación también entran aspectos que provocan incertidumbre como el nivel de control en las obras durante la construcción del talud.

Para llevar a cabo la metodología propuesta primero hay que clasificar el talud según el nivel de conocimiento que se tenga sobre él.

A continuación se debe realizar un modelo numérico del talud, evaluar su coeficiente de seguridad y entrar en una gráfica que relaciona el coeficiente de seguridad con la probabilidad de rotura a partir de la clasificación del nivel de cocimiento. De esta forma, se obtiene una estimación de la probabilidad de rotura. Esta relación se obtuvo con datos de 75 proyectos durante más de cuatro décadas, entre varios expertos y respetando los axiomas de la probabilidad. Es interesante observar que estas curvas tienden a la horizontalidad según aumenta el coeficiente de seguridad. Esto refleja la realidad de que sobredimensionar en exceso una obra no reduce la probabilidad de fallo porque factores como discontinuidades, zonas blandas, zonas húmedas, zonas de altas o bajas permeabilidades y otros elementos que puedan haber pasado desapercibidos en el estudio geotécnico, pasarían a controlar el problema.

5.7.5. Ejemplo

El ejemplo consta de dos modos de fallo. Las probabilidades de fallo por sobrevertido se han estimado directamente a partir de la altura de sobrevertido, utilizando para ello una curva estándar de fallo por sobrevertido para presas de gravedad.

El fallo a deslizamiento ha sido estudiado para dos situaciones diferentes de leyes de supresiones, cuya probabilidad de fallo para cada nivel en el embalse ha sido estimada mediante un modelo de estabilidad de la presa empleando técnicas de Monte Carlo. Una de las situaciones analiza la estabilidad de la presa frente al nivel de agua en el embalse para subpresiones altas (suponiendo una ley triangular) mientras que la otra analiza la estabilidad frente a subpresiones bajas (suponiendo un drenaje de las subpresiones eficaz). La probabilidad de estar en una situación o en la otra se define mediante dos nodos previos, que estiman la probabilidad de que en la presa haya altas subpresiones (30 %) y la probabilidad de que estas puedan ser detectadas y evitadas antes de producirse el deslizamiento (30 %). La probabilidad de estos dos nodos ha sido estimada mediante juicio de experto tras analizar la información disponible respecto al sistema de drenaje y el sistema de auscultación.

La figura 5.17 muestra las curvas de fragilidad de ambos modos de fallo.

5.8. Estudio de hidrogramas de rotura

5.8.1. La estimación de los hidrogramas de rotura en el análisis de riesgo

Dentro del proceso de análisis de riesgo, la estimación de los hidrogramas de rotura se integra en el análisis de las consecuencias (ver figura 5.1). El cálculo de los hidrogramas de rotura debidos al fallo de la presa es el primer paso del análisis de consecuencias. Posteriormente, estos hidrogramas son utilizados para la obtención de las curvas de consecuencias (apartado 5.9).

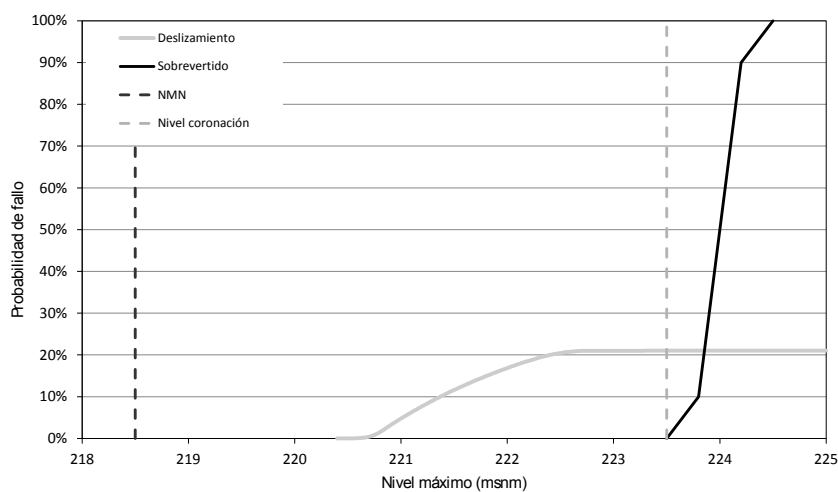


Figura 5.17: Curvas de fragilidad de los dos modos de fallo incluidos en el ejemplo.

El primer paso para estimar los hidrogramas de rotura es determinar la brecha de rotura. Esta brecha podrá ser distinta en función del modo de fallo y su progresión variará también según el nivel de agua que exista en el embalse. Por lo tanto, al contrario que en los estudios que se realizan habitualmente para los Planes de Emergencia, en los que se estudian unos pocos escenarios de rotura (por ejemplo, rotura con el embalse a nivel de coronación), un análisis de riesgo debe contemplar los hidrogramas de rotura correspondientes a todo el rango de niveles de embalse posibles y a cada uno de los modos de fallo.

Una manera habitual de trabajar en los modelos de riesgo es caracterizar los hidrogramas de rotura mediante una variable significativa (normalmente el caudal pico). Esto hace que el trabajo a realizar se divida en dos partes:

- Obtención de una curva que relacione el nivel máximo con alguna variable representativa de los hidrogramas de rotura (por ejemplo, el caudal pico de rotura) para cada modo de fallo. Estas curvas se introducen en el modelo de riesgo.
- Obtención de hidrogramas completos de rotura (no sólo el caudal pico). Estos hidrogramas de rotura no se introducen directamente en el modelo de riesgo sino que se utilizan para el cálculo de las curvas de consecuencias frente a caudal pico (apartado 5.9), que son las que se introducen en el modelo de riesgo.

Para ello, se proponen a continuación dos enfoques según el nivel de detalle al que se quiera trabajar:

Detallado: Se obtienen hidrogramas de rotura para varios niveles de embalse (y para cada MF si afecta al hidrograma de rotura). La curva de caudal pico de rotura en función del nivel de embalse se obtiene correlacionando los caudales pico de los hidrogramas obtenidos con los niveles máximos a los que corresponden.

Somero: Se obtiene un único hidrograma de rotura y se escala para caudales pico de rotura mayores y menores. La curva de caudal pico de rotura en función del nivel de embalse se obtiene a partir de relaciones empíricas (ver apartado 5.8.3).

El nivel de detalle somero puede ser especialmente ventajoso cuando ya se cuenta con uno o varios hidrogramas de rotura, por ejemplo, obtenidos del Plan de Emergencia. En ese caso, la metodología planteada permite obtener los resultados necesarios con poco esfuerzo. Si por el contrario se debe calcular el hidrograma de rotura, el esfuerzo adicional para llevar a cabo la metodología detallada es relativamente pequeño.

5.8.2. Cálculo de hidrogramas de rotura

En la actualidad el ingeniero presístico cuenta con una amplia gama de modelos hidráulicos numéricos que le permiten simular la formación de una brecha en una presa (de materiales sueltos o de hormigón de gravedad) y el consecuente hidrograma de salida, a través de dicha brecha y a lo largo del cauce del río.

Wahl [140] hace una recopilación de los distintos modelos que se han desarrollado, tanto paramétricos como de base física. Actualmente, los modelos paramétricos están muy extendidos y se pueden encontrar integrados dentro de paquetes hidráulicos de ámbito más general como HEC-HMS [115], HEC-RAS [20] o MIKE [39].

5.8.3. Cálculo de los caudales pico mediante relaciones empíricas

Algunos investigadores han usado casos de estudio de fallos en presas para desarrollar ecuaciones empíricas que relacionan los caudales de rotura en función de uno o varios parámetros de la presa o el embalse (altura de la presa, volumen de agua embalsada, altura de agua en el momento de la rotura, etc.).

Entre los métodos más reconocidos destacan los de Kirkpatrick [81], Soil Conservation Service [125], Bureau of Reclamation [21], MacDonald y Langridge-Monopolis [88], Singh y Snorrason [123], Costa [36], Froehlich [59] y Walder y O'Connor [142]. Se puede encontrar información comparando estos métodos en varios trabajos de recopilación [73, 140, 141].

De entre todos los anteriores trabajos, se comenta a continuación brevemente el de Froehlich [59], que desarrolló en 1995 una ecuación de regresión simple para predecir el caudal pico en base al volumen del embalse y su altura, usando datos de 22 casos de los cuales se disponía de información sobre caudales pico:

$$Q_p = 0,607 \cdot V_w^{0,295} \cdot h_w^{1,24}$$

donde Q_p es el caudal pico predicho en m^3/s , V_w es el volumen de agua embalsada en el momento de la rotura en m^3 y h_w es el nivel del embalse calculado desde el punto inferior de la brecha final hasta la superficie de agua en m. La figura 5.18

compara los valores de caudales pico calculados con la ecuación de Froehlich frente a los medidos en los 22 casos de estudio ya mencionados, así como otros 10 casos de estudio que sirven de verificación.

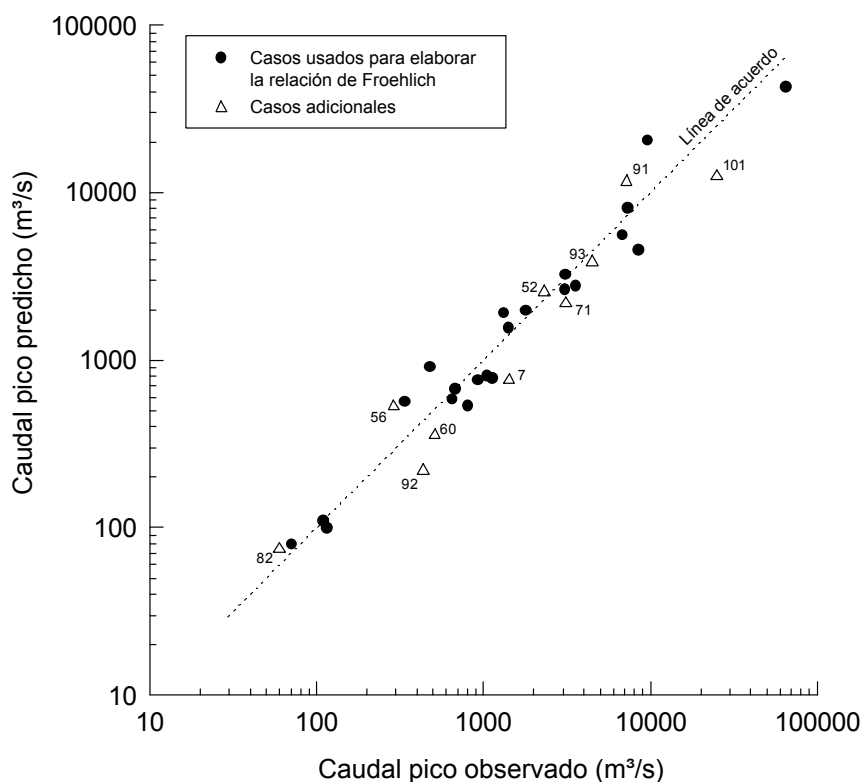


Figura 5.18: Caudales pico observados vs predichos con la ecuación de Froehlich (traducido de [140]).

Por último, merece la pena mencionar que algunos de estos métodos pueden tener un sesgo conservador que no es deseable en un análisis de riesgo. Así, algunos investigadores proponen métodos para ajustar los resultados que se obtienen con estos métodos [32]. En cualquier caso, si se dispone de algún hidrograma calculado por algún método que se considere más exacto, se puede utilizar su caudal pico para escalar la relación que se obtenga mediante la aplicación de relaciones empíricas.

5.8.4. Ejemplo

Para introducir en el ejemplo la relación entre el nivel en el embalse y el caudal máximo de rotura se han utilizado los datos obtenidos a partir de realizar simulaciones hidráulicas de la brecha de rotura con diferentes niveles en el embalse. Las características geométricas de la brecha utilizadas difieren según el modo de fallo, ya que en el deslizamiento la rotura se produce por el centro de la presa, mientras que en el sobrevertido la rotura empieza en los estribos. La figura 5.19 muestra la relación entre nivel máximo alcanzado en el embalse y caudal pico de rotura, que

es la información a introducir en el modelo de riesgo en este punto. Los hidrogramas de rotura se emplean en el siguiente punto para calcular las consecuencias de rotura.

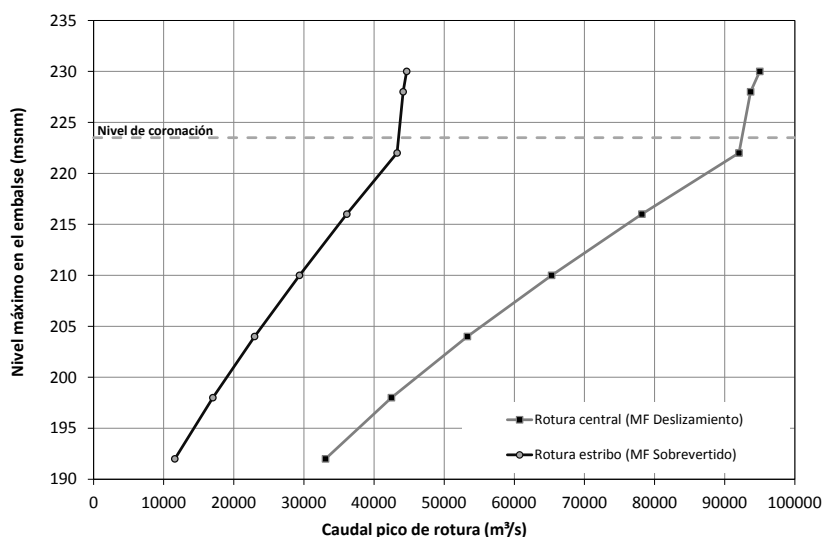


Figura 5.19: Relación entre nivel máximo alcanzado en el embalse y caudal pico de rotura.

5.9. Estudio de consecuencias

5.9.1. La estimación de consecuencias en el análisis de riesgo

Los daños producidos por la rotura de una presa son en general muy elevados, provocando graves consecuencias económicas y en muchos casos la pérdida de vidas. En España, los ejemplos más importantes son la rotura de la presa de Tous en Valencia en el año 1982 [94] y la rotura de la Presa de Vega de Tera en Zamora en 1959. Por tanto, es necesaria una cuantificación de los daños derivados de una posible rotura de la presa que permita incluirlos en el análisis de riesgo.

En la tabla 5.4 se muestra un resumen de las consecuencias que puede producir la rotura de una presa. Estas consecuencias se pueden clasificar según el instante en el que se producen y según la forma de valoración. Por un lado, se pueden dividir en directas o indirectas. Las consecuencias directas son ocasionadas directamente por el impacto de la inundación y son las más visibles. En cambio, las consecuencias indirectas se dan tras el impacto del evento y reflejan la interrupción de la economía y otras actividades en la zona. Además, también se pueden dividir en tangibles o intangibles según si las consecuencias pueden ser valoradas en términos económicos o no.

	Tangibles	Intangibles
Directos	Residencias	Fallecimientos
	Estructuras	Heridos
	Vehículos	Animales
	Agricultura	Servicios públicos y comunicaciones
	Infraestructuras y otras instalaciones públicas	Pérdidas culturales e históricas
	Interrupción de negocios en el área inundada	Daños medioambientales
	Operaciones de rescate y evacuación	
	Costes de limpieza	
Indirectos	Costes de reconstrucción de la presa	
	Daños para compañías fuera del área de inundación	
	Sustitución de la producción a zonas fuera del área inundada	Daño al gobierno
	Viviendas temporales para las personas evacuadas	Trastorno social
	Daños al sistema de gestión de recursos hídricos	
	Consecuencias sobre el sistema eléctrico	

Tabla 5.4: Clasificación general de las consecuencias de una inundación [79].

El énfasis que se ponga en la estimación de cada una de estas consecuencias dependerá en gran medida de los objetivos y el alcance del estudio. Por ejemplo, de cara a la comparación de los resultados de riesgo con recomendaciones internacionales de tolerabilidad de riesgo (capítulo 6), es especialmente relevante la estimación de pérdida de vidas humanas. Sin embargo, de cara a la estimación de la eficiencia de medidas de reducción de riesgo, cobra una gran importancia la estimación de las pérdidas económicas.

El análisis de consecuencias consta de tres partes: estimación de caudales de rotura, estudio de inundación y estimación de consecuencias. El presente apartado trata las dos últimas. El principal objetivo es la obtención de una relación entre el hidrograma de salida de la presa (de rotura y de no rotura) y las consecuencias, ya que de esta forma se pueden relacionar directamente con la situación analizada. Conviene hacer hincapié en que en el modelo de riesgo, las consecuencias serán estimadas para cada caso de estudio en dos ocasiones, para la hipótesis de fallo de la presa y para la hipótesis de no fallo, obteniendo mediante su resta las consecuencias incrementales. En general, las consecuencias se analizan en términos económicos y en pérdida de vidas, por lo que normalmente en el modelo se introducen cuatro curvas, según el tipo de consecuencias y según haya rotura o no.

En este apartado se explica cómo se pueden estimar las consecuencias a partir de los hidrogramas de rotura obtenidos en el apartado anterior para obtener las relaciones entre las consecuencias y los hidrogramas.

Dentro del modelo de riesgo, las consecuencias se pueden introducir utilizando curvas que las relacionen con alguna variable representativa de los hidrogramas de

salida de la presa. En general, una variable adecuada es el caudal máximo evacuado por la presa, ya sea el caudal máximo laminado para la estimación de las consecuencias en caso de no rotura o el caudal pico de rotura para la estimación de las consecuencias de rotura. Esta variable es relativamente fácil de obtener dentro del análisis de riesgos y es una variable clave para definir las características del hidrograma. Además es una variable muy determinante para definir las características de la inundación provocada, ya que normalmente caudales máximos mayores provocan inundaciones en áreas más grandes, con mayores profundidades y, por lo tanto, mayores costes.

5.9.2. El proceso de estimación de consecuencias

La estimación de consecuencias tiene como base los hidrogramas de salida de la presa obtenidos de la laminación de las avenidas (apartado 5.6) y los hidrogramas de rotura (apartado 5.8), como se muestra en la figura 5.20.

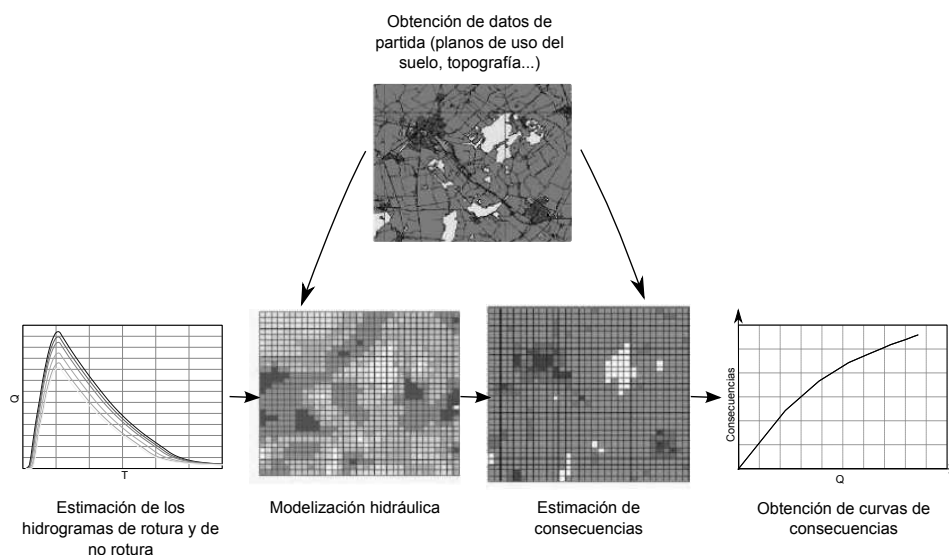


Figura 5.20: Procedimiento general para la estimación de consecuencias de inundación.

A partir de estos datos se realiza una modelización hidráulica de la inundación para aplicar las diferentes metodologías de estimación de consecuencias. En este documento se han agrupado las consecuencias de la siguiente forma:

- Pérdida de vidas: estimación del número de víctimas producidas por la rotura de la presa. Como ya se ha indicado, las recomendaciones existentes sobre tolerabilidad de riesgo dan un gran peso a este tipo de consecuencias. Por su relevancia se ha dedicado un apéndice a detallar las metodologías existentes (apéndice C).
- Consecuencias económicas: incluye las consecuencias económicas directas producidas por la onda de inundación, las consecuencias indirectas provocadas

por la inundación y las pérdidas por la inexistencia de la presa. Por su relevancia se ha dedicado un apéndice a detallar las metodologías existentes (apéndice D).

- Otras consecuencias: existen una serie de daños que no se pueden incluir dentro de los daños económicos y la pérdida de vidas como son los daños medioambientales, los daños al patrimonio histórico-cultural y los daños sociales [13]. Estos daños son difíciles de cuantificar numéricamente y por lo tanto difíciles de integrar en un análisis cuantitativo pero es importante tenerlos en cuenta. De hecho, actualmente no existe una metodología sencilla y general que permita estimar estas consecuencias. A pesar de ello, los daños medioambientales deben ser incluidos en los procesos de decisión debido a su gran importancia social [137]. Es más, en la Directiva Europea 2007/60/EC para el Cálculo y la Gestión de los Riesgos de Inundación, se especifica que los riesgos medioambientales también deben ser incluidos en los análisis. A día de hoy no es práctico integrar numéricamente este tipo de daños dentro de un modelo de riesgo cuantitativo, pero sí es posible y conveniente estudiar de forma cualitativa los impactos produciríann para los distintos eventos que se dan en un análisis de riesgo.

Los valores obtenidos de estos daños permiten obtener las curvas de caudal frente a consecuencias necesarias para la introducción de las consecuencias en el análisis de riesgos (apartado 5.9.3).

En cuanto a la modelización hidráulica, las características especialmente importantes para la estimación de consecuencias son el tiempo de llegada de la onda de inundación, la velocidad máxima, el calado máximo y el tiempo en el que se produce este calado. Además, también pueden ser útiles otros datos como la velocidad de subida de niveles y la duración de la inundación.

Existe una gran variedad de modelos hidráulicas para realizar este tipo de modelaciones. Para una correcta elección del modelo es importante prestar atención al tipo de régimen, tipo de flujo y al tratamiento del régimen rápidamente variable [96]. Para facilitar la elección según el caso analizado, ICOLD [73] analiza 27 modelos hidráulicos diferentes, explicando su funcionamiento, propiedades y cómo se adecua cada uno de ellos a las características de la onda de inundación.

Además, es necesario caracterizar correctamente el cauce geométricamente a partir de la cartografía disponible y elegir correctamente los perfiles transversales necesarios en la modelación para que representen adecuadamente la variabilidad existente. También deben estudiarse en detalle los parámetros introducidos en el modelo, especialmente el coeficiente de rugosidad [4].

Aprovechamiento de estudios existentes

En España, el documento que habitualmente dispone de más datos para la estimación de consecuencias es el Plan de Emergencia. Dentro de este documento se pueden encontrar la siguiente información útil [96]:

- Mapas de inundación para diferentes escenarios.
- Listado de afecciones producidas por la inundación.
- Caudal que produce las primeras afecciones importantes y que marca el punto de inicio de las curvas caudal-consecuencias.

Estos datos pueden ser utilizados para realizar una primera estimación de las consecuencias en un nivel de detalle somero. Además, pueden servir de base para análisis de consecuencias más detallados.

5.9.3. Obtención de curvas de consecuencias

El objetivo final de la evaluación de consecuencias es la obtención de curvas que relacionen el hidrograma de salida de la presa con las consecuencias producidas, de forma que se puedan obtener los riesgos. Para asociar consecuencias a cada hidrograma se suele utilizar el caudal máximo desaguado para caracterizar la inundación, ya que los daños provocados dependerán en gran medida de este valor.

Con el fin de obtener estas curvas se deben estudiar diferentes inundaciones, con diferentes caudales máximos, de forma que se obtengan las consecuencias para cada inundación obteniendo puntos de la curva que se quiere calcular. El número de puntos que tenga la curva corresponde con el número de inundaciones que se estudien. Cuantos más puntos se estudien, mejor definida quedará la curva y más exactos serán los resultados de riesgos obtenidos, por lo que depende del grado de detalle con el que quiera realizarse el análisis de riesgos. En general, se recomienda utilizar al menos 4 ó 5 puntos, ya que si no la forma de la curva podría no quedar correctamente definida.

En ocasiones estas curvas muestran una forma en S, como en el ejemplo de la figura 5.21. Esto es debido a la influencia de las curvas calado-daños y severidad-calados empleadas, que suelen seguir esta forma. A pesar de esto, la forma puede variar, ya que también depende de las características de la inundación. Por ejemplo, la curva de consecuencias puede aumentar casi verticalmente si a partir de un cierto caudal se sobrepasa un dique que se encuentra protegiendo a una población que se halle por debajo del nivel del agua de la inundación, ya que a partir de este caudal toda la población quedaría completamente inundada. Es importante estudiar la forma de la curva estudiada y comprobar que los cambios en su forma corresponden con lo que ocurre en la inundación.

En general, las consecuencias se caracterizan por dos curvas, una que relacione el caudal con las consecuencias económicas y otra con la pérdida de vidas. Para la curva caudal-consecuencias económicas, los puntos se obtienen al sumar las consecuencias económicas directas, las indirectas, los daños debidos a la inexistencia de la presa y el coste de reconstrucción de la presa. En el caso de la curva caudal-pérdida de vidas, los puntos se obtienen de forma directa con la metodología de estimación de la pérdida de vidas.

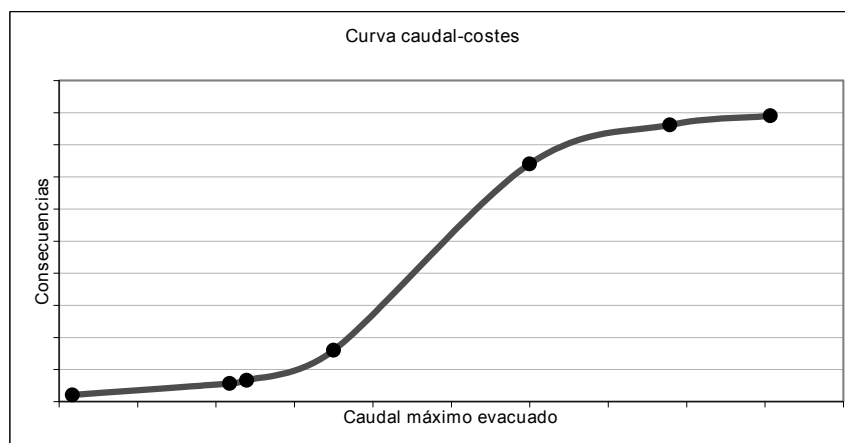


Figura 5.21: Forma típica de una curva caudal-consecuencias.

Además, en el Archivo Técnico de la Presa, por ejemplo en el Plan de Emergencia, pueden aparecer algunos datos que permitan obtener puntos de la curva directamente, sin cálculos. Por ejemplo, si aparece un caudal a partir del cual se empiezan a producir consecuencias considerables, este punto puede ser tomado como el de inicio de la curva.

En general, para el análisis de riesgos son necesarias las consecuencias incrementales, es decir, la diferencia entre las consecuencias si falla la presa o si no. Teniendo en cuenta que la forma de los hidrogramas puede cambiar mucho entre un hidrograma laminado y un hidrograma de rotura, puede ser necesario calcular curvas de caudal-consecuencias distintas para el caso de no rotura y para el de rotura, e incluso una curva distinta para cada modo de fallo. Además, en las consecuencias económicas asociadas a la rotura de la presa, será necesario incluir los daños sobre la propia estructura.

5.9.4. Ejemplo

La estimación de consecuencias en el ejemplo ha sido realizada a partir de las modelizaciones hidráulicas de la inundación para diferentes niveles en el embalse, definiendo la profundidad máxima del agua, el caudal máximo y el tiempo de llegada de la onda en la zona inundada para cada uno de los casos. El modelo hidráulico utilizado es el empleado para elaborar el Plan de Emergencia de la presa.

Para estimar las consecuencias económicas se ha empleado la metodología del PATRICOVA [35], en la que se estima un valor de destrucción total para cada zona inundada que después se multiplica por un coeficiente de daños en función del calado que se alcance en la zona. Este cálculo se ha basado en las afecciones identificadas en el Plan de Emergencia. Los resultados se muestran en la figura 5.22.

Para estimar la pérdida de vidas se ha empleado la metodología SUFRI [49]. Las tasas de este método se han adaptado para poder observar diferentes grados de

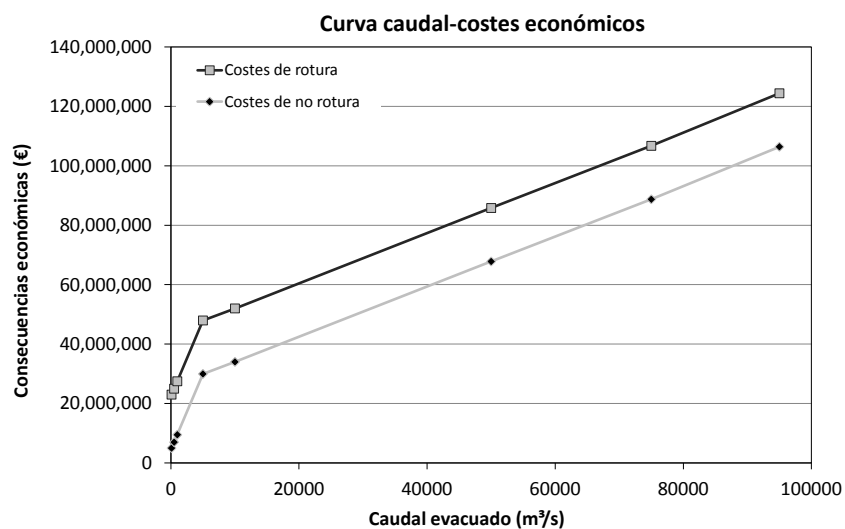


Figura 5.22: Estimación de consecuencias económicas.

entendimiento de la severidad de la inundación en función de los sistemas de aviso, la existencia o no de un Plan de Emergencia y la coordinación entre los servicios de emergencia y autoridades y la formación de la población. Los resultados se muestran en la figura 5.23.

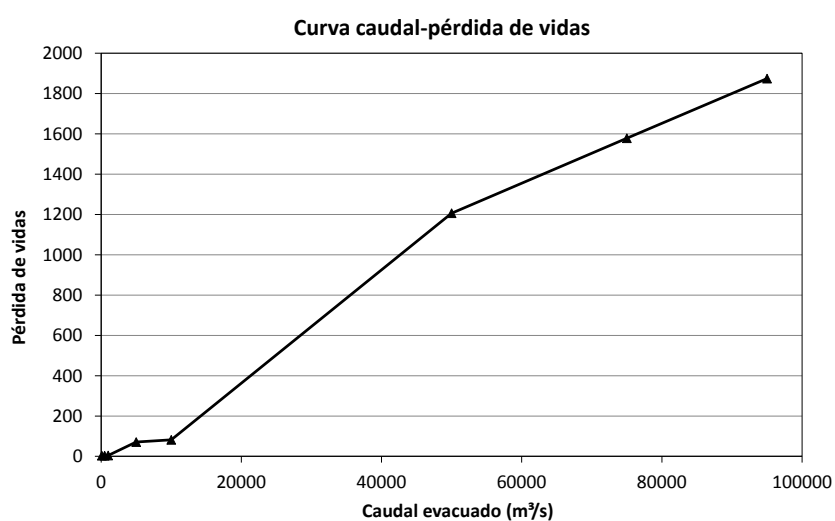


Figura 5.23: Estimación de pérdida de vidas.

5.10. Cálculo de riesgo

5.10.1. Planteamiento

Una vez se tienen todas las entradas al modelo de riesgo, se debe llevar a cabo el cálculo de riesgo. En general se realiza un cálculo para la situación actual (a veces se denomina *caso base*) en primer lugar. Con este cálculo se puede proceder a realizar la evaluación de riesgo de la situación actual (ver capítulo 6).

A continuación se modifica el modelo de riesgo para reflejar el impacto de las distintas medidas de reducción de riesgo que se quieran evaluar y se vuelve a realizar el cálculo para cada una de ellas. La diferencia entre la situación con medida y la situación sin medida es el impacto en riesgo de la medida.

Los resultados a obtener del cálculo son todos aquellos que puedan ser útiles para caracterizar la presa: probabilidad de fallo, pérdida de vidas anualizada, pérdidas económicas anualizadas, consecuencias mínimas y máximas, curvas f_N y curvas F_N . Estos resultados se pueden obtener en términos totales, de fallo y no fallo e incrementales (ver capítulo 2). Es útil también obtener muchos de estos resultados clasificados según distintas variables, por ejemplo, por modo de fallo o por nivel de embalse.

En cuanto al cálculo en sí, el procedimiento es en principio conceptualmente sencillo. La probabilidad de cada rama del árbol de eventos se obtiene como la multiplicación de todas las probabilidades condicionales de las subramas que la forman. El riesgo de cada rama es la multiplicación de su probabilidad por el valor de la variable que represente las consecuencias. La probabilidad de fallo y el riesgo totales se pueden obtener sumando los resultados de todas las ramas.

Además de lo dicho hasta ahora, existen algunas consideraciones específicas del cálculo de riesgo en seguridad de presas a tener en cuenta a la hora de realizar un cálculo.

Discretización de variables continuas

Algunas de las variables que aparecen en los modelos de riesgo, como pueden ser el nivel de embalse o el periodo de retorno de una avenida, son continuas. Cuando se plantea su modelización en un árbol de eventos se deben discretizar dichas variables mediante varias ramas. Cada una de estas ramas representará un rango de valores que dicha variable puede tomar. Para los cálculos posteriores, se tendrá que tomar en dicha rama un valor representativo, que habitualmente será el valor medio del rango. La probabilidad de cada rama será la probabilidad de estar en cualquiera de los valores de su rango. Si se dispone de una curva de probabilidad de excedencia (PE) de la variable modelada, la probabilidad de que la variable se encuentre entre v_i y v_{i+1} , es decir, la probabilidad de la rama i se puede calcular como $PE(v_i) - PE(v_{i+1})$.

La figura 5.24 es un ejemplo de cómo se discretiza una variable continua, en este caso el nivel de embalse. Se parte de una relación entre nivel de embalse y probabilidad de excedencia, que va de $PE = 1$ para el nivel mínimo a $PE = 0$ para el nivel máximo. Como ejemplo, se discretiza en 10 intervalos. Cada uno de estos intervalos se convierte en una rama, cuya probabilidad y nivel representativo se calculan como se ha explicado.

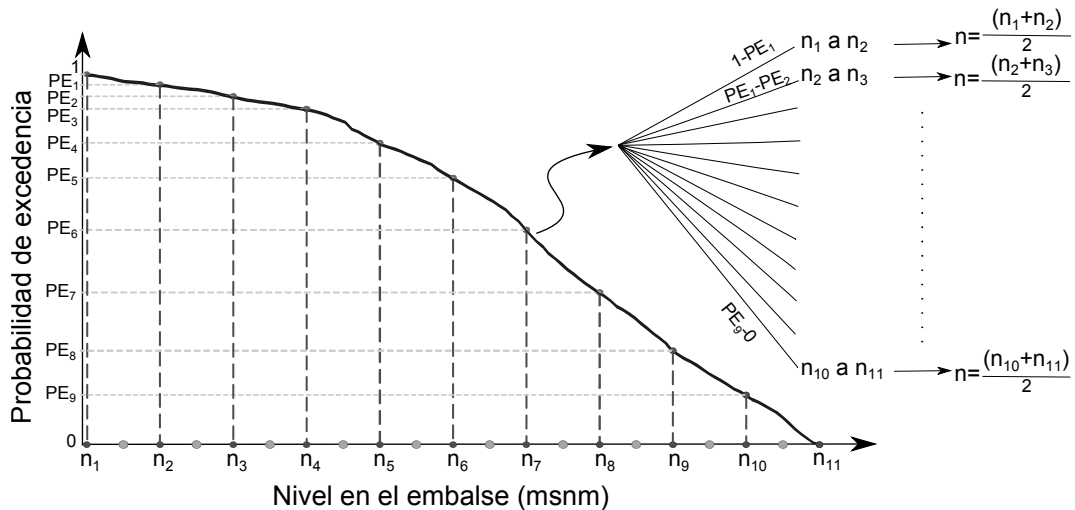


Figura 5.24: Ejemplo de discretización de una variable continua.

Cuando se realiza la partición de una variable continua en intervalos, se consigue una mayor precisión cuanto más pequeños sean éstos. Consecuentemente esto lleva a tener más ramas en el árbol de eventos. Si el árbol de eventos se fuera a resolver de manera manual, el número de intervalos tendría que ser forzosamente pequeño. Con el empleo de software que automatice los cálculos, esto deja de ser un problema. Por otra parte, los intervalos no tienen porqué ser equidistantes y a igual número de intervalos, su distribución puede ser muy importante para conseguir una buena precisión en los resultados.

Ajustes relativos a la consideración de varios modos de fallo

Cuando se estudian presas con varios modos de fallo, se deben tener en cuenta algunas consideraciones específicas como son los ajustes por causa común y la congelación de variables. Se incluye a continuación una exposición de estos conceptos y de cómo afectan a los cálculos aquí discutidos. Para más información, se puede consultar [71].

Una herramienta numérica que pretenda poder realizar cálculos de riesgo en el campo de seguridad de presas, debe ser capaz de realizar los ajustes que se exponen a continuación.

- **Ajuste de causa común.** Cuando dentro de un escenario existen k modos de fallo no mutuamente excluyentes entre sí (con una probabilidad condicional

individual p_i), la probabilidad total de rotura en el escenario se encuentra entre los límites fijados por el Teorema de los límites unimodales [92]. Dicho teorema es pues una forma de acotar la magnitud de la probabilidad total de rotura en escenarios que derivan de una causa común:

$$\max(p_i) \leq p_r^e \leq 1 - \prod_{i=1}^k (1 - p_i)$$

Si se decide realizar un ajuste por el límite inferior, una opción con sentido físico es mantener sin ajustar la probabilidad del modo de fallo más probable y reducir el resto de probabilidades a 0. Esto se corresponde con un proceso de dominancia y equivale a decir que si la presa rompe, romperá antes por ese determinado modo de fallo, no dando lugar a que pueda romper por los demás. La figura 5.25 ilustra la situación mediante un diagrama de Venn.

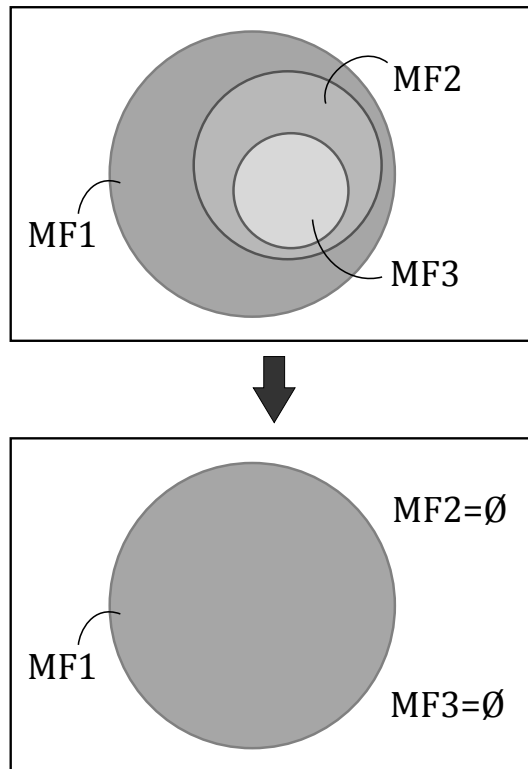


Figura 5.25: Diagrama de Venn del ajuste de causa común por el límite inferior.

Si se decide realizar un ajuste por el límite superior, se pueden ajustar todos los modos de fallo en la misma medida para que la suma de probabilidades sea igual a la calculada mediante el límite superior. El diagrama de Venn de la figura 5.26 muestra esta situación. También es posible realizar algún tipo de promedio entre ambos ajustes.

En muchas ocasiones, al no haber ninguna razón de peso para decantarse por uno de los dos tipos de ajuste, se toma la media de ambos.

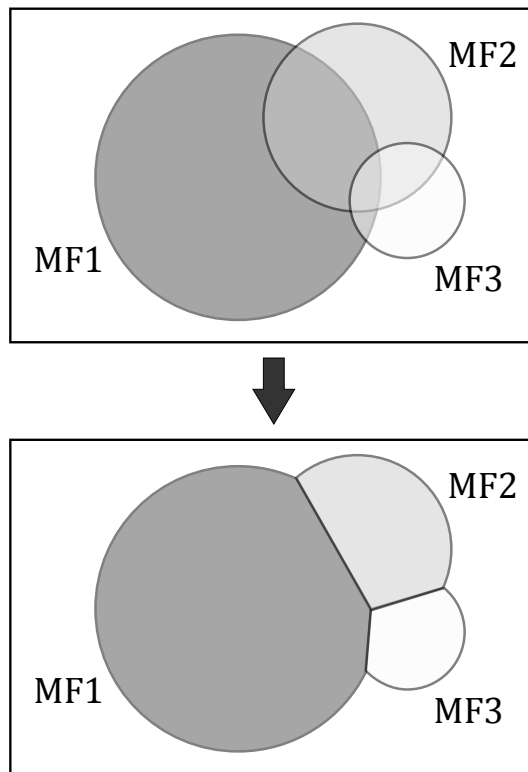


Figura 5.26: Diagrama de Venn del ajuste de causa común por el límite superior.

- **Congelación.** Este ajuste se realiza para corregir una limitación del cálculo de árboles de eventos tal como se plantea habitualmente. En un escenario hidrológico la solicitación que supone una avenida es un proceso que se desarrolla en el tiempo. Esto se puede apreciar por ejemplo en el embalse, que parte de un cierto nivel y va subiendo (relativamente despacio) hasta alcanzar su máximo nivel (para ese episodio). Es posible que para un cierto nivel haya unos modos de fallo con mayor probabilidad de rotura y que esta distribución sea distinta para otro nivel superior. Sin embargo existe la posibilidad de que no se llegue a alcanzar ese segundo nivel porque la presa rompa antes de alcanzarlo.

Este proceso en el tiempo es intrínsecamente difícil de modelar mediante árboles de eventos y la aproximación que puede seguirse para corregir esta simplificación es suponer que cuando se alcanza una probabilidad total de rotura de 1 para un cierto nivel, se mantenga la distribución de probabilidades de rotura por modos de fallo, congelándolas para niveles superiores. Esta congelación también puede extenderse a otras variables como por ejemplo el caudal de rotura.

Sin embargo hay que enfatizar que este enfoque sigue siendo una aproximación y que en casos como el escenario sísmico donde las cargas son prácticamente instantáneas no tiene sentido aplicarlo.

Cálculo de sistemas de presas

Mediante el análisis de riesgos también es posible llevar a cabo el cálculo de sistemas de varias presas, de tal forma que se capturen los efectos que unas presas tienen sobre otras.

Sin embargo, es conveniente advertir que los cálculos de sistemas de presas son computacionalmente muy costosos. Esto es debido a la naturaleza de los árboles de eventos. Por ejemplo, supónganse dos presas a y b con unos árboles de eventos de n_a y n_b ramas respectivamente. Si se analizan por separado, entre los dos árboles de eventos se habrán tenido que calcular $n_a + n_b$ ramas. Por contra, si se analiza el sistema, el árbol de eventos puede llegar a tener $n_a \cdot n_b$ ramas (suponiendo que no compartan ningún nodo). Como n_a y n_b suelen ser números muy altos, entonces $n_a \cdot n_b \gg n_a + n_b$.

Para más información acerca del cálculo de sistemas de presas se puede consultar [121].

5.10.2. Ejemplo

Una vez se tienen todas las entradas al modelo de riesgo, se puede realizar el cálculo de riesgo en el ejemplo.⁴

Aunque se pueden sacar muchos más resultados del modelo, a modo de ejemplo se muestra la probabilidad anual de rotura, el riesgo económico incremental y el riesgo social incremental en la tabla 5.5. También se muestran los resultados de riesgo sobre un gráfico fN (figura 5.27) y sobre un gráfico FN (figura 5.28).

	Modo de fallo		TOTAL
	Sobrevvertido	Deslizamiento	
Probabilidad de rotura [año ⁻¹]	2.13E-06	3.68E-05	3.89E-05
Riesgo económico [€/año]	1.57E+02	4.28E+03	4.44E+03
Riesgo social [vidas/año]	2.18E-03	6.71E-02	6.93E-02

Tabla 5.5: Resultados de riesgo incremental del ejemplo descompuestos por modo de fallo.

5.11. Niveles de detalle

En función del alcance del análisis que se esté llevando a cabo, tendrá sentido emplear un nivel de detalle mayor o menor. En general, el nivel de detalle debe ser

⁴Todos los cálculos de riesgo que se muestran en este documento han sido realizado usando el software iPresas [117, 120, 75].

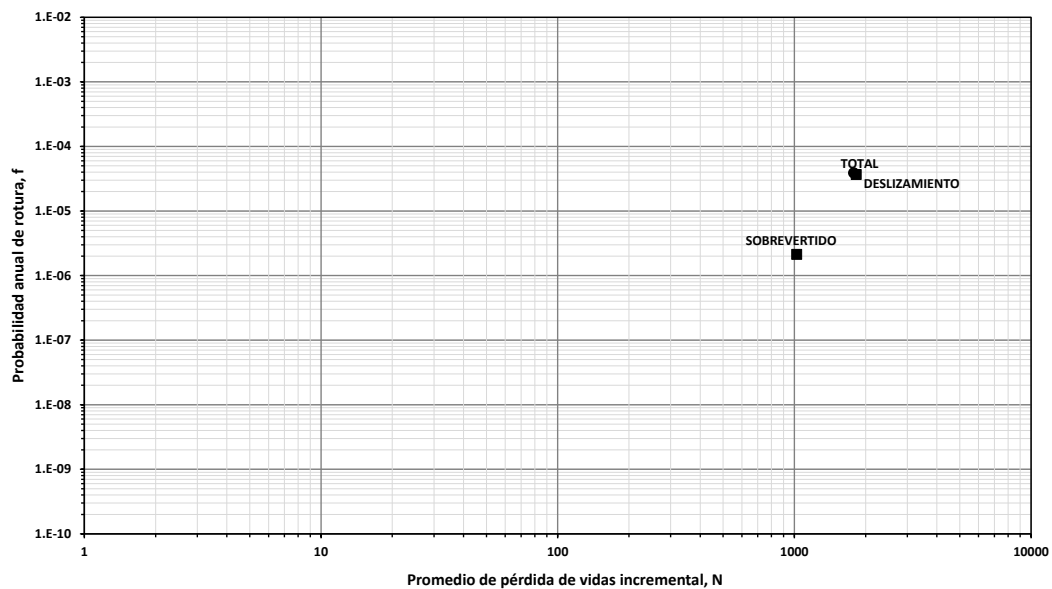


Figura 5.27: Gráfico fN con los resultados del ejemplo.

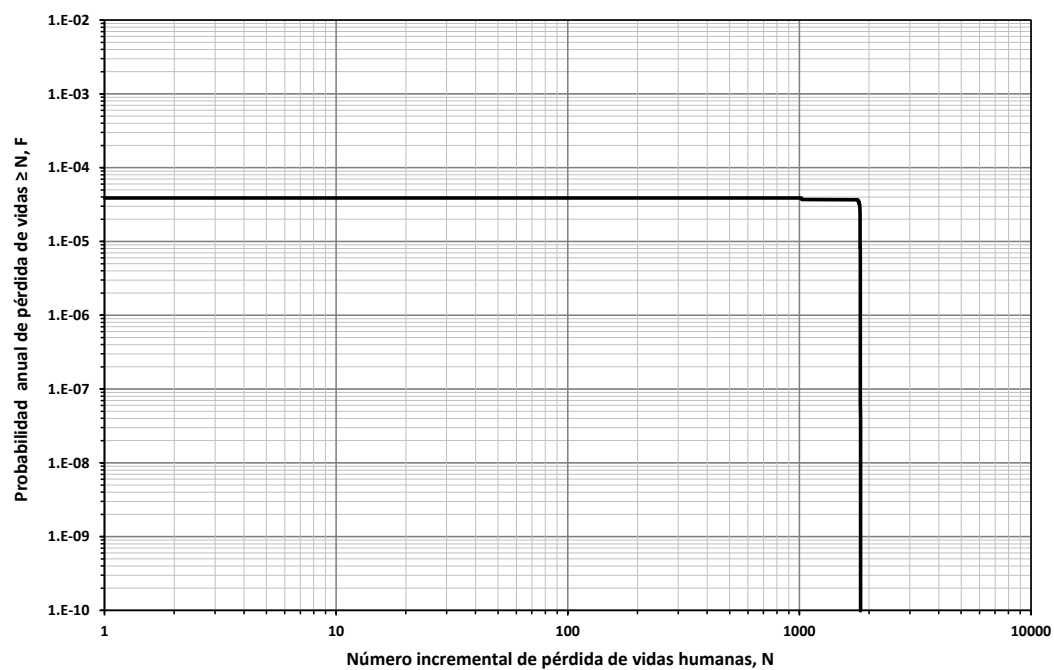


Figura 5.28: Gráfico FN con los resultados del ejemplo.

razonablemente homogéneo entre las distintas partes de un análisis, dedicando más esfuerzos a aquellas variables que vayan a influir más en el resultado final. Una forma de averiguar cuáles son esas variables es partir de un modelo sencillo y hacer análisis de sensibilidad sobre las distintas variables para identificar cuáles son más influyentes. La misma reflexión es de aplicación para los niveles de detalle en el análisis de diversas presas dentro de un conjunto de presas.

A modo de orientación se incluye la tabla 5.6 (adaptado de [50]) donde se dan algunas indicaciones acerca de lo que constituye un nivel de detalle simplificado, intermedio o avanzado en las distintas componentes de un modelo de riesgo.

<i>Componente del modelo</i>	<i>Simplificado</i>	<i>Intermedio</i>	<i>Avanzado</i>
<i>Avenidas</i>	Hidrogramas disponibles y extrapolación en su caso	Análisis de incertidumbre sobre la hidrología existente	Hidrología estacional incorporando análisis de incertidumbre
<i>Sismos</i>	Análisis simplificado con aceleración horizontal	Análisis dinámico con sismos sintéticos	Análisis dinámico + Estudio sismotectónico
<i>Nivel Previo</i>	Nivel Máximo Normal	Ajuste de niveles históricos	Simulación de aportaciones y demandas
<i>Fiabilidad de compuertas</i>	Valores genéricos recomendados	Árboles de fallo sencillos	Árboles de fallo complejos
<i>Laminación</i>	Caudal desaguado igual al entrante hasta máxima apertura	Normas de Explotación o procedimientos contrastados de actuación	Incorporación del “sistema” de explotación
<i>Modos de fallo</i>	Sobrevertido	Sobrevertido Erosión interna en PMS Deslizamiento en PHG	Todos los resultantes de sesiones de juicio experto
<i>Probabilidades de fallo</i>	Curvas de referencia existentes	Juicio experto	Modelos numéricos y simulaciones Montecarlo
<i>Hidrogramas de rotura</i>	A partir de los supuestos del Plan de Emergencia	Juicio experto distinguiendo para cada modo de fallo	Modelos numéricos y simulaciones de Montecarlo
<i>Consecuencias</i>	Métodos empíricos (daños) + interpolación de Planes de Emergencia	Métodos empíricos (daños) + simulación hidráulica de la respuesta del cauce	Métodos de simulación (daños) + simulación hidráulica de la respuesta del cauce
<i>Incetidumbre en estimación de riesgo</i>	Sólo análisis de sensibilidad	Incetidumbre sobre las variables más relevantes	Análisis completo de incetidumbre natural y epistémica

Tabla 5.6: Niveles de detalle en un análisis de riesgo (adaptado de [50]).

Capítulo 6

Evaluación de riesgo y ayuda a la toma de decisiones

6.1. Introducción

Como ya se adelantó en el capítulo 2, la Evaluación de Riesgo es el proceso por el cual se evalúa la importancia del riesgo asociado a la rotura de una presa.

En España, no existe ningún criterio legal o recomendación que fije límites cuantitativos a la hora de realizar una evaluación de riesgo. Por lo tanto, a la hora de llevar a cabo dicha evaluación, es habitual comparar los riesgos estimados con las recomendaciones publicadas por diversos organismos internacionales. Aunque no se debe asumir que las recomendaciones de tolerabilidad de una determinada organización sean directamente aplicables a otra, estas recomendaciones pueden ser una referencia útil de manera general. Esto es así para cualquier tipo de recomendación, pero más aún en el caso de recomendaciones de tolerabilidad de riesgo, donde se mezclan factores como la protección pública, la imagen del responsable de las presas o valoraciones económicas.

Aunque existen más recomendaciones, se van a exponer aquí las más empleadas actualmente, que son los propuestos por el USBR (United States Bureau of Reclamation) [27], el ANCOLD (Australian Committee on Large Dams) [13] y el USACE (United States Corps of Engineers) [100]. Además de estas tres recomendaciones, las más destacables podrían ser las empleadas en Holanda por tener rango legal (ver [139]) y las recomendaciones británicas [69] por ser de las que emanan muchos de los conceptos que se manejan actualmente en evaluación de riesgos.

Se debe incidir en el carácter de *recomendaciones* que tienen los documentos que se exponen a continuación. Por ejemplo el USBR [27] dice explícitamente que en ningún caso se trata de criterios prescriptivos, sino de recomendaciones (*broad advisory guidance*) y que debido a la naturaleza aproximada de los cálculos, un riesgo que se encuentre justo por debajo de un umbral debe ser tratado igual que un riesgo que se encuentre justo por encima.

6.2. Recomendaciones de tolerabilidad del USBR

El USBR es un organismo que ya cuenta con una larga trayectoria aplicando la metodología de Análisis de Riesgo. Ya en 2003 contaba con un documento [24] con recomendaciones para evaluar la tolerabilidad del riesgo en sus presas. En el año 2011, estas recomendaciones se actualizaron en un nuevo documento [27] que se comenta a continuación.

Básicamente, el USBR establece sus recomendaciones de tolerabilidad en base a: la probabilidad anual de rotura (que a efectos prácticos considera equivalente al riesgo individual) y el valor esperado de pérdida de vidas humanas (riesgo anual). Sus recomendaciones se pueden resumir en un gráfico f-N, que se muestra en la figura 6.1.

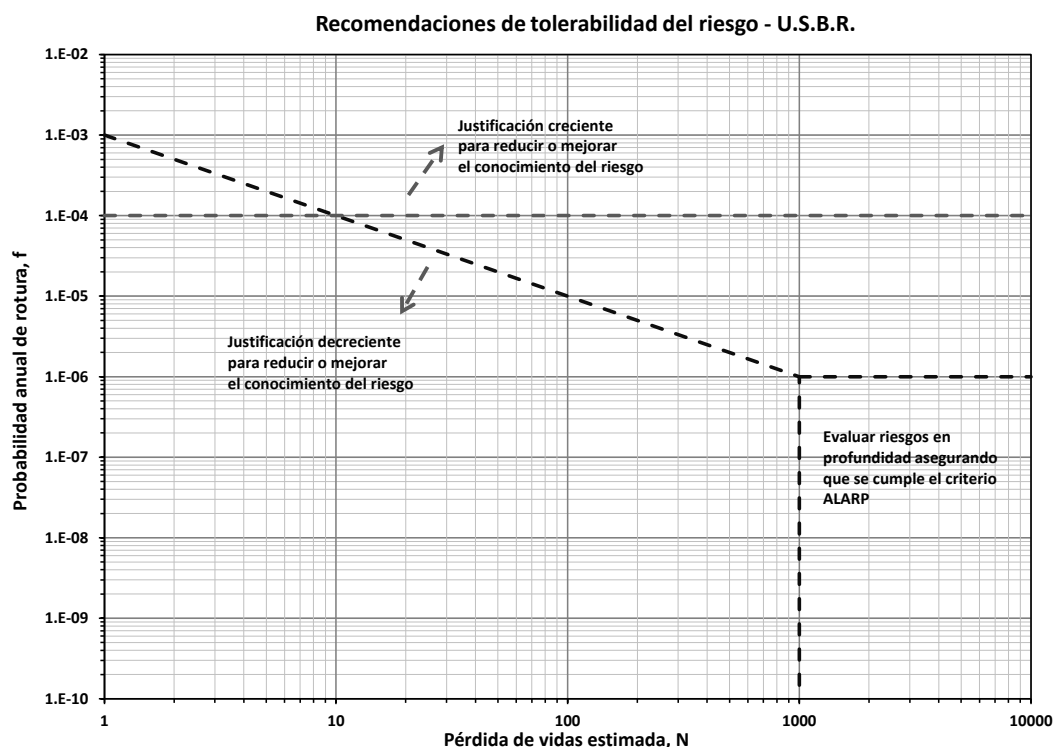


Figura 6.1: Gráfico para la representación de la estimación de probabilidad de rotura, pérdida de vidas y riesgo (traducido de USBR [27]).

6.3. Recomendaciones de tolerabilidad del ANCOLD

En ausencia de otras recomendaciones, el ANCOLD [13] propone tres recomendaciones de tolerabilidad de riesgo:

- Se limita el riesgo de la persona más expuesta a 10^{-4} al año para presas existentes y a 10^{-5} al año para nuevas presas o grandes recrecimientos (*riesgo inaceptable*). En la práctica, es habitual equiparar este valor a la probabilidad de rotura.
- Se limita el riesgo social mediante un gráfico FN, que se muestra en la figura 6.2. Cuando los riesgos quedan por encima del límite, se dice que el riesgo es inaceptable *excepto en circunstancias excepcionales*. Según ANCOLD la decisión de cuándo existen dichas circunstancias excepcionales no debe ser del propietario de la presa sino de el gobierno o el organismo regulador de presas. Por ejemplo, unos riesgos altos que normalmente serían inaceptables, podrían ser tolerables si son necesarios para asegurar unos beneficios excepcionales, pero no es el propietario de la presa el responsable de realizar este juicio.

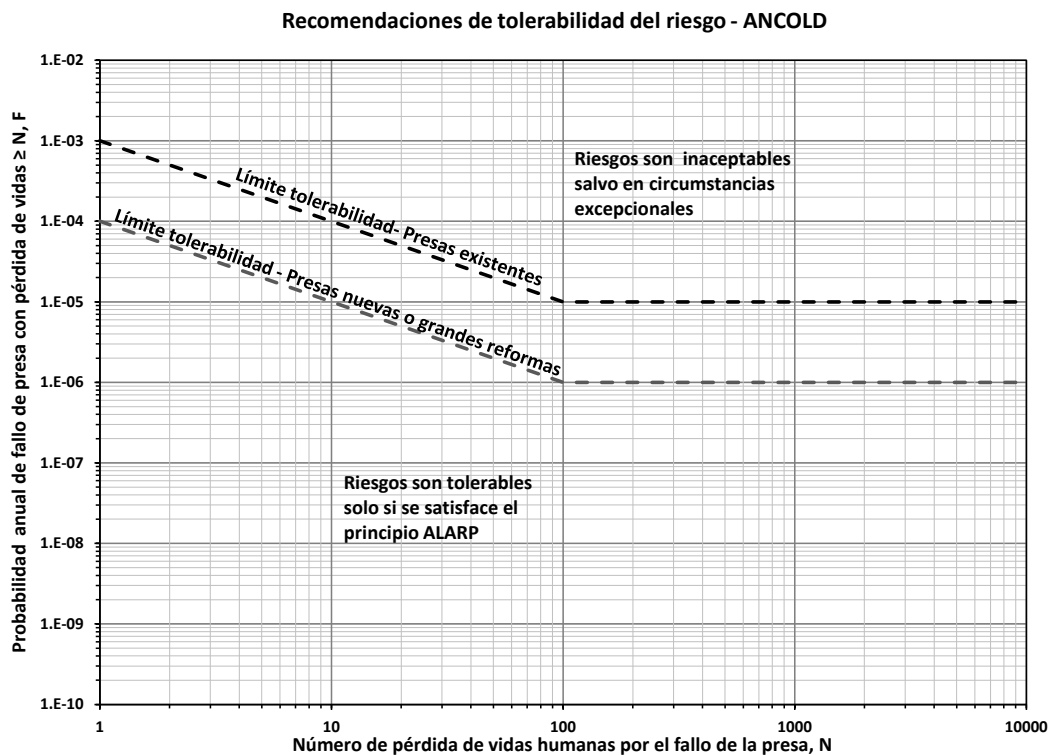


Figura 6.2: Recomendaciones de tolerabilidad sociales del ANCOLD (traducido de [13]).

- En cualquier caso, se debe aplicar siempre el criterio ALARP. En este aspecto, sugiere como medida cuantitativa el uso el coste por vida salvada ajustado y sin ajustar (ver apartado 6.5).

En cuanto al riesgo económico (y los riesgos intangibles), dice que se debe limitar, aunque no fija ningún criterio y lo deja en manos de los responsables de cada presa.

6.4. Recomendaciones de tolerabilidad del USACE

En 2009 el USACE presentó unas recomendaciones de tolerabilidad provisionales que había desarrollado junto con el USBR y el FERC (*Federal Energy Regulatory Commission*) con el objetivo de llegar a un marco de referencia común. Estas recomendaciones están basados en las del USBR, el ANCOLD y el NSW [102].

Básicamente, se adoptan las recomendaciones de riesgo del USBR y una versión modificada de la recomendación FN del ANCOLD, que se muestra en las figuras 6.3 (presas existentes) y 6.4 (presas nuevas o grandes modificaciones). Son de aplicación los mismos comentarios respecto al calificador “*excepto en circunstancias excepcionales*” que los hechos en las recomendaciones del ANCOLD, con la única excepción de que aquí se aplican adicionalmente a los casos en que se superen las 1000 víctimas, independientemente de la probabilidad de ocurrencia.

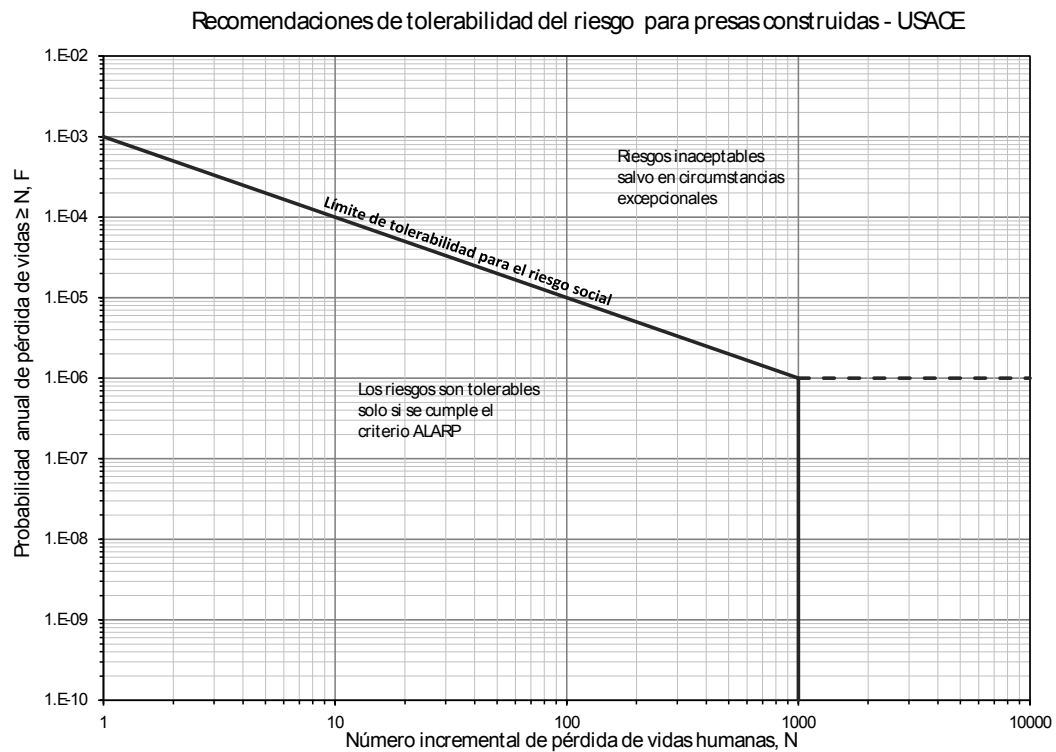


Figura 6.3: Guía de riesgo social para presas existentes (USACE [100]).

6.5. Indicadores de eficiencia

Los indicadores de eficiencia tienen un doble propósito: servir como guía cuantitativa para materializar el criterio ALARP y servir como variables de optimización para priorizar entre diferentes alternativas de reducción de riesgo.

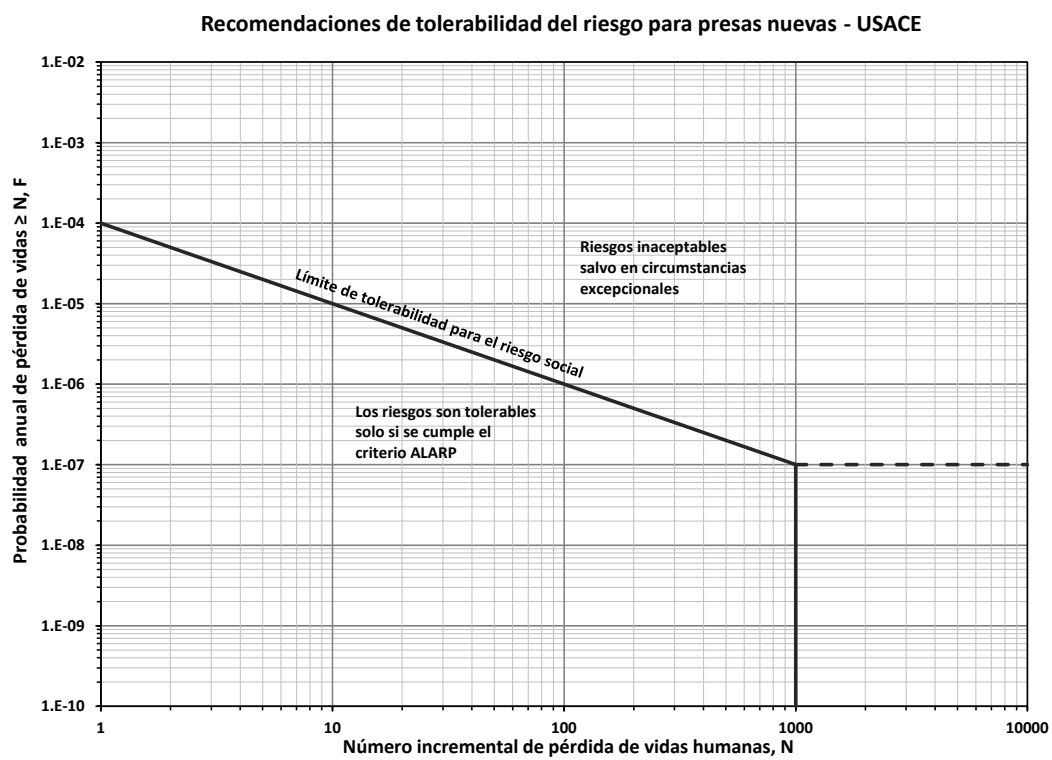


Figura 6.4: Guía de riesgo social para nuevas presas o grandes modificaciones (USACE [100]).

Como guía para materializar el criterio ALARP, son tres los indicadores que más se emplean:

Coste por vida estadística salvada. Se conoce normalmente por sus siglas en inglés: *CSSL* (*Cost to Save a Statistical Life*) o *CSLS* (*Cost per Statistical Life Saved*). También aparece escrito con la letra *U* de *unadjusted* (sin ajustar) delante o detrás para diferenciarlo del siguiente indicador. Para calcularlo se emplea la siguiente fórmula:

$$CSLS = \frac{C_A - (O_{cb} - O_A)}{R(v)_{cb} - R(v)_A}$$

donde C_A es el coste anualizado de la medida de reducción (€/año), O_{cb} es el coste de explotación existente (€/año), O_A es el coste de explotación tras la medida (€/año), $R(v)_{cb}$ es el riesgo anual en vidas humanas en el caso existente (vidas/año) y $R(v)_A$ es el riesgo anual en vidas humanas tras implantar la medida (vidas/año). Por lo tanto, el *CSLS* tiene unidades de € por vida y una medida es mejor (más eficiente) cuanto más bajo sea su *CSLS*.

Coste ajustado por vida estadística salvada. Se conoce normalmente por sus siglas en inglés *ACSL* (*Adjusted Cost per Statistical Life Saved*). Se calcula como el anterior, pero restándole al coste de la medida, el beneficio por reducción de riesgo económico:

$$ACSL = \frac{C_A - (O_{cb} - O_A) - (R(EUR)_{cb} - R(EUR)_A)}{R(v)_{cb} - R(v)_A}$$

donde $R(EUR)_{cb}$ es el riesgo anual económico en el caso existente (€/año) y $R(EUR)_A$ es el riesgo anual económico tras implantar la medida (€/año). Por lo tanto, el *ACSL* también tiene unidades de € por vida y una medida es mejor (más eficiente) cuanto más bajo sea su *ACSL*.

Si el beneficio por reducción de riesgo económico supera al coste de la medida, el *ACSL* es negativo y entonces se suele hacer 0 (ver por ejemplo [13])¹.

Razón de desproporcionalidad. Normalmente se denota con la letra *R* y es el resultado de dividir el coste por vida salvada (ajustado o sin ajustar) por un valor estándar de coste por vida salvada (por ejemplo un valor medio de otras industrias) que recibe el nombre de *VPF* (*Value of Preventing a Fatality*), *WTP* (*Willingness To Prevent a statistical fatality*) o *VSL* (*Value of Statistical Life*). En 2001, el HSE dio un valor de 1 millón de libras al *VPF* e indica que se deben aceptar medidas con mayor *R* cuanto mayor sea el riesgo [69]. En base a esto el ANCOLD [13] indica que para casos justo por debajo del límite de tolerabilidad, la justificación para llevar a cabo medidas de reducción de riesgo es (valores en millones de dólares australianos):

- Muy fuerte si $0 \leq CSLS < 5$
- Fuerte si $5 \leq CSLS < 20$

¹Si se desea emplear el *ACSL* para priorizar entre alternativas con *ACSL* negativo, se puede pasar el término $R(v)_{cb} - R(v)_A$ al numerador, para que las mejores medidas tengan un *ACSL* más negativo, aunque se debe tener en cuenta que, en ese caso, el significado del valor obtenido ya no es el mismo.

- Moderada si $20 \leq CSLS < 100$
- Pobre si $100 \leq CSLS$

Y para casos justo por encima de la zona de riesgo ampliamente aceptable:

- Muy fuerte si $0 \leq CSLS < 1,5$
- Fuerte si $1,5 \leq CSLS < 6$
- Moderada si $6 \leq CSLS < 30$
- Pobre si $30 \leq CSLS$

Finalmente, el USACE [100] dio un valor del *WTP* de 5.8 millones de dólares y fijó las siguientes recomendaciones para casos justo por debajo del límite de tolerabilidad:

- Muy fuerte si $0 \leq R < 1$
- Fuerte si $1 \leq R < 4$
- Moderada si $4 \leq R < 20$
- Pobre si $20 \leq R$

Y para casos justo por encima de la zona de riesgo ampliamente aceptable:

- Muy fuerte si $0 \leq R < 0,3$
- Fuerte si $0,3 \leq R < 1$
- Moderada si $1 \leq R < 6$
- Pobre si $6 \leq R$

A efectos de priorización y valoración de alternativas, se emplean las mismas recomendaciones de eficiencia que se han mostrado más algunos otros como la relación beneficio-coste o el valor neto presente (NPV). Para más información se puede consultar por ejemplo [37, 19, 18].

En España, se ha utilizado también el criterio *EWACSLs* [119] para la priorización de medidas en un sistema de 27 presas por parte de la Confederación Hidrográfica del Duero [114, 9, 11]. El *EWACSLs* (*Equity Weighted Adjusted Cost per Statistical Life Saved*) es una modificación del *ACSLs* dividiéndolo por un factor de equidad (K_E), que sirve para dar mayor peso a las alternativas que reducen la probabilidad de rotura a valores inferiores a 10^{-4} .

$$EWACSLs = \frac{ACSLs}{(K_E)^n}$$

$$K_E = \frac{\max[10^{-4}, pr_e]}{\max[10^{-4}, pr_r]}$$

donde n es un parámetro que se ha incluido para mayor versatilidad que en principio se puede tomar igual a 1 (un valor mayor que 1 daría más peso a la equidad respecto

de la eficiencia y un valor menor que 1 daría un peso menor). El EWACSLS es por lo tanto un criterio mixto de equidad y eficiencia.

6.6. Ejemplo

Continuando con el ejemplo utilizado en el capítulo anterior para ilustrar el modelo de riesgo, se emplea a continuación para realizar un ejemplo de evaluación de riesgo. Para ello se va a evaluar tanto la *situación actual*, que es la que se ha modelado en el capítulo anterior como dos hipotéticas medidas de reducción de riesgo. La primera de ellas sería la implantación de un Plan de Emergencia (como ejemplo de medida no estructural) y la segunda una mejora en el sistema de drenaje (como ejemplo de medida estructural). Para capturar el impacto en riesgo de la primera medida se han re-estimado las tasas de mortalidad empleadas en la estimación de pérdida de vidas. Para capturar el impacto en riesgo de la segunda se disminuye la probabilidad de que existan unas altas subpresiones en el cimiento de la presa.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6.1 y se comparan con las recomendaciones de tolerabilidad del USBR, el ANCOLD y el USACE en las figuras 6.5 y 6.6.

	Sit. Actual	Plan de Emergencia	Mejora drenaje
Probabilidad de rotura [año ⁻¹]	3.89E-05	3.89E-05	4.59E-06
Riesgo económico [€/año]	4.44E+03	4.44E+03	4.43E+02
Riesgo social [vidas/año]	6.93E-02	7.23E-03	6.67E-03
Pérdida de vidas mínima	0	0	0
Pérdida de vidas máxima	1836	194	1836
Reducción de riesgo económico [€/año]		0.00E+00	4.00E+03
Coste anualizado de la alternativa [€/año]		54,383	21,995
Coste económico total [€/año]		58,822	22,438
Ratio beneficio/coste		0.00%	18.17%
ACSLS [€]		876,128	287,328
EWACSLS [€]		876,128	287,328

Tabla 6.1: Comparación de la situación actual y de la situación tras la aplicación de medidas de reducción de riesgo.

Como se puede ver, la implantación del Plan de Emergencia afecta únicamente a las consecuencias, por lo que el riesgo estimado disminuye, desplazándose a la izquierda en las figuras 6.5 y 6.6. Por el contrario, la medida de mejora del sistema de drenaje afecta fundamentalmente a la probabilidad de fallo con lo que el riesgo se desplaza hacia abajo. De hecho, como se puede ver en la figura 6.5, únicamente afecta a uno de los dos modos de fallo.

Se puede comprobar que sólo la combinación de ambas medidas es suficiente para

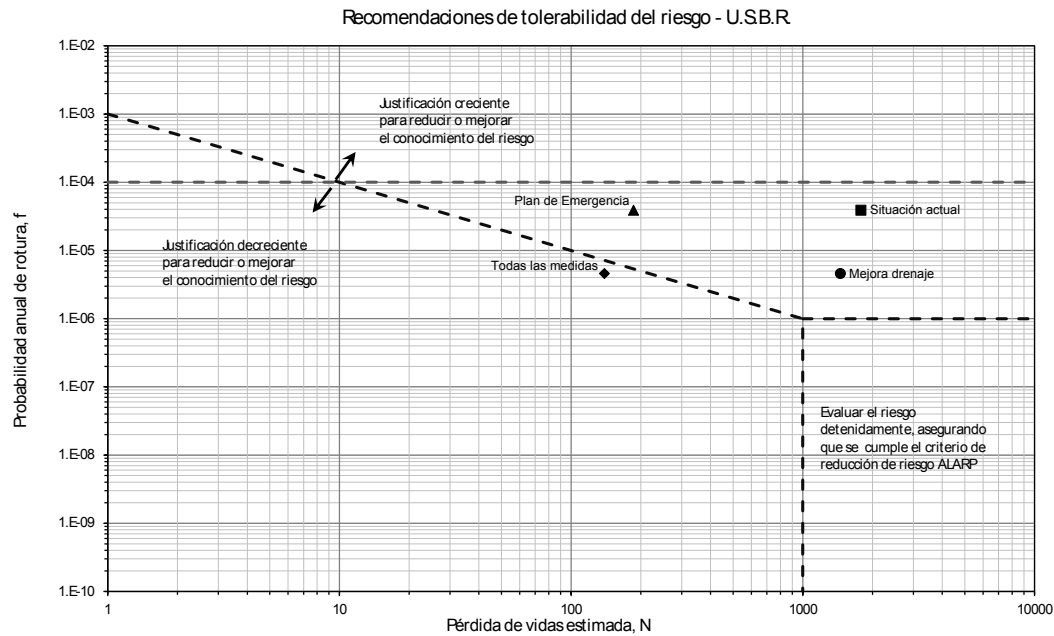


Figura 6.5: Gráfico fN con los resultados del ejemplo con las medidas de reducción de riesgo planteadas.

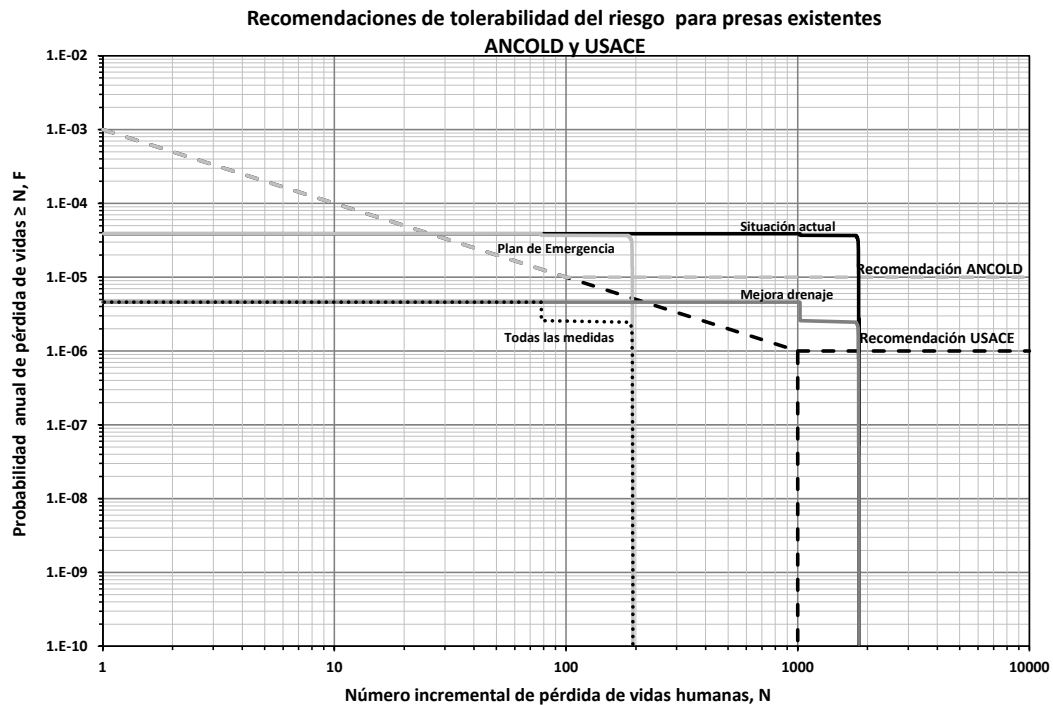


Figura 6.6: Gráfico FN con los resultados del ejemplo con las medidas de reducción de riesgo planteadas.

que la presa cumpla las recomendaciones de tolerabilidad empleadas. También se puede ver que la mejora del drenaje es en este caso más eficiente para reducir el riesgo (menor ACSLS). Además, como en este caso las probabilidades de rotura son inferiores a 10^{-4} , el EWACSLS es igual al ACSLS y en ambas medidas indica que su justificación es *muy fuerte*.

Capítulo 7

Hacia herramientas de gestión integral de apoyo a la gobernanza en seguridad de presas

En la presente Monografía de Análisis de Riesgo aplicado a la gestión de seguridad de presas y embalses, se ha puesto mucho énfasis en el análisis de riesgo y en los denominados modelos de riesgo que soportan dicho análisis en el contexto de la seguridad de presas, frente a riesgos eminentemente naturales (avenidas, sismos, etc.) e ingenieriles (geotécnicos, erosión interna, etc.)

Implica un avance muy importante y constituye una pieza muy importante, que en cualquier caso es parte de un “puzle” mucho mayor, la gestión integrada de todos los aspectos de la seguridad de infraestructuras hidráulicas con especial relevancia para la sociedad.

El hecho de haber comenzado por la identificación, análisis y evaluación de riesgos de presas se debe a la importancia que tienen éstas en términos de protección frente a inundaciones, producción de energía eléctrica, abastecimiento urbano, riego, etc. en conjunción con su exposición a amenazas naturales y humanas y su potencial para afectar tanto a vidas humanas, como a la economía, el medio ambiente o el patrimonio.

La disposición de una arquitectura legal como son las Directivas Europeas (y sus equivalentes en otras partes del mundo) que trascienden más allá de los códigos y reglamentos de seguridad específicos de cada país (por ejemplo, en España, el título VII del Real Decreto 9/2008, sobre seguridad de presas, embalses y balsas) constituye un importante refuerzo para implantar una gestión integral de la seguridad que incorpore todo tipo de riesgos y un amplio espectro de infraestructuras.

Las Directivas se mencionan a continuación reconocen la utilidad y explícitamente requieren de la utilización del análisis de riesgos como herramienta de gestión:

- Directiva Europea 2007/60/EC de Evaluación y Gestión de Riesgos de Inundación (conocida como la Directiva Europea de Inundaciones), la cual considera

que las inundaciones pueden ser causadas por un amplio rango de amenazas como son la propia lluvia, las crecidas en cauces fluviales, las tormentas y mareas marítimas o el colapso de las estructuras de protección (sobre las que hay que considerar los impactos del Cambio Climático), además de otro tipo de amenazas como son el terrorismo, sabotaje y vandalismo.

- Directiva Europea 2008/114/EC de Identificación, Designación y Evaluación de la Necesidad de mejorar los Niveles de Seguridad de las Infraestructuras Críticas Europeas (conocida como la Directiva Europea de Protección de Infraestructuras críticas), la cual define “infraestructura crítica” como la instalación, sistema, o parte de un sistema esencial para el mantenimiento de las funciones vitales de la sociedad, su salud, seguridad, economía y bienestar, cuya inutilización o destrucción tendría por lo tanto un impacto significativo sobre el país en el cual se produjese dicho fallo de servicio.

Una visión integrada y amplia de la gestión de la seguridad (gobernanza) tiene como objetivos la mejora de la operación y conservación de nuestras infraestructuras, reforzar la preparación para la mitigación de desastres y aumentar la capacidad y velocidad de recuperación de la sociedad después de grandes catástrofes.

Para alcanzar dichos objetivos se requiere de: priorizar inversiones en seguridad en función de su eficiencia en la reducción de riesgo y armonizar de los estándares de seguridad como garantes de la equidad, aspectos que necesariamente redundarán en la estabilidad jurídica, operativa y financiera de los titulares.

Establecidos los objetivos y las necesidades de la gobernanza de seguridad de infraestructuras, cabe tener en cuenta que, tal y como se recoge en la ISO 31000 2009, las características esenciales que la gestión de riesgo debe tener para ser efectiva son: crear y proteger valor, ser una parte integral de la organización de procesos, ser parte de los procedimientos de toma de decisiones, tener en cuenta de forma explícita las incertidumbres, ajustarse a cada organización, tener en cuenta factores humanos y culturales, ser transparente e inclusiva, dinámica, iterativa y sensible a los cambios, así como facilitar la mejora continua y la cohesión de la organización.

Consecuentemente, las herramientas de gestión de riesgos, para servir de apoyo a la gobernanza en Seguridad de presas deben tener en cuenta la misión del titular, sus restricciones, objetivos y contexto, de manera que puedan ser integradas en los procesos globales de las organización (figura 7.1).

En resumen, la necesaria priorización de inversiones mediante la evaluación del impacto y eficiencia de distintas medidas de reducción del riesgo, así como la identificación de secuencias de priorización y optimización de recursos en sistemas más o menos complejos (incluyendo organizaciones con un gran número de presas a su cargo), proporciona una información clave al gestor o tomador de decisiones. Cabe mencionar que existe software específico para este propósito [76], y una aplicación completa para un caso español ha sido muy recientemente publicada [52]. En esta experiencia española llevada a cabo por la Confederación Hidrográfica del Duero, el hecho de que los indicadores de referencia compatibilicen aspectos tanto de eficiencia como de equidad da lugar a decisiones no solo robustas sino también



Figura 7.1: Misión, restricciones, objetivos y contexto de la gobernanza en seguridad de presas.

transparentes y socialmente defendibles [51].

Además, propietarios, operadores y autoridades a cargo de la gestión de presas y embalses pueden disponer de esta manera de un tipo de información fácil de comunicar a los ciudadanos concerniente a los niveles existentes de riesgo, su tolerabilidad y el valor de las inversiones hechas para conseguir unos niveles de riesgo lo más ponderados posibles. Esto puede dar paso a una mayor cultura sobre los riesgos y, en paralelo, fortalecer sectores estratégicos relacionados con el agua en términos de sostenibilidad y estabilidad financiera.

Otro asunto de gran actualidad a la hora de implementar sistemas integrales de gestión de la seguridad de presas consiste en la consideración de los riesgos antrópicos, fundamentalmente terrorismo, sabotaje y vandalismo. Estos son conceptualmente fáciles de incorporar a la misma lógica descrita hasta ahora para amenazas de tipo natural, si bien en la práctica todavía se requiere de avances significativos en investigaciones y aplicaciones [44, 116, 82].

Por último, resulta obligado constatar que una gestión integrada de riesgos en presas y otras infraestructuras similares requieren de un amplio sentido de cooperación a distintos niveles, tanto público como privado, y nacional como internacional, dado que ningún tipo de organización por sí misma ni si quiera país en solitario puede aspirar a un verdadero éxito sin la mencionada colaboración.

Parte II

Apéndices

Apéndice A

Estimación de la fiabilidad de compuertas

A.1. Introducción

El presente apéndice contiene una introducción al uso de árboles de fallo para la estimación de probabilidades de fallo de compuertas. Es por lo tanto una acompañamiento al contenido del apartado 5.5, en el que se trata la fiabilidad de órganos de desagüe. Conviene recordar no se debe confundir la fiabilidad de los órganos de desagüe (es decir, la probabilidad de que un órgano de desagüe se pueda utilizar cuando se desea) con la posibilidad de que sufran un colapso o apertura repentina que provoque una avenida artificial aguas abajo. Este aspecto, también debe ser analizado, pero no como un componente de las cargas del sistema sino como un posible modo de fallo.¹

El análisis de árboles de fallo (FTA, del inglés *Fault Tree Analysis*) es una técnica que se desarrolló inicialmente en los años 1960 para la industria armamentística [43]. Posteriormente fue incorporado como una herramienta para el análisis de riesgo en las industrias nuclear [136] y aeroespacial [127] y en la actualidad se usa en multitud de campos, entre ellos la seguridad de presas.

A.2. Lógica de los árboles de fallo

El objetivo de un FTA es desarrollar todos los eventos o combinaciones de eventos que pueden hacer que ocurra un fallo. Para ello se utilizan los árboles de fallo, que son una representación gráfica de la lógica del sistema. Los eventos del árbol pueden ser de cualquier tipo: fallos mecánicos, fallos humanos, condiciones externas, etc.

¹También conviene apuntar que los árboles de fallo también han sido utilizados en ocasiones para modelar los modos de fallo [68].

El fallo o evento indeseado que se analiza se llama evento superior (*top event*)² y se dibuja en la parte superior del diagrama. Debajo de él se dibujan los eventos que pueden hacer que el evento superior ocurra y así sucesivamente de forma recursiva hasta llegar al nivel inferior del árbol en el que se dibujan los eventos base (*basic events*), que son aquellos que no necesitan ser desarrollados más allá. Para ver un ejemplo de árbol de fallo, se puede consultar la figura 2.9 (ubicada en el glosario), en la que el evento superior es el fallo en una compuerta y los eventos base están representados mediante círculos.

Un árbol de fallo no es una representación de un sistema físico sino de cómo se puede producir un fallo. Por ejemplo, en el árbol de fallo de una compuerta no tienen por qué aparecer todas las piezas de la compuerta sino todos los eventos que pueden contribuir a que la compuerta deje de funcionar. Además, como todo modelo, los árboles de fallo nunca pueden aspirar a ser completamente exhaustivos.

Cada nodo de un árbol de fallo representa un evento binario (que puede ocurrir o no). Por ejemplo la compuerta funciona o no funciona, hay suministro eléctrico o no lo hay, se rompe un pistón o no se rompe, etc. Siempre es una relación binaria.

Los eventos se relacionan entre si mediante puertas lógicas. Las más simples son las de tipo Y (*AND gate*) y las de tipo O (*OR gate*). Si un evento superior A se relaciona mediante una puerta Y con los elementos inferiores B y C, quiere decir que para que el evento A ocurriese, deberían ocurrir los eventos B y C (ambos). Por el contrario, si un evento superior A se relaciona mediante una puerta O con los elementos inferiores B y C, quiere decir que para que el evento A ocurriese, debería ocurrir el evento B o el evento C (o los dos). Más adelante se explican más tipos de puertas lógicas, sin embargo, estas dos son las más utilizadas.

Un árbol de fallo se puede emplear como herramienta cualitativa para analizar la lógica de un sistema. No es necesario asignar ningún tipo de número al diagrama para que éste sea útil. Sin embargo una vez se ha desarrollado el árbol de fallo, es posible obtener la probabilidad de ocurrencia del evento superior asignando probabilidades de ocurrencia a cada uno de los eventos base. Una vez estas estimaciones se han asignado, el cálculo de la probabilidad del evento superior es una cuestión algebraica que los programas informáticos de hoy en día han automatizado. Existe algún programa libre y gratuito [58] y también muchos otros comerciales [86].

En cuanto al uso de los árboles de fallo como herramienta cualitativa, además del conocimiento que se adquiere por el mero hecho de realizar el árbol, existen algunos cálculos que se pueden hacer sin necesidad de asignar probabilidades a los eventos base. El cálculo más habitual es la obtención de los conjuntos mínimos de fallo (MCS, del inglés *Minimal Cut Sets*). Un conjunto de fallos (*Cut Set*) es una combinación de eventos básicos que haría que el fallo se produjese. Un MCS es una combinación mínima de eventos que haría que se produjese el fallo. Los programas informáticos de análisis de árboles de fallo son capaces de calcular automáticamente todos los MCS de un evento superior a partir del árbol de fallo. Además, por la

²Se aportan los términos en inglés, ya que son los términos que suelen manejarse en los programas informáticos y documentación disponibles.

naturaleza recursiva de los árboles de fallo, los MCS se pueden obtener para cualquier evento, no sólo para el superior. Los MCS de primer nivel son aquellos que sólo tienen un evento. De esta manera se pueden identificar los puntos más críticos del sistema, ya que cualquier evento que aparezca en un MCS de primer nivel haría que el sistema dejase de funcionar. Un sistema con muchos MCS de primer nivel es un sistema con poca redundancia y por lo tanto frágil. También se calculan los MCS de niveles superiores.

En cuanto al uso cuantitativo, el principal cálculo a realizar es la obtención de la probabilidad de ocurrencia del evento superior, que es el resultado que se necesitará incluir en el modelo de riesgo general. Otro cálculo que se puede realizar es la ordenación de los MCS por probabilidad de ocurrencia, lo cuál tiene utilidad desde el punto de vista del entendimiento del sistema pero no es un cálculo que sea necesario para alimentar el modelo de riesgo general. También es posible realizar cálculos más avanzados como cálculos de incertidumbre o cálculos dependientes en el tiempo. Obviamente, estos cálculos requieren que el modelo sea alimentado con más datos y requieren por lo tanto de trabajo adicional.

Por último, no se debe confundir un árbol de fallo con un árbol de eventos. El árbol de eventos representa una manera de razonar inductiva (de lo específico a lo general). Se parte de un suceso de inicio y se va avanzando paso a paso, explorando todas las posibilidades hasta que se llega al fallo. En contraposición, los árboles de fallo representan una forma de razonar deductiva (de lo general a lo específico). Se parte de un fallo del sistema y se exploran todas las posibles causas que pueden haberlo producido. Por lo tanto, se podría decir que la principal diferencia entre ambos métodos es la dirección del análisis. En la práctica se usa una combinación de los dos métodos. Para representar el modelo global de riesgo de una presa se emplea un árbol de eventos y para estimar algunas de las probabilidades de dicho árbol (por ejemplo, la fiabilidad de compuertas), se pueden utilizar árboles de fallo. La figura A.1 muestra esta relación.

A.3. Simbología

A continuación se explican los distintos símbolos empleados en los árboles de fallo.

En primer lugar están los eventos. La tabla A.1 muestra los símbolos comúnmente empleados para representar todos los posibles tipos de eventos que pueden aparecer en un árbol de fallo. En la práctica los más utilizados son el evento básico y el evento intermedio. El evento básico (círculo) es el que aparece en el extremo inferior de cada rama de un árbol; no se desarrolla más y se le asigna una probabilidad de ocurrencia. Los eventos intermedios (rectángulos) son aquellos que se desarrollan más abajo analizando los posibles sub-eventos que pueden causarlo. Por lo tanto, a estos eventos no se les asigna directamente una probabilidad, sino que es calculada según la lógica del árbol de fallo.

El segundo elemento de los árboles de fallo son las puertas lógicas. La tabla A.2 muestra los símbolos comúnmente aceptados de los principales tipos de puertas

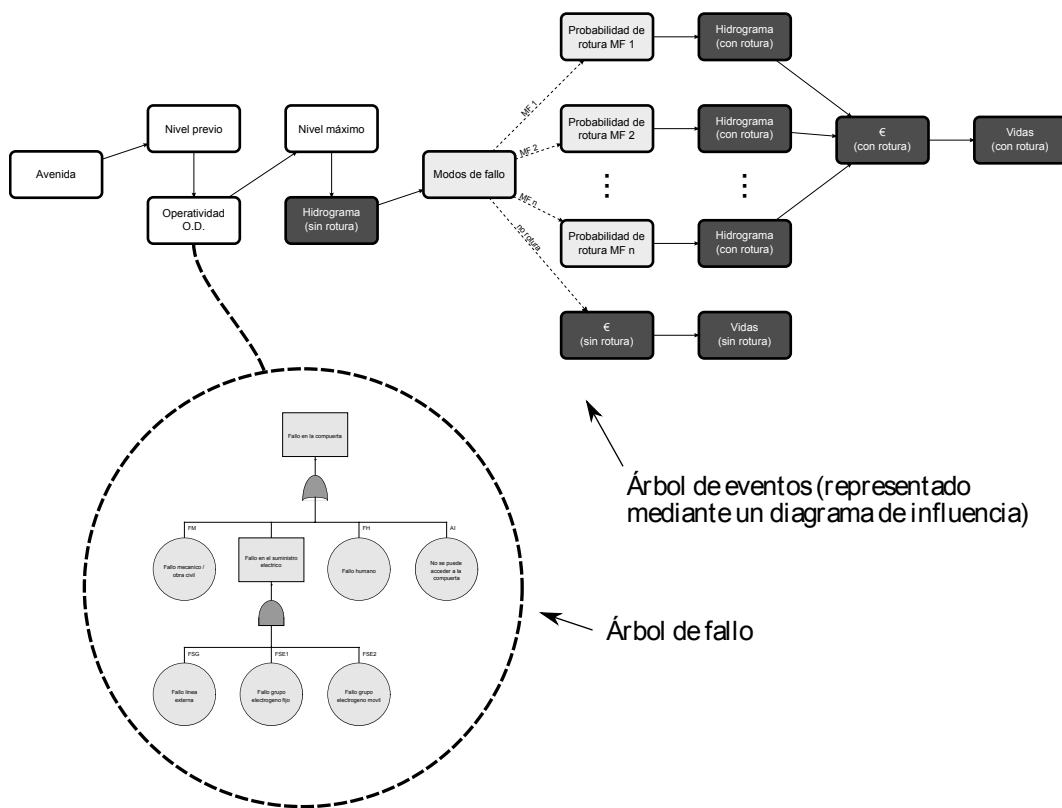


Figura A.1: Relación entre los árboles de fallo y el modelo global de riesgo.

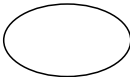
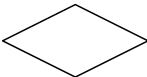
<u>SÍMBOLOS DE EVENTOS PRIMARIOS</u>	
	EVENTO BÁSICO (<i>BASIC EVENT</i>) – Fallo básico iniciador que no requiere más desarrollo
	EVENTO CONDICIONANTE (<i>CONDITIONING EVENT</i>) – Condiciones o restricciones específicas que se aplican sobre cualquier puerta lógica (usado fundamentalmente con puertas Y PRIORITARIO e INHIBIT)
	EVENTO NO DESARROLLADO (<i>UNDEVELOPED EVENT</i>) – Un evento que no se desarrolla más debido a sus consecuencias insuficientes o debido a que no se dispone de información
	EVENTO EXTERNO (<i>EXTERNAL EVENT</i>) – Un evento que normalmente se espera que ocurra
<u>SÍMBOLOS DE EVENTOS INTERMEDIOS</u>	
	EVENTO INTERMEDIO (<i>INTERMEDIATE EVENT</i>) – Un evento de fallo que ocurre debido a uno o más antecedentes actuando a través de puertas lógicas

Tabla A.1: Símbolos para representar los distintos tipos de eventos en los árboles de fallo.

lógicas empleados junto con una explicación de su significado. De éstos los más importantes son la puerta Y y la puerta O, que ya se han explicado más arriba.

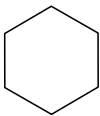
<u>SÍMBOLOS DE PUERTAS</u>	
	Y (AND) – El fallo ocurre si todos los fallos previos ocurren
	O (OR) – El fallo ocurre si al menos uno de los fallos previos ocurre
	O EXCLUSIVO (EXCLUSIVE OR) – El fallo ocurre si exactamente uno de los fallos previos ocurre
	Y PRIORITARIO (PRIORITY AND) – El fallo ocurre si todos los fallos previos ocurren en una secuencia específica (la secuencia se representa mediante un EVENTO CONDICIONANTE dibujado a la derecha de la puerta)
	INHIBIT – El fallo ocurre si el (único) fallo previo ocurre en presencia de una condición permisiva (la condición permisiva se representa mediante un EVENTO CONDICIONANTE dibujado a la derechas de la puerta)

Tabla A.2: Símbolos para representar los distintos tipos de puertas lógicas en los árboles de fallo.

Por último, están los símbolos auxiliares que sirven para poder descomponer un gran árbol de fallo en varios más pequeños (tabla A.3). Si se desarrolla un árbol de fallo de forma detallada hasta llegar a las distintas partes mecánicas de las compuertas, estos símbolos son imprescindibles porque los árboles pueden llegar a hacerse muy grandes.

A.4. Ejemplos

A continuación se muestran dos ejemplos de árboles de fallo. En primer lugar se muestra un árbol de fallo como el que podría emplearse para un nivel de detalle intermedio explicando los cálculos que se pueden realizar con él y posteriormente se muestra un ejemplo de árbol más detallado. La figura A.2 muestra el árbol de fallo del primer caso de ejemplo. En el primer nivel se han identificado cuatro posibles causas de fallo:

- Fallo mecánico / obra civil
- Fallo en el suministro eléctrico

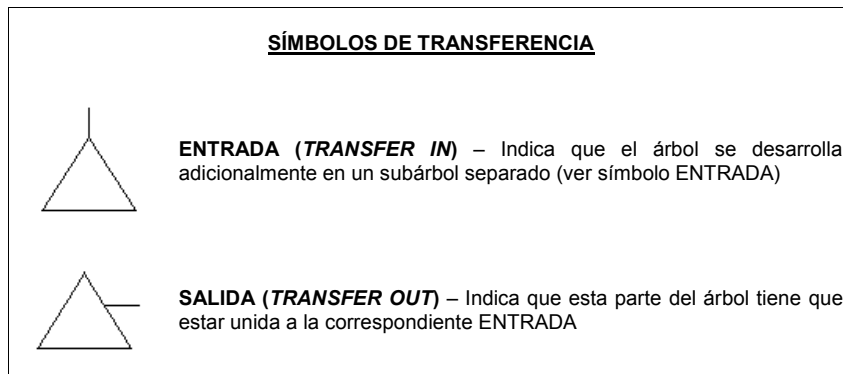


Tabla A.3: Símbolos auxiliares de los árboles de fallo.

- Fallo humano
- Falta de acceso

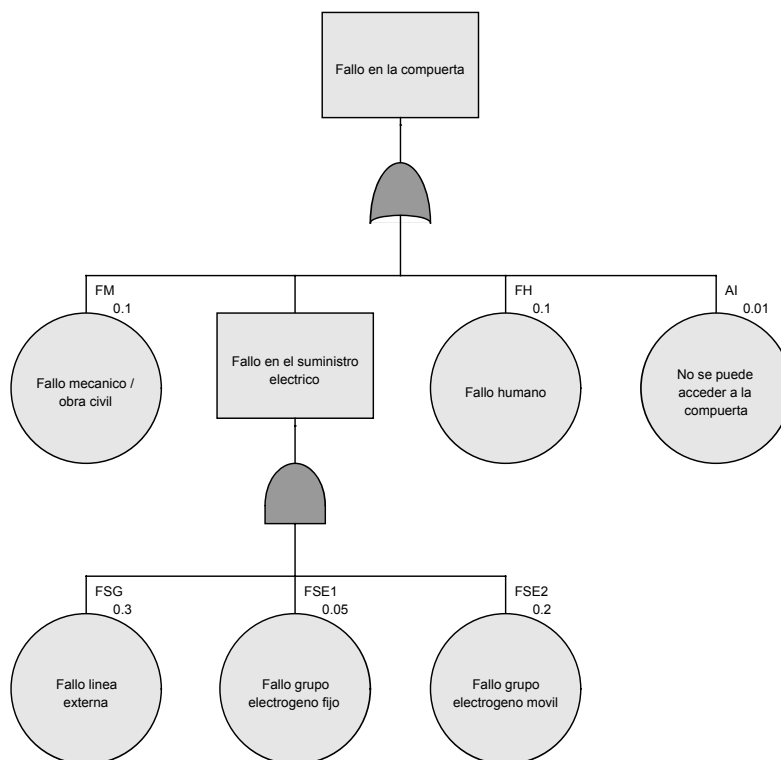


Figura A.2: Ejemplo de árbol de fallo de nivel de detalle intermedio.

Como cualquiera de estas causas haría que no se pudiera operar la compuerta, se han relacionado con el evento superior mediante una puerta O. De estas causas, a la primera, tercera y cuarta, se les han asignado probabilidades de ocurrencia de 0.1, 0.1 y 0.01 respectivamente. El fallo en el suministro eléctrico se ha desarrollado algo más, identificando que para que no hubiese suministro además de fallar el suministro general, deberían fallar los sistemas de emergencia (grupo electrógeno

fijo y grupo electrógeno móvil en este caso). Por lo tanto, estos eventos se han relacionado con el evento de fallo eléctrico mediante una puerta Y. Estos tres eventos ya no se han desarrollado más y se les han asignado probabilidades de fallo de 0.3, 0.05 y 0.2 respectivamente.

El primer cálculo que se puede hacer es el de los MCS, que es un cálculo cualitativo. Los resultados se pueden ver en la tabla A.4. Se recuerda que cada MCS es una intersección de eventos básicos suficiente para provocar el evento superior tal que si se quita un sólo evento de dicha combinación, el fallo ya no se produciría. Este caso es simple y el cálculo muestra que hay tres MCS de primer nivel y uno de tercer nivel. Los tres MCS de primer nivel se corresponden con los fallos mecánico, humano y de acceso, en los que uno sólo de ellos bastaría para que no se pudiese operar la compuerta. Por otro lado, el suministro eléctrico muestra una mayor redundancia ya que para provocarlo hace falta que fallen tres cosas simultáneamente, lo cual se ve reflejado en el MCS de nivel 3.

Minimal Cut Sets =====	
Tree	: ejemplo.fta
Time	: Thu Feb 11 19:39:43 2010
Method	: Algebraic
No. of primary events = 6	
Minimal cut set order = 1 to 6	
Order 1:	
1)	AI
2)	FH
3)	FM
Order 2:	
Order 3:	
1)	FSE1 FSE2 FSG
Order 4:	
Order 5:	
Order 6:	
Qualitative Importance Analysis:	
Order	Number
----	-----
1	3
2	0
3	1
4	0
5	0
6	0
ALL	4

Tabla A.4: Minimal Cut Sets del ejemplo desarrollado (resultados obtenidos con OpenFTA [58]).

El cálculo de la probabilidad del evento superior se hace mediante un proceso iterativo. Cuando se tiene una puerta O, si los eventos fuesen mutuamente excluyentes (es decir, no pudiesen concurrir) la probabilidad del evento superior se calcularía simplemente sumando las probabilidades de los eventos básicos. Sin embargo, si los eventos se suponen independientes, a la anterior suma hay que restarle la intersec-

ción de los distintos eventos. Matemáticamente:

$$\begin{aligned}
 P(E_1 \vee E_2 \vee \cdots \vee E_n) = & \sum_{i=1}^n P(E_i) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n P(E_i \wedge E_j) + \\
 & + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n P(E_i \wedge E_j \wedge E_k) + \cdots + (-1)^n P(E_1 \wedge E_2 \wedge \cdots \wedge E_n)
 \end{aligned}$$

donde $\wedge$ es el símbolo matemático para denotar “Y” y $\vee$ es el de “O”. La expansión de esta fórmula da lugar a una serie donde el primer término es la probabilidad suponiendo que los eventos son mutuamente excluyentes y los sucesivos términos van alternando el signo y decreciendo en magnitud, de tal manera que si se van añadiendo términos al cálculo se va acotando el resultado real. Así, con unos pocos términos es suficiente y se pueden despreciar los términos de orden mayor. Este proceso se puede apreciar en la tabla A.5, donde se ve que se han calculado los 4 primeros términos, llegando a un resultado final de $2,005057 \cdot 10^{-1}$, que es la probabilidad de fallo de la compuerta. También se calcula la contribución a la probabilidad final de cada uno de los eventos básicos, mostrando que en este caso el fallo humano y el fallo mecánico son los que más probabilidad de fallo aportan.

Por último, la figura A.3 muestra un ejemplo de árbol de fallo en el que la parte mecánica se ha desarrollado con más detalle.

A.5. Combinación de probabilidades

Hasta aquí, se ha tratado la probabilidad de que un órgano de desagüe no funcione. Sin embargo en las presas suelen ser varios los órganos de desagüe o varias las compuertas de un órgano de desagüe. Por ejemplo, en un aliviadero con 3 compuertas, de cara al modelo de riesgo se necesitaría calcular la probabilidad de que funcionen 3, 2, 1, o 0 compuertas.

Si se tienen varias compuertas que funcionan (o dejan de hacerlo) de manera totalmente independientes entre sí y se conoce la probabilidad de funcionamiento de cada una de ellas se puede emplear la distribución binomial para calcular de manera exacta la probabilidad de que funcione cualquier número de ellas. La distribución binomial mide el número de éxitos en una secuencia de varios ensayos independientes de Bernoulli (un ensayo de Bernoulli es un experimento aleatorio en el que sólo se pueden obtener dos resultados: sí/no) con una probabilidad fija de éxito en cada uno de los ensayos. En el caso opuesto, si las compuertas no funcionan independientemente, sino que por el contrario si falla una fallan todas, la probabilidad de que funcionen todas es igual a la probabilidad de que funcione una, la probabilidad de que no funcione ninguna es 1 menos la probabilidad de que funcione una y la probabilidad de que funcione cualquier otro número intermedio de compuertas es 0.

Probabilities Analysis		
=====		
Tree	:	ejemplo.fta
Time	:	Thu Feb 11 19:49:24 2010
Number of primary events	=	6
Number of minimal cut sets	=	4
Order of minimal cut sets	=	6
Unit time span	=	1.000000
Minimal cut set probabilities :		
1	AI	1.000000E-002
2	FH	1.000000E-001
3	FM	1.000000E-001
4	FSE1 FSE2 FSG	3.000000E-003
Probability of top level event (minimal cut sets up to order 6 used):		
1 term	+2.130000E-001	= 2.130000E-001 (upper bound)
2 terms	-1.263000E-002	= 2.003700E-001 (lower bound)
3 terms	+1.360000E-004	= 2.005060E-001 (upper bound)
4 terms	-3.000000E-007	= 2.005057E-001 (lower bound)
Exact value : 2.005057E-001		
Primary Event Analysis:		
Event	Failure contrib.	Importance
AI	1.000000E-002	4.99%
FH	1.000000E-001	49.87%
FM	1.000000E-001	49.87%
FSE1	3.000000E-003	1.50%
FSE2	3.000000E-003	1.50%
FSG	3.000000E-003	1.50%

Tabla A.5: Cálculo cuantitativo del ejemplo desarrollado (resultados obtenidos con OpenFTA [58]).

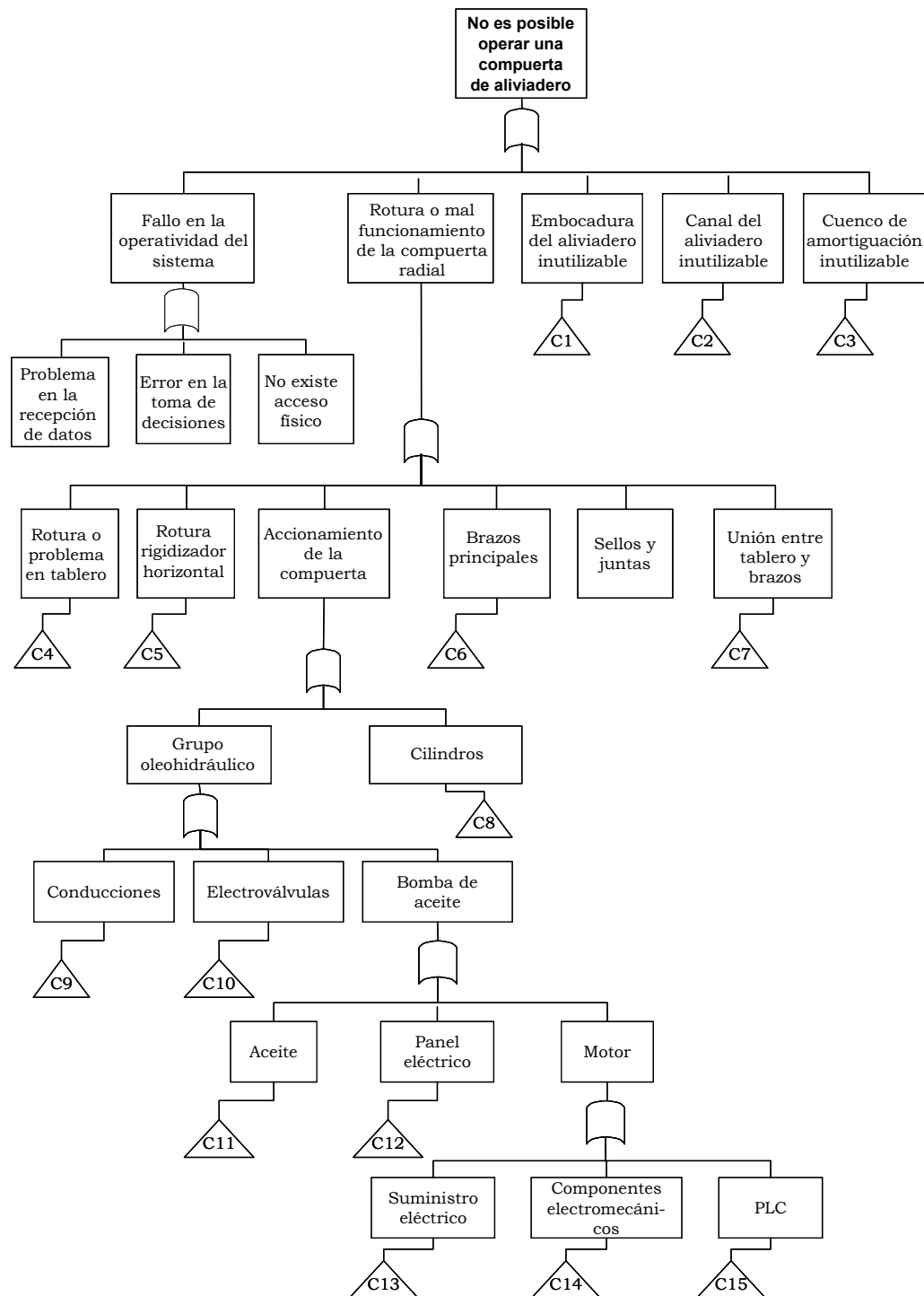


Figura A.3: Ejemplo de árbol de fallo detallado.

En un caso real, habitualmente se estará entre uno de los dos casos, es decir habrá algunos fallos que de ocurrir afectarían a todas las compuertas, habrá algunos fallos que de ocurrir afectarían a algunas compuertas sí y otras no y habrá algunos fallos que de ocurrir afectarían a una única compuerta. Por ejemplo: un fallo en el suministro eléctrico podría hacer que ninguna compuerta pudiese ser operada (aunque mediante el uso de grupos electrógenos tal vez se podría operar alguna), un fallo en una cadena podría dejar inutilizada una compuerta sin afectar al resto, un fallo en una pila podría afectar a dos compuertas, etc. La realidad suele ser muy compleja si se analiza con detalle.

En un caso así, la modelación correcta no es inmediata ni fácil. Dependiendo de cada caso, puede ser suficiente con tomar uno de los dos extremos como una aproximación suficiente, o analizar ambos casos como un análisis de sensibilidad que acote el resultado. Si aún así se estima necesario modelar correctamente estos procesos, un único árbol de fallo no será suficiente. Se deberán realizar árboles de fallo distintos para los fallos que afectarían a una compuerta y los que afectarían a varias e integrar esto en el modelo de riesgo mediante varios nodos, en lugar de uno sólo.

Por último, un aspecto relacionado aunque distinto es la posibilidad de que dentro de un mismo árbol de fallo, haya varios eventos básicos que estén correlacionados porque su fallo tenga una causa común. Aunque acarrea sus complejidades, estos casos sí son modelables dentro del árbol de fallos [127]. Por ejemplo, considérese un sistema como el mostrado en la figura A.4.

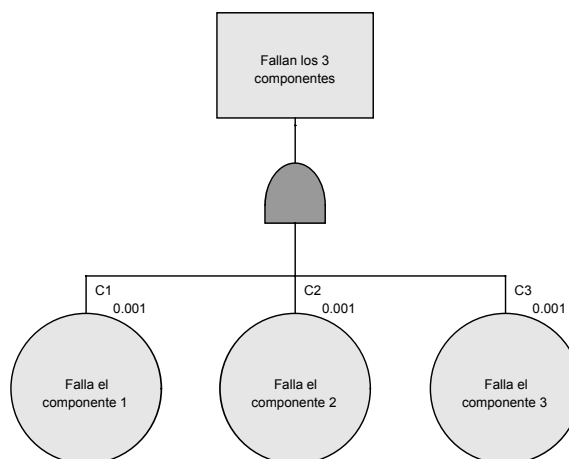


Figura A.4: Ejemplo de árbol de fallo con fallos independientes.

Se contempla un fallo que sólo puede ocurrir si fallan 3 componentes. Cada uno de estos componentes tiene una probabilidad de fallo de 10^{-3} . Por lo tanto, la probabilidad de fallo del evento superior es de 10^{-9} . Si se contempla ahora que el 1 % de los fallos tienen una causa común (en cuyo caso fallan los tres componentes simultáneamente), entonces la probabilidad de fallo por causa común es $10^{-3} \cdot 10^{-2} = 10^{-5}$. La figura A.5 muestra una posible manera de modelar esto. Como se puede observar, se han separado los fallos en dos ramas. En una están los fallos independientes y en la otra los de causa común. Los eventos de fallo independientes ahora tienen una pro-

probabilidad de $10^{-3} - 10^{-5} = 9,9 \cdot 10^{-4}$, mientras que el fallo de causa común tiene una probabilidad de 10^{-5} . La probabilidad de fallo así calculada es de $1,000097 \cdot 10^{-5}$, que es sustancialmente mayor que la calculada en el primer ejemplo.

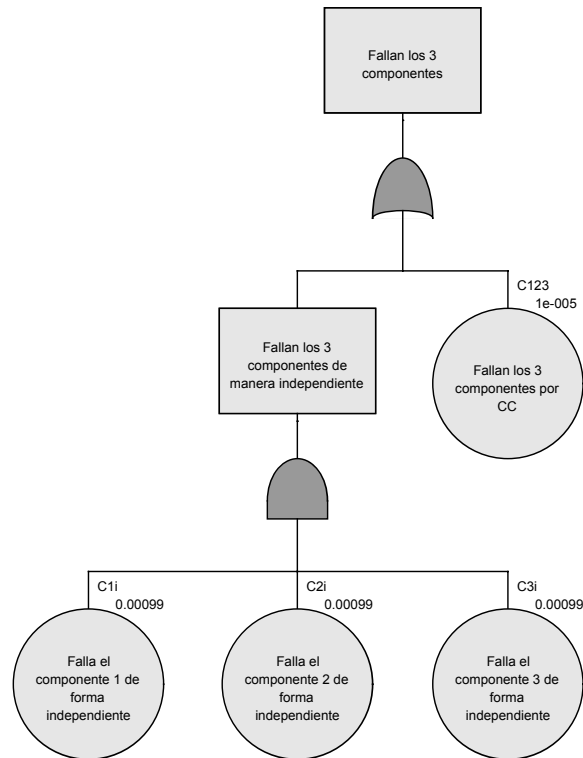


Figura A.5: Ejemplo de árbol de fallo contemplando fallo por causa común.

Apéndice B

Obtención de probabilidades mediante juicio de experto

B.1. Introducción

El presente apéndice contiene algunas recomendaciones útiles a la hora de realizar estimaciones de probabilidades mediante juicio de experto.

El juicio de experto es la opinión sobre la verosimilitud de un evento emitida por un experto, en condiciones controladas y específicas. Es inevitable tener que recurrir a juicios subjetivos durante la realización de análisis de riesgos a presas, pero se deben seguir procesos estructurados y una serie de reglas básicas para tener unas condiciones de validez y que pueda ser auditado.

El uso estructurado de este tipo de técnicas subjetivas se remonta al año 1946, cuando se estableció en Estados Unidos el proyecto RAND, que en su primer año predijo que el primer satélite espacial se lanzaría a mediados del año 1957. Diez años después, en octubre de 1957, el lanzamiento del satélite soviético Sputnik confirmó dicha predicción. Desde entonces, estas técnicas han sido ampliamente utilizadas para evaluar probabilidades difícilmente cuantificables de otra manera en la industria aeroespacial, la industria nuclear, en la sociopolítica y en la economía. Uno de los métodos más famosos para llevar a cabo estas estimaciones es el método DELPHI, desarrollado por la misma corporación RAND en los años 50 [110]. En la literatura se pueden encontrar muchos ejemplos de su aplicación.

Ya en el ámbito del análisis de riesgos a presas y según las recomendaciones del ANCOLD [13], para conseguir la deseada robustez de las estimaciones mediante juicio de experto, se deben cumplir las siguientes condiciones mínimas:

- Las estimaciones se deben realizar por personas con una amplia experiencia en ingeniería de presas y conocimientos sobre fallos de presas, aunque también puede ser beneficioso la inclusión de algunos generalistas así como de especialistas en alguna materia relevante al proceso.

- Es absolutamente necesario que las estimaciones se realicen por más de una persona. Cuando los valores difieran significativamente se deben discutir las razones de dichas discrepancias e intentar llegar a un consenso (aunque el consenso no es un requerimiento).
- Previo a la estimación de las probabilidades se debe haber definido la lógica del fallo (ver capítulo 4), normalmente mediante árboles de eventos, de tal manera que las sesiones de estimación de probabilidades de fallo se centren exclusivamente en la obtención de dichas probabilidades.
- Se deben documentar los razonamientos que lleven a la obtención de las probabilidades.
- Se debe llevar a cabo una revisión externa de los valores y el proceso para obtenerlos.

A continuación se propone una metodología para llevar a cabo el proceso de obtención de probabilidades mediante juicio de experto que cumple con los requisitos planteados. Esta metodología se basa en las recomendaciones recogidas en varios trabajos, principalmente [14, 103, 13, 119]).

B.2. Identificación de las necesidades de estudio

El paso previo a la estimación de probabilidades mediante de juicio de experto es la identificación de su necesidad. En general, cuando sea viable y se tengan datos suficientes para aplicar una metodología como las técnicas de fiabilidad expuestas en el siguiente apartado, no será necesario recurrir al juicio de experto, ya que esas técnicas tienen una menor carga de subjetividad (aunque no están exentas de ella).

Sin embargo, en el ámbito del análisis de riesgos aplicado a presas, es muy habitual tener que estimar probabilidades que no se prestan fácilmente a una modelización numérica que permita aplicar las técnicas de fiabilidad estructural. En otros casos, puede que no se disponga de suficientes datos como para llevar a cabo un análisis mediante técnicas de fiabilidad con garantías. De ser así, utilizar un complejo modelo numérico y obtener probabilidades mediante técnicas Monte Carlo daría una falsa sensación de robustez y objetividad.

La identificación de las necesidades y su comunicación a los expertos es una parte importante de cara al éxito del proceso. Establecer la importancia de las estimaciones y transmitírsela a los expertos que vayan a formar parte del proceso los hace copartícipes de los resultados y contribuye a aumentar su atención y sinceridad.

B.3. Selección del nivel de estudio y del líder del proceso

La NRC (*Nuclear Regulatory Commission*) clasifica los temas a evaluar mediante juicio de experto en tres niveles de complejidad [103]:

- A. No controvertido, efecto insignificante sobre el riesgo.
- B. Incertidumbre y diversidad significativas, controversia, complejidad.
- C. Alta controversia, efecto significativo sobre el riesgo, alta complejidad.

También según la NRC, los requerimientos de nivel de estudio se clasifican en cuatro categorías (los agentes implicados se definen más abajo):

- I. El *integrador técnico* (TI) evalúa y asigna pesos a los modelos basándose en la revisión de la literatura, la experiencia y la estimación de las variables necesarias.
- II. El TI interacciona con los *proponentes* y los *especialistas*, evalúa las interpretaciones y estima las variables necesarias.
- III. El TI organiza un debate con los *proponentes* y los *especialistas*. El IT dirige el debate, evalúa las interpretaciones y estima las variables necesarias.
- IV. El TI y el *facilitador técnico* (TF) (o el TIF si son la misma entidad) organiza un panel de expertos para que interprete y evalúe el tema en cuestión, dirigiendo las discusiones, manteniendo el orden en el debate, resumiendo e integrando opiniones y estimando las variables necesarias.

En este contexto los distintos agentes implicados se definen de la siguiente manera:

Integrador técnico (TI): Es el responsable de desarrollar los resultados agregados basándose en la información generada. Es el responsable de defender dichos resultados agregados ante los expertos, los expertos externos, los revisores externos, los reguladores y los responsables del resultado final, recogiendo sus comentarios y revisando los resultados agregados.

Facilitador técnico (TF): Es el responsable de estructurar y facilitar las discusiones e interacciones entre los expertos. Se debe asegurar de que dichas interacciones sean efectivas y de que exista equidad en la información y opiniones expuestas. Es el responsable de obtener las evaluaciones formales cada experto (juicio de experto) y de crear las condiciones adecuadas para una agregación de opiniones directa y exenta de controversia.

Facilitador e integrador técnico (TIF): Cuando las funciones del TF y el TI se unen en la misma persona.

Proponente: Experto que aboga por una determinada hipótesis o posición técnica.

Especialista: Experto técnico con un conocimiento detallado y profundo sobre algún dato, tema o metodología de interés para el proceso.

Estas clasificaciones pueden servir de referencia para reflexionar sobre la complejidad del problema y el nivel de estudio adecuado. Ante problemas de complejidad A, son adecuados los niveles de estudio I, II y III. Para problemas de complejidad C se debe ir a estudios de nivel IV.

El *líder* del estudio es el responsable de obtener las estimaciones. Las características que debe reunir son:

- Una buena reputación profesional y un amplio reconocimiento y competencia basados en su formación académica y experiencia.
- Buenas habilidades comunicativas e interpersonales, flexibilidad, imparcialidad y habilidad para generalizar y simplificar.
- Contactos en el sector: ingenieros, investigadores, gestores, etc.
- Capacidad de liderazgo y de formación de consenso. El líder del estudio no tiene porqué ser un experto en la materia que se está estudiando pero sí debe tener buenos conocimientos al respecto.

B.4. Selección de expertos y revisores externos

La revisión externa es muy recomendable en general y necesaria cuando se estén tratando temas muy controvertidos y/o de gran impacto. La revisión externa se puede realizar de forma simultánea a la ejecución del estudio o a posteriori. La primera opción tiene la ventaja de que los comentarios realizados por el revisor externo pueden ser tenidos en cuenta durante el proceso.

Las características que debe tener un buen revisor externo son:

- Una buena reputación profesional y un amplio reconocimiento y competencia basados en su formación académica y experiencia.
- Conocimientos y experiencia en el área tratada o en áreas relacionadas.
- Disponibilidad y disposición para dedicar el tiempo y esfuerzo requeridos.
- Buenas habilidades comunicativas e interpersonales, flexibilidad, imparcialidad y habilidad para generalizar y simplificar.

En cuanto a la elección de los expertos, el tamaño del grupo se elegirá según el caso de estudio. Para que el resultado sea fiable, es muy importante que el grupo sea lo suficientemente grande y diverso. El grupo debe estar equilibrado, abarcando diferentes puntos de vista sobre los temas a tratar.

Los expertos pueden ser gente con un conocimiento íntimo de la presa (explotadores, proyectistas, constructores, etc.) o especialistas en algún área que sea relevante para las estimaciones que se van a realizar (geotecnia, hidráulica, etc.). También es posible contar con observadores, que participen en las discusiones pero no emitan sus valoraciones en el momento de obtener las probabilidades.

B.5. Preparación de las sesiones

En primer lugar y con suficiente tiempo de antelación respecto de la celebración de las sesiones, es un requisito que los participantes cuenten con toda la documentación relevante.

Para la preparación de la sesión también es importante formular con claridad todos los temas respecto de los cuales se va a pedir opinión de experto. Los temas se deben separar de tal manera que se puedan tratar uno a uno. La formulación de las preguntas debe ser clara, evitando cualquier ambigüedad. Cuando se utilicen términos que puedan dar lugar a diferentes interpretaciones, estos deben ser definidos. Es importante ser consciente de que la redacción de las preguntas puede orientar la discusión y consecuentemente los resultados, por lo que deben ser formuladas de la manera más neutra posible.

En primer lugar se presentará la información relevante, a continuación se discutirán los factores (a favor y en contra de que se produzca el evento) y después se emitirán las opiniones. Toda la información que se vaya a presentar debe prepararse con antelación en un formato que permita su rápida presentación. Para agilizar la recogida de información conviene preparar planillas que se repartirán a cada participante. Una vez recogidas las valoraciones de cada experto, estas se deben comparar y discutir en grupo. Para ello conviene tener preparados los medios para hacer esta comparación de forma gráfica y ágil.

B.6. Obtención de las probabilidades

B.6.1. Preliminares

La obtención de probabilidades por juicio de experto, se realiza en una sesión de grupo. El día de la sesión conviene empezar con una breve presentación general sobre la presa que ponga en contexto los temas que se van a tratar, resaltando de qué manera van a afectar los resultados que se obtengan de la sesión al análisis de riesgo.

También se debe dedicar algo de tiempo a formar a los integrantes del grupo en los temas de incertidumbre y de emisión de probabilidades, si es la primera vez que participan en una sesión de este tipo.

B.6.2. Presentación de la información

Para cada tema sobre el cual se quiera pedir opinión de experto, se debe comenzar con una presentación de la información relevante. Esta presentación debe ser breve porque la información ya se debe haber presentado y discutido en las sesiones de identificación y caracterización de modos de fallo y debe estar en posesión de los expertos antes de la sesión. Sin embargo, es conveniente realizar un recordatorio, presentar alguna nueva información o estudio que se haya podido realizar desde la identificación de modos de fallo y permitir que los expertos puedan aclarar cualquier duda.

B.6.3. Discusión de los factores a favor y en contra

Para cada tema, tras la presentación de la información se deben enumerar los factores a favor y en contra. Formalmente esto se puede hacer como un paso separado o, en casos de menor complejidad, como parte de la discusión de la información. A veces puede haber confusión respecto del significado de a favor y en contra (¿a favor de que se produzca el evento o a favor de la seguridad de la presa?). Esto debe ser aclarado al comenzar la sesión para evitar confusiones.

B.6.4. Emisión de probabilidades (primera ronda)

En este punto se pide a cada experto que, de manera individual, asigne un valor de probabilidad al evento que se está tratando.

Si el modo de fallo no hubiese sido suficientemente desagregado, los expertos se podrían ver obligados a emitir probabilidades muy pequeñas. Esto es problemático porque cuando el rango de probabilidades se sale del 0.1-0.9 se pierde capacidad de comprensión y es más difícil emitir juicios imparciales. Por eso es importante la descomposición realizada en la caracterización de modos de fallo, ya que si es suficientemente detallada facilitará este paso del análisis de riesgo.

Para guiar el proceso de emisión de probabilidades es muy útil el uso de tablas de descriptores verbales, que relacionan términos como “inverosímil”, “posible” o “muy probable” con valores numéricos. El uso de este tipo de tablas ha sido abundantemente estudiado en la literatura científica [14]. Pese a sus limitaciones, tienen varias ventajas: ayudan a vencer la resistencia a emitir probabilidades por parte de gente no acostumbrada a ello, agilizan el proceso, facilitan el consenso y hacen que los resultados sean más repetibles. Además, mantener el uso de la misma tabla en diferentes modos de fallo y diferentes presas ayuda a que los resultados sean consistentes y comparables. Para el tipo de proceso que se ha descrito aquí, donde se deben haber descompuesto los modos de fallo lo suficiente como para que las probabilidades que haya que estimar mediante juicio de experto no sean excesivamente bajas, la tabla B.1 puede ser útil.

Similar a la anterior tabla, también puede ser útil la desarrollada por Lichtestein y Newman [85], que se puede consultar en [14].

Se muestran a continuación dos tablas (tablas B.2 y B.3) que pueden ser útiles en caso de tener que estimar probabilidades que se salgan del anterior rango, aunque en general se recomienda evitar dicha circunstancia.

En el proceso de emisión de probabilidades, es una buena práctica no emitir un único valor sino tres: límite inferior, mejor estimada y límite superior. De esta manera, cada experto evalúa la confianza que tiene en su probabilidad. Además, esto facilita la comparación de resultados del siguiente punto.

Expresión	Probabilidad, % (mediana)	Rango especificado, % (cotas superior e inferior)
Casi imposible	2	0-5
Muy improbable	5	1-15
Muy inverosímil	10	2-15
Muy baja probabilidad	10	5-15
Improbable	15	5-20
Inverosímil	15	10-25
Baja probabilidad	20	10-20
Posible	40	40-70
Probabilidades medias	50	40-60
Posibilidades iguales	50	45-55
Probable	70	60-75
Verosímil	70	65-85
Muy posible	80	70-87,5
Muy probable	80	75-92
Alta probabilidad	80	80-92
Muy verosímil	85	75-90
Muy alta probabilidad	90	85-99
Casi seguro	90	90-99,5

Tabla B.1: Tabla de descriptores verbales. Traducido de Reagan [107].

Descriptor verbal	Orden de magnitud de la probabilidad asignada
La ocurrencia es virtualmente segura	$1 = 100\%$
La ocurrencia de la condición o el evento se puede observar en la base de datos disponible	$0,1 = 10^{-1} = 10\%$
La ocurrencia de la condición o el evento no se puede observar o se puede observar en una sola ocasión en la base de datos disponible. Se pueden identificar varios escenarios potenciales de fallo.	$0,01 = 10^{-2} = 1\%$
La ocurrencia de la condición o el evento no se puede observar en la base de datos disponible. Es difícil pensar escenarios verosímiles de fallo, pero se pudo identificar alguno con esfuerzo.	$0,001 = 10^{-3} = 0,1\%$
La ocurrencia de la condición o el evento no se puede observar en la base de datos disponible. No se pueden identificar escenarios verosímiles de fallo.	$0,0001 = 10^{-4} = 0,01\%$

Tabla B.2: Tabla de descriptores verbales. Traducido de Barneich [16].

Descriptor verbal	Orden de magnitud de la probabilidad asignada
Virtualmente seguro	0,999
Muy probable	0,99
Probable	0,9
Neutro	0,5
Improbable	$0,1 = 10^{-1}$
Muy improbable	$0,01 = 10^{-2}$
Virtualmente imposible	$0,001 = 10^{-3}$

Tabla B.3: Tabla de descriptores verbales. Traducido de USBR [135].

B.6.5. Comparación de resultados y reemisión de probabilidades

En la misma sesión de identificación de modos de fallo, conviene agregar los resultados y mostrarlos de forma gráfica para que puedan ser discutidos en grupo. Esto se puede hacer mediante gráficos (ver por ejemplo la figura B.1 o [113]).

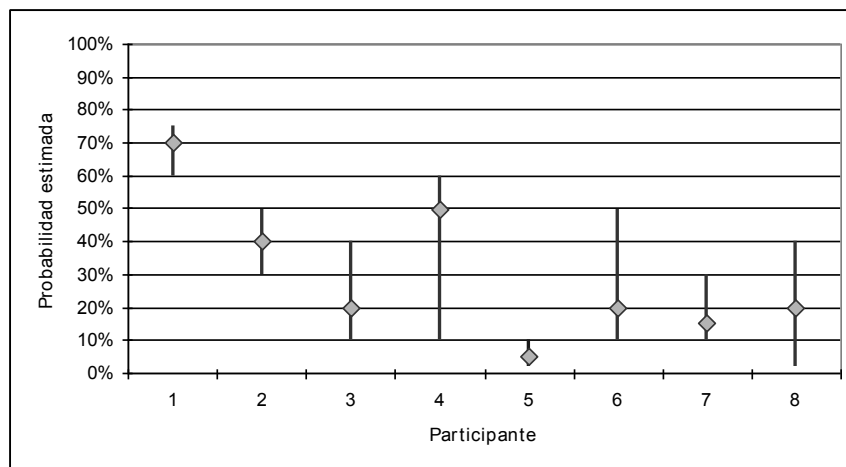


Figura B.1: Ejemplo de comparativa en escala lineal de las probabilidades emitidas por juicio de experto.

A la vista de la comparativa, si algún experto ha emitido una probabilidad que se sale del rango del grupo, debe argumentar sus razones. Se debe buscar el consenso, pero no es necesario alcanzarlo. Es perfectamente admisible que haya distintos puntos de vista, que deben quedar documentados y que son un rasgo positivo de la diversidad del grupo. Se debe crear una atmósfera en la que aquél que tenga una visión diferente de la predominante en el grupo se sienta cómodo expresándola y defendiéndola para evitar el llamado “pensamiento de grupo” (del inglés *groupthink*) [130]. El fenómeno del “pensamiento de grupo” puede ocurrir cuando existe

demasiada presión para llegar a un consenso y en casos extremos puede provocar que se lleguen a conclusiones irracionales que ningún miembro del grupo comparta.

Tras esta discusión, ya sobre números concretos, todos los expertos tienen la posibilidad de cambiar sus asignaciones. En general no es necesario ni recomendable hacer más de una segunda ronda.

B.7. Agregación de resultados

El último paso de la obtención de probabilidades mediante juicio de experto es la agregación de resultados. Según la nomenclatura del NRC, la responsabilidad de esta tarea recae sobre el TI. El abanico de posibilidades para llevar a cabo esta agregación es grande: media aritmética, media geométrica, media armónica, media ponderada, mediana, lógica difusa, minimización de incertidumbre, autoponderación de los expertos, etc. (ver [14]). Sin embargo, muchas de estos métodos tienen más interés desde el punto de vista teórico que práctico. Para el ámbito de aplicación tratado aquí, los dos métodos más prácticos son la media aritmética, la mediana o la media geométrica.

En algunos casos, el TI puede decidir excluir los valores extremos para realizar las medias, aunque en general esto no es recomendable.

B.8. Comentarios para la aplicación a la estimación de la fiabilidad de compuertas

Cuando el proceso se realiza para la obtención de probabilidades de fallo en compuertas (ver capítulo 5.5), las bases del proceso son las mismas. Sin embargo, existen algunas particularidades que merecen ser comentadas. En la modelación mediante árboles de fallo de la fiabilidad de las compuertas, normalmente no es posible o práctica la descomposición de los eventos hasta conseguir que todas las probabilidades individuales sean mayores que 0.1. En ese caso, la tabla recomendada en el apartado B.6.4 pierde su utilidad. Como alternativa, se puede usar alguna de las otras dos que se incluyen en dicho apartado. Otro enfoque es cambiar la forma de la pregunta. En lugar de preguntar *cuál es la probabilidad de fallo* puede ser mucho más conveniente preguntar *cada cuántas operaciones se producirá un fallo*. En el fondo la pregunta es la misma, pero para la mayoría de gente es más fácil estimar que de media se producirá un determinado tipo de fallo cada 1000 operaciones que estimar que la probabilidad de fallo es 0.001.

Cuando se realicen este tipo de estimaciones, la presentación de los resultados se debe realizar sobre ejes logarítmicos, tal como se muestra en la figura B.2:

Por último, al realizar la agregación de resultados, tiene más sentido utilizar una media geométrica que una aritmética. Al utilizar medias geométricas no se pueden

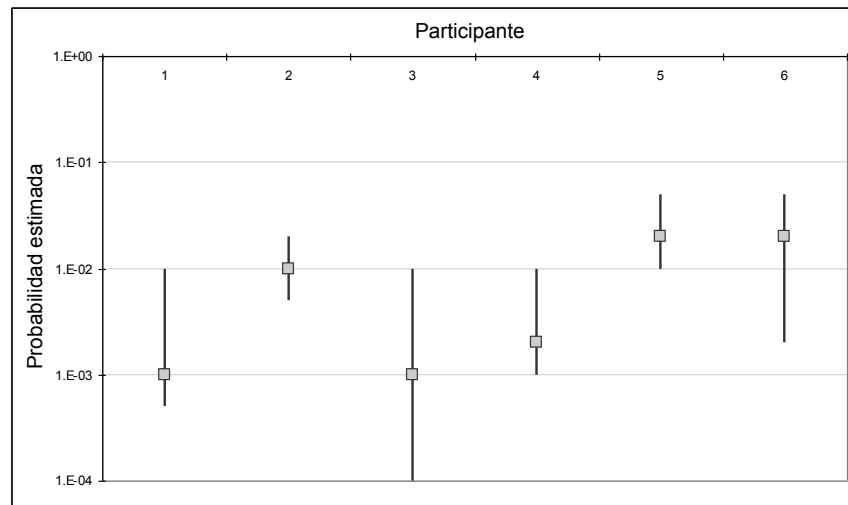


Figura B.2: Ejemplo de comparativa en escala logarítmica de las probabilidades emitidas por juicio de experto.

aceptar valores de cero (que harían que la media fuese cero) o arbitrariamente bajos como 10^{-10} (que distorsionarían el resultado). Este problema no ocurre con la media aritmética, donde un valor de cero o arbitrariamente bajo no distorsionaría el resultado final.

Apéndice C

Estimación de pérdida de vidas

C.1. Introducción

Cuando una inundación por el fallo de la presa produce pérdida de vidas, ésta es claramente la consecuencia más grave, es la que mayor impacto tiene en la percepción pública del desastre [79]. Por ello, es la consecuencia sobre la que se han realizado un mayor número de estudios y por lo tanto, que más metodologías hay disponibles para su estimación.

La pérdida de vidas es una consecuencia intangible que no puede ser estimada directamente en términos económicos. La pérdida de vidas entra dentro de las consecuencias directas, ya que en general, está producida directamente por la onda de inundación. Para otro tipo de inundaciones y especialmente en zonas tropicales, la pérdida de vidas indirectas debido a la aparición de enfermedades y la falta de agua potable pueden ser también de una magnitud importante, por lo que en estos casos también debe ser estudiada. También se pueden considerar otros daños a las personas, como el número de heridos, aunque su cuantificación es más complicada.

Los métodos para la estimación de vidas proporcionarán un valor indicativo de la magnitud de la pérdida de vidas, pero no pueden dar un valor exacto, ya que en este proceso intervienen numerosas variables como el comportamiento de las personas, muy difíciles de modelizar correctamente. Es importante entender las limitaciones de estos métodos, ya que se modelan un gran número de procesos complejos y la base de datos disponible de pérdida de vida en presas es bastante limitada [13]. Según Graham [65] las principales causas de la incertidumbre en estos métodos son:

- El momento del fallo de la presa, del que dependerán las condiciones existentes (nieve, oscuridad, lluvia, etc.) y las personas expuestas a la inundación.
- La forma del aviso ante la inundación, ya que se desconoce cuando se iniciará el aviso exactamente y como se propagará.
- La propia incertidumbre debida a las metodologías utilizadas para la estima-

ción de la pérdida de vidas.

Si se estudian los datos disponibles de pérdida de vidas se puede observar que las tasas de mortalidad dentro de la población expuestas son bastante constantes en todo el mundo según el tipo de inundación (fluvial, costera, drenaje, rotura de presa, pluvial, etc.) [79]. Otros aspectos que afectan también son la severidad de la inundación y el tiempo de aviso y de evacuación.

En general, la mayoría de metodologías actuales siguen el siguiente esquema [66]:

1. Identificar un escenario particular a evaluar, que incluye el momento del día o del año y también la forma de rotura de la presa, ya que todo ello puede influir en los resultados.
2. Obtener datos de los mapas de inundaciones sobre las características de la inundación como velocidad del agua, profundidad, rapidez, duración, etc.
3. Determinar para el escenario evaluado cuándo y cómo se producen los mensajes de aviso a la población.
4. Determinar para los diferentes núcleos de población aguas abajo la diferencia de tiempo entre que empieza el aviso hasta que llega la onda de inundación, esto es lo que se conoce como tiempo de aviso.
5. Estimar el número de personas en cada una de las zonas en las que queda dividida el área inundada según las características de la inundación y el tiempo de aviso. Estas personas permanecerán en el área inundada porque no han sido avisadas o porque no han podido ser evacuadas.
6. La pérdida de vidas es estimada a partir de la población expuesta en cada zona usando tasas de mortalidad basadas en las características del flujo y de los posibles lugares de refugio (edificios, construcciones, etc.).

Por consiguiente, el primer paso de cualquier metodología es la definición de los posibles escenarios de estudio. Este paso consiste en definir las características de la situación en la que se produce el fallo de presa que pueden influenciar a los resultados. Estas características pueden ser:

- El momento del día, ya que durante la noche las personas se encontrarán mayoritariamente en las zonas residenciales, mientras que durante el día se encuentran en zonas industriales y comerciales. Además, los procesos de aviso y evacuación son más lentos durante la noche.
- La estación del año, especialmente en ciudades con grandes variaciones de población de invierno a verano, como en las ciudades turísticas.
- El modo de fallo que influye en la forma de aviso y el entendimiento de la severidad por parte de la población. Por ello, se tienen diferentes consecuencias según la situación de rotura, por lo que se obtienen diferentes curvas de caudal-consecuencias asociadas a estas variaciones para la introducción en el modelo de riesgo (apartado 5.9.3). La situación definida debe haberse tenido

en cuenta a la hora de realizar la modelización hidráulica para obtener las áreas de inundación.

En general, es necesario tener en cuenta que estas metodologías han sido desarrolladas y calibradas para el caso de rotura de presa, por lo que su aplicación en el caso de no rotura puede producir resultados menos exactos. En todo caso, se suelen aplicar este tipo de métodos en la no rotura a falta de modelos específicos para este caso.

C.2. Metodología de Graham (1999)

En 1999, Graham [65] desarrolló un nuevo método para la estimación de la pérdida de vidas como consecuencia del fallo de una presa a partir de tasas de mortalidad fijas. Este modelo ha sido la referencia para el resto de métodos desde entonces, siendo ampliamente utilizado.

El método de Graham propone unas tasas de mortalidad fijas que se aplican a la población dentro de la zona inundada por el fallo de una presa. Estas tasas de mortalidad dependen de tres factores:

Severidad de la inundación: Muestra el grado de destrucción de las edificaciones y los refugios, por lo que es función de la altura de la lámina de agua.

Tiempo de aviso: Tiempo transcurrido entre que se produce el primer aviso a la población y el frente de inundación alcanza a la población. Por lo tanto, es un indicador del tiempo disponible para evacuar o proteger a la población.

Entendimiento de la severidad de la inundación: Para incluir el conocimiento de la población de las posibles consecuencias y su estado de alerta ante una posible inundación.

En función de estos tres valores, Graham propone las tasas de mortalidad que aparecen en la tabla C.1.

C.2.1. Población en riesgo

En primer lugar se estima la población en riesgo en la inundación. En este método se define la población en riesgo como la población que se encuentra en el área inundada cuando se produce el fallo de la presa, por lo tanto, no se tienen en cuenta explícitamente los procesos de evacuación. Para ello, es importante estudiar la población que se encuentra en cada una de las afecciones definidas para la situación considerada. Para conseguir estos datos poblacionales se puede recurrir a los datos del censo y también a los estudios de población realizados por las instituciones públicas en los que se refleje las variaciones estacionales de la población. Otros datos, como el número de trabajadores en las zonas comerciales e industriales y su origen, son también importantes para estimar las variaciones diarias de población.

Severidad de la inundación	Tiempo de aviso (minutos)	Entendimiento de la severidad	Tasa para estimar víctimas (fracción de las personas expuestas)	
			Valor sugerido	Rango sugerido
Alta	Sin aviso	No aplica	0.75	0.3-1.00
	15 a 60	Vago Preciso	* Utilizar los valores de arriba aplicados al número de personas que permanecen en la zona de inundación luego de ser avisadas. No se proporciona una guía para la estimación de ese grupo de personas.	
	Más de 60	Vago Preciso		
Media	Sin aviso	No aplica	0.15	0.03-0.35
	15 a 60	Vago	0.04	0.01-0.08
		Preciso	0.02	0.005-0.04
	Más de 60	Vago	0.03	0.005-0.06
		Preciso	0.01	0.002-0.02
Baja	Sin aviso	No aplica	0.01	0-0.02
	15 a 60	Vago	0.007	0-0.015
		Preciso	0.002	0-0.004
	Más de 60	Vago	0.0003	0-0.0006
		Preciso	0.0002	0-0.0004

Tabla C.1: Tasas para estimar la pérdida de vidas resultante de una inundación [65].

C.2.2. Severidad de la inundación

El siguiente paso es definir la severidad de la inundación, que hace referencia al grado de destrucción de las edificaciones y el peligro para las personas, por lo que depende de las características de la inundación. En el método de Graham se divide la severidad en tres categorías:

Severidad alta: cuando la onda de inundación provoca una total destrucción de las edificaciones, provocando la muerte de la mayoría de las personas que se encuentran en el interior.

Severidad media: algunas edificaciones sufren daños importantes, especialmente las casas, aunque hay edificaciones y árboles que permanecen pudiendo servir como refugio.

Severidad baja: no hay edificios que sean completamente destrozados, habiendo solo daños superficiales.

Para definir el grado de severidad existen diferentes recomendaciones. Según Graham, una severidad alta solo es adecuada para zonas muy cercanas a la presa, que se vean afectadas por una gran onda de inundación muy rápidamente, en pocos minutos, con altas profundidades de inundación, siendo totalmente barrido cualquier rastro de vida humana. Por lo tanto, en la metodología de Graham no se recomiendan valores numéricos para definirla. En la literatura aparecen algunos valores para definir zonas con severidad alta, en función del producto de la velocidad y el calado, aunque están muy influenciados por los materiales de construcción de las edificaciones y su altura, es decir, por las características locales. Según las recomendaciones

de Graham, la severidad alta solo debe ser utilizada para presas de hormigón que rompen de forma instantánea, ya que para presas de materiales sueltos el desarrollo del fallo de la presa suele ser más gradual, excepto en el caso de modo de fallo por licuefacción en un evento sísmico.

Respecto a la diferenciación entre el nivel medio y el nivel bajo de severidad, Graham recomienda para una primera aproximación, que se tome severidad media a partir de 10 pies (3 metros aproximadamente). Para un mayor grado de detalle, se puede emplear el parámetro DV :

$$DV = \frac{Q_{df} - Q_m}{W_{df}}$$

donde Q_{df} es el máximo caudal causado por la inundación en la sección donde se encuentra la población, Q_m es el caudal medio anual en la misma sección y W_{df} es el ancho máximo de la inundación en la sección considerada. Como se puede observar, este parámetro es función de la velocidad del flujo y de su profundidad, por lo que es un indicador de su grado de destrucción. Valores de este parámetro mayores a $4.6 \text{ m}^2/\text{s}$ indican una severidad media.

C.2.3. Tiempo de aviso

El siguiente paso es definir el tiempo de aviso, que como se ha explicado, en el método de Graham corresponde al tiempo entre que se realiza el aviso a la población y llega la onda de inundación a la población. Por lo tanto, hace referencia al tiempo que los habitantes tendrán para refugiarse o ser evacuados, y su correcta estimación es muy importante para obtener valores correctos. El tiempo de aviso debe ser calculado para cada uno de los grupos de casas o poblaciones que se encuentren en la zona inundada, siendo diferente para cada uno de ellos. Además es importante fijar un tiempo de inicio (o cero) como referencia para medir todos los tiempos. En la figura C.1 se muestran los diferentes tiempos que se manejan en una rotura de presa.

En el método de Graham el tiempo de aviso también se divide en tres categorías:

Aviso inexistente: Cuando el tiempo de aviso es menor a 15 minutos. No hay aviso a la población, pues, no da tiempo a realizar un aviso por fuentes oficiales antes de la llegada de la inundación. La población queda advertida al ver u oír la llegada de la onda de inundación.

Aviso insuficiente: Cuando el tiempo de aviso está entre 15 y 60 minutos. En este caso se supone que se han realizado avisos oficiales antes de la llegada de la inundación. El aviso se difunde a algunas personas a través de las cadenas de comunicación, aunque no toda la población es avisada correctamente.

Aviso suficiente: Cuando el tiempo de aviso es mayor a 60 minutos. Se supone que se ha realizado un aviso adecuado a la población antes de la llegada de la onda de inundación. La mayoría de las personas en riesgo conocen que se aproxima la inundación.

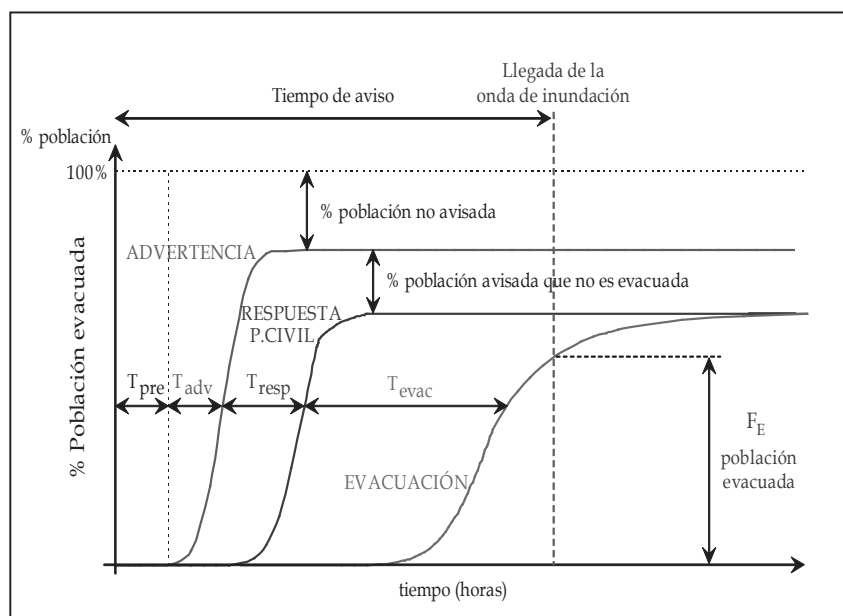


Figura C.1: Distribución de los tiempos en un proceso de evacuación para la población en riesgo de inundación (traducido de [78]).

Debido a la importancia del tiempo de aviso en las tasas de mortalidad cuando éste es insuficiente, se puede realizar una interpolación lineal en este caso entre la tasa de mortalidad sin tiempo de aviso y con tiempo de aviso suficiente, pasando por la tasa con tiempo de aviso insuficiente. De esta forma, se evitan saltos ilógicos en los resultados.

Cuando se quiere obtener una primera aproximación del tiempo de aviso, en un nivel de detalle somero, se puede utilizar el tiempo transcurrido entre el fallo de la presa y la llegada de la onda de inundación a la población, suponiendo por tanto que el aviso a la población se produce en el momento en el que la presa falla. Esta simplificación es adecuada para formas de rotura que se desarrollen rápidamente, como las que se suelen dar en presas de hormigón.

Para un estudio más detallado, lo primero es estimar el momento en el que se empieza a producir el aviso a la población en relación con el momento en el que la presa falla. Para ello debe ser tenido en cuenta el modo de fallo, ya que puede tener una influencia importante [23]. Los modos de fallo asociados a avenidas en cuencas muy grandes tardan un tiempo importante en desarrollarse, durante el cual se suelen llevar a cabo acciones de monitorización y de advertencia. En cuencas pequeñas las avenidas se desarrollan mucho más rápido, por lo que el tiempo de aviso a la población es menor. Los fallos por erosión interna permitirán en la mayoría de casos el aviso a la población con varias horas de adelanto si existe un correcto sistema de monitorización. Los modos de fallo que permitirán un menor tiempo de aviso son los asociados a eventos sísmicos, a no ser que la población esté advertida de que la presa puede fallar en un evento sísmico y empiecen la evacuación tras el terremoto sin aviso oficial.

También hay otros factores que pueden influir en el aviso, como si es de día o de noche, ya que durante el día las observaciones son más claras y en general la propagación de los avisos funciona mejor, como se ha demostrado al analizar las inundaciones por fallos de presa pasadas [65].

Para presas de materiales sueltos, Graham desarrolló la tabla C.2, que explica cómo calcular el momento en que se empieza a producir el aviso. A partir de esta tabla y conociendo como se produce la propagación de la onda de inundación gracias a la modelización hidráulica, el tiempo de aviso en cada población podrá ser estimado fácilmente al ser la diferencia entre el tiempo en el que llega la onda de inundación y el momento en el que se inicia el aviso.

Modo de fallo	Otras consideraciones	Momento de fallo	Tiempo de inicio del aviso	
			Varios observadores en la presa	No hay observadores en la presa
Sobrevertido	Área de cuenca aguas arriba menor de 260 km ²	Día	15 min antes del fallo de la presa	15 min después de que la onda de inundación llegue a una zona poblada
		Noche	15 min después del fallo de la presa	60 min después de que la onda de inundación llegue a una zona poblada
	Área de cuenca aguas arriba mayor de 260 km ²	Día	120 min antes del fallo de la presa	60 min antes del fallo de la presa
		Noche	Entre 60 y 120 min antes del fallo de la presa	Entre 0 y 60 min antes del fallo de la presa
Erosión interna		Día	60 min antes del fallo de la presa	15 min después de que la onda de inundación llegue a una zona poblada
		Noche	30 min después del fallo de la presa	60 min después de que la onda de inundación llegue a una zona poblada
Sísmico	Fallo instantáneo	Día	15 min después del fallo de la presa	15 min después de que la onda de inundación llegue a una zona poblada
		Noche	30 min después del fallo de la presa	60 min después de que la onda de inundación llegue a una zona poblada
	Fallo no instantáneo	Día	120 min antes del fallo de la presa	30 min después de que la onda de inundación llegue a una zona poblada
		Noche	120 min antes del fallo de la presa	30 min después de que la onda de inundación llegue a una zona poblada

Tabla C.2: Estimación del tiempo de inicio de los avisos ante el fallo en presas de materiales sueltos.

Por otro lado, el USBR [23] propone la siguiente fórmula para la estimación del

tiempo de aviso en todas las presas:

$$WT = T_v + b - MF$$

donde WT es el tiempo de aviso, T_v es el tiempo entre el momento de rotura de la presa y la llegada de la onda de inundación a la población estudiada, b es el tiempo de formación de la brecha en la presa y MF es el factor relativo al modo de fallo.

Además, para estimar el tiempo en el que se empieza a realizar el aviso también deben ser tenidos en cuenta los procedimientos explicados en el Plan de Emergencia de la presa. En él se describe como deben realizarse los avisos y el momento en el que empezarán a realizarse, por lo que pueden ser una herramienta muy útil para estimar el tiempo de aviso. En general, la existencia de un correcto Plan de Emergencia mejora el tiempo de aviso, así como una buena monitorización del comportamiento de la presa.

C.2.4. Entendimiento de la severidad de la inundación

La última característica de la inundación que debe definirse en el método desarrollado por Graham es el entendimiento de la severidad de la inundación, que depende enormemente del tipo de mensajes de aviso que se realicen y de cómo la población los asimile. Se definen dos categorías:

Entendimiento vago: cuando los habitantes que reciben el aviso no han visto el evento de inundación o no comprenden la magnitud de la inundación que va a suceder.

Entendimiento preciso: los habitantes entienden correctamente los mensajes de aviso y comprenden la magnitud de la inundación.

Uno de los aspectos que más afectan al entendimiento de la inundación es el tiempo transcurrido entre el fallo de la presa y la llegada de la onda de inundación, ya que cuando este tiempo es alto la población podría conocer las primeras consecuencias de la inundación en otras poblaciones a través de los medios de comunicación, por lo que entendería mejor su severidad.

Además, el tipo de mensajes de aviso también influyen en el aviso. Los mensajes claros, directos y contundentes permiten un mayor entendimiento de la severidad de la inundación.

También influye el modo de fallo, ya que para los fallos debidos a avenidas, la población lleva bastante tiempo observando las lluvias y sufriendo pequeñas inundaciones urbanas, por lo que está más alerta ante una posible inundación que en el resto de casos y por lo tanto, entiende mejor la severidad de la inundación. Además, también influye el hecho de que haya habido inundaciones importantes en el pasado, ya que la población actuará más rápidamente ante los mensajes de aviso al conocer las consecuencias.

Por otro lado, el USBR [23] recomienda tomar entendimiento preciso de la severidad siempre que hay un Plan de Emergencia implantado en la presa, ya que enton-

ces, se supone que las autoridades sabrán cómo actuar para transmitir los mensajes correctamente y, por lo tanto, la población entenderá la severidad.

C.2.5. Resultados

Cuando se conoce el tiempo de aviso, la población expuesta, la severidad de la inundación y su severidad en cada una de las viviendas o núcleos de población considerados, el número de víctimas se estima de forma directa aplicando la tabla C.1, que indica la tasa de mortalidad que se debe aplicar sobre la población en riesgo. Sumando el número de víctimas en todos los núcleos de población o grupos de viviendas se obtiene el número de víctimas provocadas por la inundación.

El método de Graham puede ser aplicado en diferentes grados de detalle, desde viviendas aisladas hasta grandes zonas para obtener aproximaciones generales del número de víctimas. El grado de detalle con el que se pueda aplicar depende enormemente de los datos de la distribución de la población disponibles.

Cuando el método de Graham proporciona valores que se encuentran entre dos categorías, como severidad media-baja o entendimiento medio, pueden utilizarse valores medios de las tasas de mortalidad de las dos categorías [134]. Con el fin de facilitar los cálculos asociados a este método, se pueden utilizar programas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), con mapas digitales que muestren la distribución de la población y se puedan cotejar de forma directa con los obtenidos a través de la modelización hidráulica. Para ello, los mapas digitales deben tener la resolución suficiente e indicar la situación de la distribución de la población en diferentes momentos del día y del año, cuando haya variaciones importantes. En la figura C.2 se muestra la estructura general del cálculo de la pérdida de vidas empleando SIG.

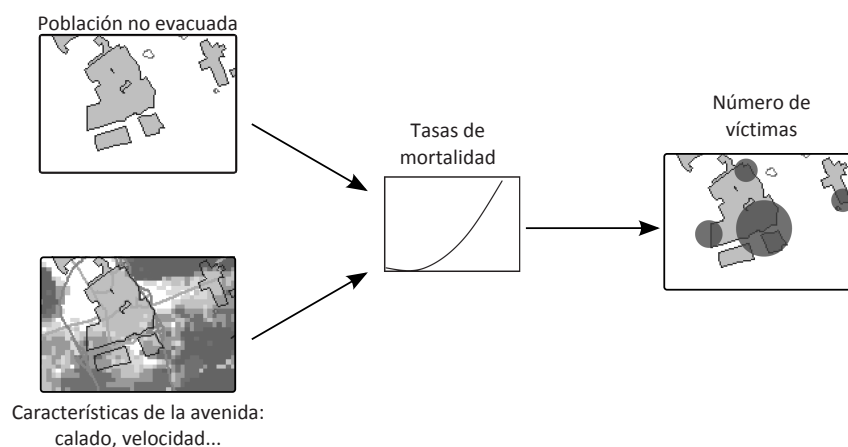


Figura C.2: Componentes básicos de cualquier modelo para la estimación de pérdida de vidas con empleo de sistemas de información geográfica (SIG) [63].

C.2.6. Discusión sobre la Metodología de Graham (1999)

Las principales ventajas de la utilización del método de Graham [66] radican en la importante base de datos de inundaciones pasadas utilizada para obtener las tasas de mortalidad y en su sencillez de aplicación y entendimiento. Además es un método fácil de modificar en caso de que las situaciones no se ajusten exactamente a lo establecido, ya que todos los parámetros introducidos tienen una clara correspondencia con la realidad. También permite diferentes grados de detalle y aproximaciones generales con pocos datos iniciales.

En cambio, también tiene desventajas como que la existencia de factores que cambian según el tipo de inundación no es tenida en cuenta o que la evacuación no se calcula como un proceso separado. El método recoge valores medios de las características de la inundación y las edificaciones en la misma población, lo que puede producir importantes errores si las variaciones son importantes, por lo que es necesario escoger unidades de población lo más pequeñas posible. Además, en el cálculo del tiempo de aviso no se tiene en cuenta las formas de propagación del aviso y su efectividad.

C.3. Otras metodologías

Existe un gran número de métodos para la estimación de la pérdida de vidas. En la bibliografía, Graham [66] analiza la muchos de los métodos explicados en este apartado, analizando su metodología general y las ventajas y desventajas de la aplicación de cada uno de ellos.

C.3.1. Modificaciones a la Metodología de Graham (1999)

En 2001, el USBR [23] propuso una modificación al método de Graham, añadiendo una nueva variable que influencia la tasa de mortalidad: el tiempo de formación de la brecha. Este tiempo se divide en tres categorías, según las características de la presa y su fallo, explicadas anteriormente para la obtención del tiempo de aviso. En cambio, elimina la parte relativa al entendimiento de la severidad. Con esta nueva variable se proponen nuevas tasas de mortalidad, basadas en las obtenidas por Graham. Aunque en este método las tasas de mortalidad son en general, más altas que en el método de Graham, por lo que su utilización puede producir una sobreestimación del número de víctimas respecto del método original.

Reiter [108] recomendó en 2001 corregir las tasas de mortalidad aplicando un factor de vulnerabilidad a la población en riesgo para tener en cuenta población muy envejecida, zonas con hospitales o un gran número de niños, ya que esta población dificultará los procesos de resguardo y evacuación, viéndose más afectada por la onda de inundación.

En 2006, el USBR [25] desarrolló un nuevo método que añade un nuevo paso al método de Graham. Con este método se aplican unas tasas de evacuación a la población en función del tiempo de aviso, momento del día, velocidad de aumento de los niveles de agua y forma de propagación de los avisos. Las tasas de mortalidad, que son distintas a las propuestas por Graham, se aplican a la población que queda en la zona inundada tras la evacuación de forma directa, teniendo únicamente en cuenta la severidad de la inundación. Por lo tanto, permite incluir la evacuación como un proceso diferenciado. Como el método de Graham, es un método robusto y sencillo de aplicar, pero tiene algunas desventajas [66], ya que la estimación de las tasas de evacuación puede producir importantes errores por la complicación de modelizar este proceso.

Por otro lado, FEMA [54] ha desarrollado también un método basado en el método de Graham. Para realizar la estimación parte del hecho de que las tasas de mortalidad son más altas cerca de la presa y aparecen cuando hay grandes picos de caudal respecto a los caudales normales en el río, siendo entonces cuando la población se ve sorprendida por la inundación. Se realiza el cálculo dividiendo el área inundada en tres zonas y se calcula la mortalidad en función de la relación entre el caudal asociado a la avenida de 10 años de periodo de retorno y el caudal máximo que se produce con el fallo de la presa. Este método es muy simple, por lo que solo se recomienda su aplicación para embalses menores de 25 hm³ [66].

ANCOLD [13] recomienda a su vez otras tasas de mortalidad diferentes a las del método de Graham para zonas de alta vulnerabilidad como residencias de ancianos, escuelas o zonas turísticas.

C.3.2. Metodología SUFRI

Recientemente el proyecto europeo SUFRI (*Sustainable Strategies of Urban Flood Risk Management with non-structural measures to cope with the residual risk*) [49, 48], dentro del marco de la iniciativa ERA-Net CRUE, ha desarrollado una herramienta que permite caracterizar el riesgo residual y estudiar cómo las medidas no estructurales ayudan a reducir las consecuencias y, por lo tanto, el riesgo de inundación. Esta herramienta se basa en el desarrollo de curvas del tipo F-N para cada entorno urbano, permitiendo caracterizar el riesgo de una forma completa y cuantitativa y aplicar recomendaciones de tolerabilidad del riesgo existentes. El proyecto incluye el desarrollo de una metodología que detalla las fases necesarias para elaborar los modelos de riesgo en caso de inundación pluvial y fluvial, así como los procedimientos de análisis y preparación de datos para alimentar dichos modelos.

En particular, el proyecto SUFRI describe en mayor detalle la fase de estimación de consecuencias por inundación. En lo referente a inundación fluvial, propone una clasificación de diez categorías para la población de estudio, atendiendo a la existencia de sistemas de alerta, coordinación entre servicios de emergencia y autoridades locales, medios de comunicación, formación a la población, etc. Cada categoría se relaciona con unas tasas de mortalidad de referencia (ver tabla C.3), dependientes

del tiempo de aviso existente y el grado de severidad de la inundación, que se basan en los estudios realizados por Graham en 1999.

La metodología SUFRI está particularmente centrada en la población afectada, esperando que actúe de forma adecuada para reducir las posibles consecuencias de la inundación. En este contexto, una comunicación efectiva del riesgo es la clave para iniciar, apoyar, mantener y difundir el conocimiento sobre los comportamientos y las medidas adecuadas en caso inundación. Por ello, el cuestionario desarrollado dentro del proyecto SUFRI, como parte de un método para analizar el grado de conocimiento del riesgo de la población afectada [144], proporciona datos empíricos de la visión subjetiva de los ciudadanos respecto a las inundaciones. En él, se presta especial atención a cómo y qué se desea comunicar antes, durante y después de una inundación [67]. De hecho, los resultados de las encuestas de opinión permiten determinar la categoría utilizada (de la 1 a 10) para estimar la pérdida de vidas según la tabla C.3.

C.3.3. Metodología de Jonkman

Un método similar al método de Graham es el método desarrollado por Jonkman [78], que estima la pérdida de vidas a partir de la población en riesgo, estimando los diferentes procesos que se producen en la inundación.

En primer lugar, se obtiene la población que finalmente queda expuesta a la inundación tras los procesos de evacuación y movimiento hacia lugares protegidos. La eficacia de la evacuación sobre la población en riesgo es función directa del tiempo disponible, teniendo en cuenta que queda una parte de la población que no llega a ser evacuada. Respecto al movimiento hacia lugares protegidos, es función del tiempo de aviso y de la población en edificios de edificios altos. Además, para estimar la población expuesta también se debe restar la población que es rescatada durante la inundación.

A partir de la población expuesta se calcula el número de víctimas mediante tasas de mortalidad que son calculadas en función de la profundidad del agua. Estas tasas provienen de funciones no lineales diferentes según la severidad de la inundación, que está dividida en tres categorías.

En general, este método depende de los mismos datos que el método de Graham, es decir, la población en riesgo, el tiempo de aviso y la severidad de la población, aunque se hace un estudio más detallado de los diferentes procesos. El problema de este método es que ha sido desarrollado para inundaciones generales y aplicado solamente para modelizar inundaciones producidas por rotura de diques en zonas situadas por debajo del nivel del agua, como las inundaciones de Nueva Orleans en 2005, por lo que aún no ha sido suficientemente testado y adaptado para la modelización de fallos en presas.

Categoría		t aviso TA (h)	Severidad (Sv)		
			Alta	Media	Baja
1	- No existe formación a la población.	0	0.9	0.3	0.02
	- No se dispone de sistemas de aviso ni PEP.	0.25	0.9	0.3	0.02
	- No hay coordinación entre servicios de emergencia y autoridades.	0.625	0.7	0.08	0.015
	- No existen medios de comunicación a la población.	1	-	0.06	0.0006
		1.5	-	0.0002	0.0002
		24	-	0.0002	0.0001
2	- No existe formación a la población.	0	0.9	0.3	0.02
	- No se dispone de PEP , aunque existen otros sistemas de aviso.	0.25	0.9	0.3	0.02
	- No hay coordinación entre servicios de emergencia y autoridades.	0.625	0.675	0.075	0.014
	- No existen medios de comunicación a la población.	1	-	0.055	0.00055
		1.5	-	0.0002	0.0002
		24	-	0.0002	0.0001
3	- No existe formación a la población.	0	0.9	0.3	0.02
	- Existe PEP, pero no se ha implantado .	0.25	0.85	0.2	0.015
	- Existe coordinación entre servicios de emergencia y autoridades (no existen protocolos).	0.625	0.6	0.07	0.012
	- No existen medios de comunicación a la población.	1	-	0.05	0.0005
		1.5	-	0.0002	0.0002
		24	-	0.0002	0.0001
4	- No existe formación a la población.	0	0.9	0.3	0.02
	- PEP implantado con sistemas de aviso correspondientes .	0.25	0.75	0.15	0.01
	- Existe coordinación entre servicios de emergencia y autoridades, protocolos de comunicación.	0.625	0.5	0.04	0.007
	- No existen medios de comunicación a la población.	1	-	0.03	0.0003
		1.5	-	0.0002	0.0002
		24	-	0.0002	0.0001
5	- No existe formación a la población.	0	0.9	0.3	0.02
	- PEP implantado con sistemas de aviso correspondientes.	0.25	0.75	0.15	0.01
	- Coordinación entre servicios de emergencia y autoridades.	0.625	0.5	0.0375	0.0065
	- Medios de comunicación a la población (sin comprobar).	1	-	0.0275	0.000275
		1.5	-	0.0002	0.0002
		24	-	0.0002	0.0001
6	- No existe formación a la población.	0	0.9	0.3	0.02
	- PEP implantado con sistemas de aviso correspondientes.	0.25	0.75	0.15	0.01
	- Coordinación entre servicios de emergencia y autoridades.	0.625	0.475	0.035	0.006
	- Medios de comunicación a la población implantados .	1	-	0.025	0.00025
		1.5	-	0.0002	0.0002
		24	-	0.0002	0.0001
7	- Formación a la población.	0	0.9	0.3	0.02
	- PEP implantado con sistemas de aviso.	0.25	0.65	0.1	0.0075
	- Coordinación entre servicios de emergencia y autoridades.	0.625	0.4	0.02	0.002
	- Medios de comunicación a la población implantados.	1	-	0.01	0.0002
	***Si se produce rotura instantánea en categorías 8, 9 y 10.	1.5	-	0.0002	0.0002
		24	-	0.0002	0.0001
8	- Formación a la población.	0	0.9	0.3	0.02
	- PEP implantado. Simulacros o PEP empleado prev.	0.25	0.55	0.06	0.006
	- Coordinación entre servicios de emergencia y autoridades.	0.625	0.35	0.01	0.0015
	- Medios de comunicación a la población implantados.	1	-	0.005	0.00015
		1.5	-	0.0002	0.00015
		24	-	0.0002	0.0001
9	- Formación a la población.	0	0.9	0.3	0.02
	- PEP implantado. Simulacros o PEP empleado prev.	0.25	0.55	0.06	0.006
	- Alta coordinación entre servicios de emergencia y autoridades.	0.625	0.35	0.008	0.0015
	- Medios de comunicación a la población implantados.	1	-	0.004	0.000125
		1.5	-	0.0002	0.0001
		24	-	0.0002	0.0001
10	- Planes de formación continua a la población.	0	0.9	0.3	0.02
	- PEP implantado. Simulacros o PEP empleado prev.	0.25	0.5	0.03	0.005
	- Alta coordinación entre servicios de emergencia y autoridades.	0.625	0.3	0.005	0.001
	- Medios de comunicación a la población implantados.	1	-	0.002	0.0001
		1.5	-	0.0002	0.0001
		24	-	0.0002	0.0001

Tabla C.3: Tasas de mortalidad para aplicar el método de Graham desarrolladas en el proyecto SUFRI [49].

C.3.4. LIFESim

Si se quiere alcanzar un nivel de análisis detallado hay otros modelos que necesitan un mayor número de datos pero los resultados se ajustan con mucho más realismo a la física y el desarrollo del proceso. Entre estos modelos destaca el LIFESim [2] [1], que permite simular el comportamiento de los habitantes ante una inundación, ofreciendo resultados a escalas mucho más pequeñas que las de los métodos anteriores (micro-escala). Para ello utiliza tres módulos diferentes:

1. Advertencia y evacuación: este módulo redistribuye la población según una curva de difusión del aviso, dependiente del momento del día, y la curva de movilización, que simula la huida según las vías de comunicación. Para ello, se utilizan datos sobre los tipos de aviso, su eficacia, el tiempo de aviso, los métodos de evacuación, la distancia hasta las zonas seguras y las características de las vías de comunicación. Además, para representar estos procesos se tienen en cuenta diversos aspectos como las características del tráfico y el bloqueo de vías de comunicación por la inundación.
2. Pérdida de guaridas: estima las consecuencias de la inundación en los edificios, por lo que depende de las características de éstos y de la inundación. Para esta estimación se requieren datos sobre las construcciones, las infraestructuras y la distribución de la población respecto a edificios suficientemente altos para actuar como posibles guaridas.
3. Pérdida de vidas: calcula las víctimas aplicando tasas de mortalidad fijas según tres categorías de severidad de la inundación. Las tasas se aplican a la población que permanece en la zona inundada y cuya guarida queda destruida. Estas tasas son fijas para cada zona y provienen de las medias obtenidas en estudios sobre inundaciones históricas [91].

Este método es especialmente adecuado para los centros de grandes ciudades, donde la capacidad de las vías de comunicación y la propagación de los avisos pueden afectar enormemente al número de víctimas. Sin embargo, requiere un gran número de datos (sobre la distribución de la población, las vías de comunicación, los sistemas de aviso, etc.) y un gran esfuerzo de modelización.

Para resolver este problema del LIFESim, ha sido desarrollado un LIFESim Simplificado [101], más adecuado para estimar la pérdida de vidas en el contexto de gestión de riesgos de infraestructuras, como en este caso, ya que no requiere una cantidad de datos tan elevada. Este método reduce considerablemente los datos necesarios de la modelización hidráulica, ya que no tiene en cuenta las velocidades del flujo para la pérdida de guarida. También simplifica los procesos de evacuación, ya que son introducidos definiendo una velocidad de movimiento durante la evacuación y suponiendo desde cada edificio que la población es evacuada en línea recta hasta la zona segura más próxima.

Aunque este método simplificado reduce considerablemente los datos necesarios para la estimación de la pérdida de vidas, sigue siendo bastante complejo en comparación con el método de Graham. Además también requiere muchos datos sobre

cada núcleo de población, por lo que puede resultar de difícil aplicación cuando la inundación afecta a un gran número de núcleos, como en el caso de grandes presas. En cualquier caso, parece una buena opción para un análisis de riesgos intermedio-detallado.

C.3.5. Metodología de BCHydro

Otro método es el desarrollado por BC Hydro y Wallingford [72, 87], denominado Life Safety Model y que utiliza datos de SIG con un modelo de flujo bidimensional y caracteriza comportamiento de la población. Para realizar este cálculo, este modelo combina:

- El comportamiento de las personas para resistir la inundación.
- El movimiento de los vehículos mediante un modelo simple de tráfico.
- La interacción hidrodinámica de los vehículos con la onda de inundación.
- La capacidad de cada edificio ante la inundación.
- El movimiento de las personas para búsqueda de refugio ante la llegada de la inundación.
- La diseminación de los avisos ante la llegada de la inundación.
- La evacuación de las personas en las zonas inundadas.

Este método realiza cálculos con un elevado grado de detalle, por lo que requiere un gran número de datos sobre la situación de la población, los edificios, las vías de comunicación.

Apéndice D

Estimación de consecuencias económicas

D.1. Estimación de daños directos

En este apartado se desarrolla la metodología necesaria para el cálculo de los daños económicos directos y tangibles provocados por la onda de inundación, incluyendo los daños a las viviendas, a la industria y el comercio, a las edificaciones, a las infraestructuras y los servicios, a la agricultura, etc.

Según Messner et al. [93], el cálculo de las consecuencias directas de la inundación se puede realizar a tres escalas diferentes:

Macro-escala: En este caso el cálculo de las consecuencias comprende varios términos municipales, siendo los datos oficiales la principal fuente de datos. En general, no se diferencian los daños entre poblaciones ni las diferencias en la distribución de las viviendas, tomando valores medios para toda el área inundada, lo que provoca inexactitudes importantes. Esta escala es adecuada para aproximar grandes inundaciones, como las producidas por la subida del nivel del mar.

Meso-escala: Como en el caso anterior, los cálculos también se realizan con datos agregados, pero a menor escala, utilizando para ello mapas de uso del suelo que discretizan el área inundada en pequeñas áreas. De esta forma, se puede diferenciar entre áreas con una gran densidad de población y áreas agrícolas. La principal fuente de información también son los datos oficiales. Esta es la escala de estudio más adecuada para el estudio de las consecuencias de inundación de una presa en un nivel de detalle somero o intermedio.

Micro-escala: Esta escala se suele utilizar para un solo núcleo urbano y en ella se considera el valor de cada edificio o infraestructura afectados por la inundación, lo que requiere una recogida de datos muy detallada del núcleo urbano. Esta escala obtiene mejores resultados pero es muy costosa para grandes áreas

como puede ser la inundación debida a una presa al comprender varios núcleos urbanos, por lo que solo se recomienda para niveles de detalle elevados.

En general, los métodos actuales para la estimación de las consecuencias directas constan de dos pasos. El primero es estimar el valor total del uso del suelo, es decir, cuales serían los costes económicos si las construcciones y cultivos que hay sobre el suelo quedaran totalmente destruidos debido a la inundación. El segundo paso consiste en aplicar a estos costes una curva calado-daños, que relaciona el calado máximo de la inundación con el grado de destrucción asociado. De esta forma, multiplicando el grado de destrucción por los costes económicos de una destrucción máxima se obtienen las consecuencias económicas de la inundación. Por lo tanto, para aplicar esta metodología se partirá de los mapas de usos del suelo y de los mapas de inundación que muestren el calado en cada punto. A continuación se desarrollan estos dos pasos de forma independiente.

D.1.1. Estimación del valor del uso del suelo

El primer paso será la estimación total del valor del uso del suelo, es decir, el coste que supondría la destrucción total de los usos que se encuentran en la zona. Este coste se divide según el uso del suelo, expresado por metro cuadrado y dependerá de las características socio-económicas de la zona. Estos costes han sido calculados para diferentes países en estudios como el realizado por el Ministerio de Construcción de Japón [99] o el realizado por Oliveri et al. [104] en Palermo.

En España, se pueden utilizar los valores recomendados por el Plan de Acción Territorial de Carácter Sectorial sobre Prevención de Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana (PATRICOVA) [35]. En este Plan se define la vulnerabilidad respecto a una inundación dada como la variable que cuantifica el valor de los daños producidos por esta inundación, por lo tanto, es una forma de cuantificar las consecuencias económicas de la inundación. En el PATRICOVA se definen valores de la vulnerabilidad de daños directos para diferentes usos con una destrucción total, denominados coeficientes de vulnerabilidad. Estos valores representan una primera estimación del valor del uso del suelo en términos adimensionales, en una escala de 0 a 100. Con una metodología similar, también existen valores del uso del suelo de referencia para Cataluña en el INUNCAT [3].

Para cada uso se definen dos valores (un valor alto y otro bajo) pudiéndose tomar un valor medio de ambos si no se dispone de datos más precisos. Esta variable se ha adimensionalizado, con un valor máximo de 100, correspondiente a los daños máximos que se producen en una zona residencial de alta densidad. Para poder transformar estos valores de la vulnerabilidad a términos económicos el PATRICOVA asigna a un valor 100 de vulnerabilidad una correspondencia 82 €/m² en el año 2002. Esta equivalencia ha sido obtenida para el caso de la Comunidad Valenciana, siendo importante ajustarla a la zona donde se realice el estudio. De esta forma, la obtención de los costes económicos a partir de la vulnerabilidad es directa, siendo solo necesario transformar la equivalencia obtenida a valor económico actual a través de indicadores económicos como el IPC.

El valor obtenido en este apartado hará referencia a los costes económicos si se produce una destrucción total del uso del suelo. Aunque esto no es lo más habitual, ya que normalmente permanecen estructuras y edificaciones tras la inundación. Por este motivo, en el siguiente apartado se explica cómo utilizar curvas calado-daños que permitan estimar el grado de destrucción producido por la inundación.

D.1.2. Curvas calado-daños

Cuando ya se conoce el valor económico de las consecuencias directas si se produjera una destrucción total de todos los usos del suelo, el siguiente paso es la estimación del grado de destrucción debido a la inundación. Para ello, la mayoría de las metodologías utilizan curvas calado-daños que relacionan la profundidad de la inundación con el grado de destrucción alcanzado. Se utiliza la profundidad porque es el rasgo de la inundación que mejor define las consecuencias que ésta produce, aunque hay otras características como el tiempo de aviso y la duración de la inundación que también pueden influir en las consecuencias.

El PATRICOVA propone una curva calado-daños para todos los usos [35]. Esta curva tiene una clara forma en S, que corresponde a la evolución normal de las consecuencias de la inundación. Hay un calado sobre los 0.8 metros a partir del cual las consecuencias de la inundación se disparan hasta llegar a un calado de 1.2 metros, a partir del cual las consecuencias crecen más lentamente. A partir de 2 metros se produce una estabilización de los daños, aumentando muy poco a poco, por lo que a partir de este valor se pueden tomar los daños constantes o suponer un aumento muy leve.

Para un mayor grado de detalle se pueden emplear curvas calado-daños distintas para cada uno de los usos del suelo, ya que por ejemplo, los daños en los cultivos tienen una distribución diferente a los daños en las viviendas. Para ello, estas curvas han sido obtenidas para los usos del suelo más importantes en diferentes zonas donde los daños de inundaciones han sido estudiados en mayor detalle. Por ejemplo en la figura D.1 aparecen las curvas obtenidas para la costa alemana para siete diferentes usos. A partir de estas curvas se podría medir el daño en las edificaciones de las zonas urbanas, en la industria, en la agricultura, en la ganadería, en las infraestructuras viarias y también en los vehículos que se encuentren dentro de la zona inundada. En general, estas curvas tienen forma de S, aunque no siempre tiene porqué ser así.

Estas curvas detalladas no han sido obtenidas de forma genérica para el caso español, aunque pueden ser estimadas de forma sencilla según las características de los usos del suelo en la zona y se pueden encontrar en la literatura algunos estudios específicos [30]. En la agricultura, por ejemplo, se pueden obtener conociendo las características de los cultivos predominantes, ya que por ejemplo los cultivos arborescentes resisten mejor la inundación que los herbáceos. En la ganadería, dependen del sector ganadero, aunque los daños son prácticamente del 100 % con profundidades mayores a 2 metros, como se muestra en la figura D.1. Respecto a la industria, depende de las características de la industria local, su maquinaria y sus edifica-

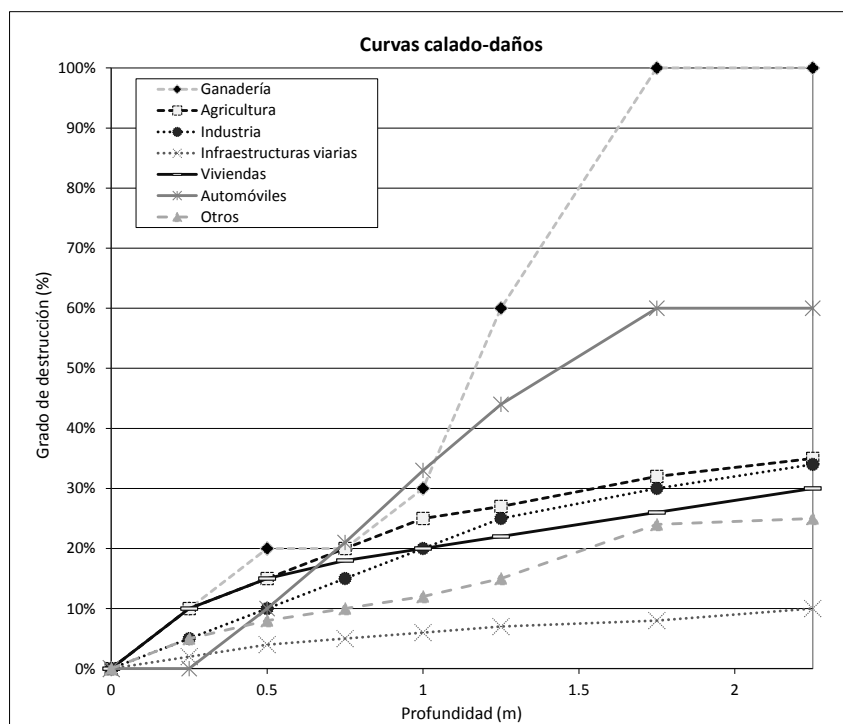


Figura D.1: Curvas calado-daños para diferentes usos del suelo en Alemania [42].

nes. Una descripción de las afecciones detallada permite definir correctamente estas curvas para cada uso.

Respecto a las viviendas, el grado de destrucción depende enormemente del tipo analizado, pues para un mismo calado no será el mismo el grado de destrucción en una casa que en un edificio. Algunos autores [90] proponen el cálculo de diferentes curvas calado-daños según el tipo de viviendas, ya que aspectos como el número de pisos o los materiales de construcción serán fundamentales para estimar el grado de destrucción. También se puede suponer que los mayores daños se dan a medida que los respectivos pisos queden inundados, produciéndose un rápido incremento del grado de destrucción. Por ejemplo, el primer piso se inunda sobre los 0.8 metros, cuando empieza a aumentar la curva calado-daños. Además, el grado de destrucción depende de los materiales de construcción, siempre es mayor en edificios de madera que en edificios de hormigón.

Las curvas en zonas urbanas también pueden ser mejoradas a través de encuestas a la población para que definan las características de sus viviendas y los efectos de anteriores inundaciones. McBean et al. [90] han desarrollado una metodología para obtener estas curvas directamente a través de los datos proporcionados por las encuestas.

Si se quiere conseguir una mayor exactitud en los resultados estas curvas pueden ser calibradas con los datos de grados de destrucción alcanzados por inundaciones pasadas, obteniendo de esta forma un mayor ajuste a la realidad de los resultados

obtenidos.

Por otro lado, para definir estas curvas pueden influir otras características de la inundación. Según McBean et al. [89], pueden también depender de:

Tiempo de aviso: Con tiempo suficiente, los habitantes tienen la posibilidad de organizar sus pertenencias trasladándolas a lugares más altos o retirarlas de las zonas afectadas. En general, el tiempo de aviso es definido como el tiempo transcurrido entre el momento que la población conoce que va a llegar una inundación (muchas veces supuesto como el momento en el que la presa rompe) y el momento en que la onda de inundación alcanza a la primera persona de la población en riesgo.

Duración de la inundación: Pues los daños se ven aumentados por el deterioro producido por el agua.

Velocidad del agua: la dinámica del movimiento del agua puede causar fallos a las estructuras si la combinación de la velocidad y la profundidad hacen que se superen las cargas que pueden soportar [124].

Finalmente, para la aplicación de las curvas calado-daños es importante tener en cuenta que es posible que se produzca un cambio en el estilo de vida de los habitantes de la zona de estudio en el período de tiempo transcurrido desde la realización de las curvas a su uso [89, 90]. Por ello, las curvas deben revisarse cada vez que se apliquen, comprobando que se siguen ajustando a las características del área afectada.

D.1.3. Resultados

Las consecuencias directas de la inundación son obtenidas multiplicando el valor del uso del suelo por el grado de destrucción alcanzado, obtenido a partir de las curvas calado-daños.

Este método puede ser implementado utilizando mapas digitales de usos del suelo y de las consecuencias de inundación, utilizando para ello programas de sistemas de información geográfica (SIG), que facilitan los cálculos y obtienen resultados más exactos. Estos programas asocian, a cada uso del suelo una curva calado-daños y un precio del uso del suelo. Al comparar el mapa de calados producidos por la inundación con el de usos del suelo y con las curvas calado-daños se obtienen los costes de inundación, como se observa en la figura D.2. Algunos casos en los que este método ha sido utilizado con programas GIS son el estudio de las consecuencias de inundación en el río Ichinomiya (Japón) [40], en China [109] y en Shihhr-Jr (Taiwan) [129].

Un ejemplo del cálculo de las consecuencias mediante sistemas SIG es el software HAZUS-HM [55] desarrollado por FEMA, que calcula las consecuencias a partir de 700 curvas calado-daño según el uso del suelo. Además permite diferentes niveles de análisis [133].

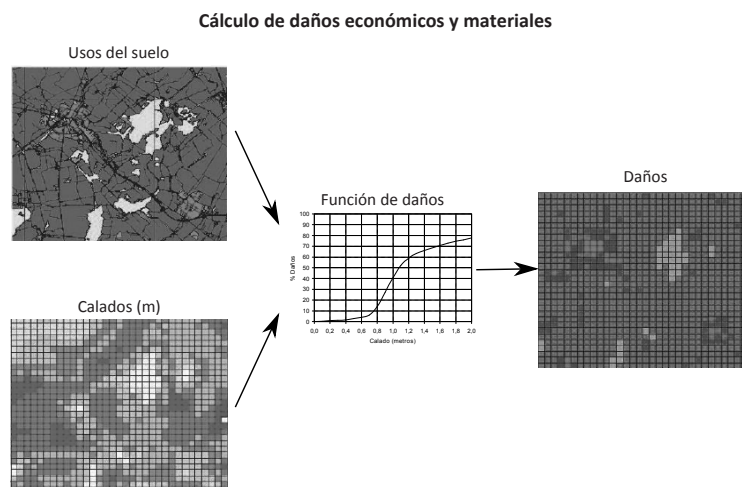


Figura D.2: Componentes básicos de cualquier modelo para la estimación de daños económicos con empleo de sistemas de información geográfica (SIG) [63].

D.2. Estimación de daños indirectos generales

Los daños indirectos comprenden las consecuencias económicas de la inundación que no son producidas directamente por la onda de inundación. Es decir, efectos que la inundación tiene sobre la zona, más allá del efecto del agua. Algunos ejemplos claros de este tipo de efectos son las consecuencias por la parada de la actividad económica en la zona y los costes de alojamiento para los habitantes cuyas viviendas sean afectadas.

La estimación de los daños indirectos es muy complicada, ya que intervienen numerosos factores y los procesos que se dan son más complejos. Especialmente es importante el factor tiempo, ya que a diferencia de las consecuencias directas, los daños indirectos aparecerían dilatados en el tiempo. En este apartado se presenta una metodología para realizar una aproximación general a la disrupción económica que provocaría una inundación en la zona sin hacer un estudio detallado por sectores económicos o causas.

En general, es evidente que si la actividad económica para temporalmente en una determinada zona se produciría una pérdida en la producción y una disminución en la oferta a los consumidores. Además, también pueden producirse otras consecuencias económicas importantes por la parada en la producción y que pueden ser enormemente severas para determinados sectores económicos que estén conectados con productos intermedios, comercio, servicios como electricidad y telecomunicaciones y relaciones entre compañías [93]. Estas consecuencias serían especialmente graves si se afecta a los procesos de producción de bienes de exportación o si los sectores económicos afectados por la inundación están altamente especializados o concentrados, ya que en este caso no hay posibilidades de cambio a otros productos nacionales.

Por otra parte, dentro de estas consecuencias también se incluyen otros costes no relacionados con la actividad económica como el coste del alojamiento para los habitantes cuyas viviendas sean afectadas o los costes de salvamento y de estructuras de protección.

En primera instancia, los costes indirectos se pueden estimar como un porcentaje fijo de los costes directos. Los valores de este porcentaje varían ampliamente según los autores y la zona en la que se aplican. James et al. [77] recomiendan tomar los daños indirectos como un 15 % de los daños directos en zonas urbanas y como un 10 % en zonas agrícolas. En cambio, el Ministerio de Construcción de Japón [99] consideró las pérdidas en actividades económicas como un 6 % de los costes directos totales.

En España, se pueden aplicar las recomendaciones del Plan de Acción Territorial sobre prevención del Riesgo de Inundación de la Comunidad Valenciana (PATRICOVA) [35], que consiste en obtener los costes indirectos aplicando un porcentaje a los costes directos que puede variar entre un 0 y un 55 %, dependiendo de la importancia relativa de los costes indirectos respecto a los costes directos.

Hay algunos casos en los que aplicar un porcentaje fijo respecto a los costes directos puede producir errores muy importantes porque la magnitud de los costes indirectos es mucho mayor que la de los costes directos. Por ejemplo, en un aeropuerto, los costes directos de la inundación de la pista de aterrizaje serían mucho menores que los costes indirectos por la paralización del tráfico aéreo. En este tipo de casos se recomienda un estudio más detallado de los daños indirectos que se producirían, estudiando lo ocurrido en casos similares para determinarlos.

Para estudios de nivel detallado, se están desarrollando algunas metodologías para estimar los costes indirectos de una inundación utilizando métodos analíticos. Un método existente es la aplicación de un modelo de “Input-Output” [133], que asumiendo los precios constantes estudia como varían los flujos económicos tras la inundación, lo que permite analizar sus consecuencias en el sistema económico. Un ejemplo es el estudio desarrollado por Bockarjova et al. [17] en Holanda.

Otro posible método es la utilización de un análisis de Equilibrio General [133], que es más complejo, pero tiene en cuenta las variaciones en los precios. En general, se supone que en cada sector se intenta realizar las modificaciones necesarias para alcanzar un nuevo equilibrio económico, por lo que se analizan las respuestas del mercado ante la inundación.

D.3. Estimación de daños debido a la destrucción de la presa

Si el fallo modelado corresponde a una rotura de la presa, se debe incluir dicho coste en el análisis. Al estimar los costes de destrucción de la presa se pueden seguir dos enfoques. Uno es suponer que la presa nunca se reconstruiría e intentar estimar los costes que acarrea la inexistencia de la presa. El otro es suponer que la presa se

reconstruiría y por lo tanto estimar los costes de reconstrucción (y si fuera necesario los costes por la inexistencia de la presa durante el periodo de reconstrucción).

Ambos costes son una estimación del mismo concepto, es decir, la rotura de la presa y no sería correcto sumarlos directamente porque se estaría contabilizando el concepto dos veces. Por lo tanto, se incluyen a continuación comentarios acerca de ambos enfoques.

D.3.1. Coste de reconstrucción de la presa

El coste de reconstrucción de la presa se suele clasificar como un coste directo aunque no es producido directamente por la onda de inundación, pero sí que es provocado por la acción (sobrevvertido, sismo, etc.) que provoca el agua. Este coste es tangible, ya que puede ser expresado en términos económicos. Los costes de reconstrucción deben ser separados del resto de consecuencias tangibles directas estimadas en el apartado D.1, debido a que es importante conocer su valor independientemente del resto de costes económicos pues sólo se aplican cuando se produzca la rotura de la presa (no son aplicables para calcular los costes sin rotura de presa y la curva caudal-consecuencias a ellos asociada).

Las investigaciones presentadas para estimar este tipo de costes están muy poco desarrolladas, ya que en general se suelen estimar a partir del proyecto original de la presa o de proyectos similares. Además, en ocasiones no se incluyen, especialmente cuando la inundación afecta a grandes áreas de población y la magnitud de los costes de reconstrucción respecto al resto de las consecuencias económicas causadas es muy baja.

Una de las metodologías desarrolladas para la estimación de estos costes es la que propone Ekstrand [41] para una primera aproximación. Consiste en una interpolación lineal del coste de reconstrucción en función del volumen del embalse. Esta interpolación presenta un R^2 de 0.47 y se muestra en la siguiente ecuación:

$$CR = 17,606 + 0,13965 \cdot KAF$$

donde CR es el coste de reconstrucción en millones de dólares (año 2000) y KAF es el volumen del embalse en miles de acres-pie.

Esta interpolación está obtenida a partir de los datos de varias presas en EEUU, por lo que es difícil su transposición al caso español. Además, el propio autor solo recomienda su utilización en el caso de que no se disponga ningún dato sobre los costes originales de la construcción de la presa.

En general, Ekstrand [41] recomienda la transposición del presupuesto total de construcción original de la presa a términos económicos actuales, usando para ello indicadores económicos como el IPC u otros índices económicos similares referentes al sector de la construcción, como los recomendados por el USBR [26], que muestra los índices de variación de precios en los proyectos de presas desde 1977 hasta la actualidad en EEUU. En presas antiguas, los errores que pueden alcanzarse con esta

solución pueden ser muy altos, ya que el nivel de vida y las condiciones constructivas pueden haber cambiado enormemente.

La recomendación para estimar los costes de reconstrucción en presas antiguas es estimar los costes de construcción de una nueva presa de características similares, utilizando para ello el juicio ingenieril y los presupuestos de otras presas similares construidas recientemente. Los resultados obtenidos se pueden comparar con la ecuación propuesta por Ekstrand.

Además, para todos los casos, el resultado debe ser ajustado según otros factores como la instalación de estaciones eléctricas, la necesidad de construcciones adicionales y otros aspectos adicionales independientes de la construcción general de la presa.

Daños debido a la inexistencia de la presa

Los costes indirectos debidos a la inexistencia de la presa hacen referencia a las pérdidas económicas que supondrá el no poder gestionar un importante volumen de agua debido a la rotura de la presa. Según Ekstrand [41], las pérdidas que la rotura de la presa provoca sobre el uso de los recursos hídricos son:

- Pérdida de beneficios agrícolas: como el agua no puede ser almacenada, no puede ser utilizada para regadío, lo que hace que muchos cultivos no puedan producirse, lo que conlleva pérdidas económicas.
- Pérdida de agua para abastecimiento: La no disponibilidad de agua puede producir una falta de producción industrial y costes económicos de las medidas necesarias para poder suplir el abastecimiento humano.
- Pérdida de uso recreacional: la pérdida del agua embalsada provoca la imposibilidad de realizar actividades recreacionales en el embalse, lo que puede provocar importantes pérdidas económicas según el número de visitantes habituales y las instalaciones disponibles.
- Pérdida de los beneficios de control de inundaciones: la disponibilidad del embalse permite la laminación de las avenidas y la disminución de las consecuencias de las inundaciones aguas abajo, por lo tanto, su destrucción puede provocar daños por inundación más adelante.
- Pérdida de producción eléctrica: si la presa dispone de una central hidroeléctrica, su destrucción provoca la pérdida de una importante producción eléctrica, que debe ser estimada, sobretodo el caso de presas con una gran producción.

Estas consecuencias sólo se producen en el caso de rotura de la presa, por lo que no deben incluirse para calcular la curva de consecuencias en el caso de no rotura. A continuación, se analizan estas consecuencias individualmente.

Daños sobre el sistema de recursos hídricos

Estos daños incluyen las consecuencias económicas sobre el sistema de recursos hídricos provocados por la insatisfacción de demandas debido a la inexistencia de la presa, es decir, las pérdidas de beneficios agrícolas y la pérdida de agua para abastecimiento. En general, estos daños son los más importantes de todos los daños provocados por la inexistencia de la presa, especialmente en zonas semi-áridas, donde la disponibilidad de agua es vital para el desarrollo humano.

Una aproximación a este resultado puede hacerse utilizando un precio ficticio de demanda del agua [133], que muestre el precio que los usuarios de cada uso del agua estarían dispuestos a pagar para disponer de agua en correctas condiciones. Este precio se multiplica por el volumen de agua medio suministrado anualmente para este uso del agua del embalse. Sumando las pérdidas para cada uso se obtienen las pérdidas anuales, que se deben multiplicar por el tiempo previsto de reconstrucción de la presa.

En España se ha desarrollado y aplicado una metodología para la estimación de estos costes [132]. Esta metodología permite obtener las consecuencias sobre los usos consuntivos del agua, es decir, sobre el uso urbano, industrial y agrícola mediante la simulación del sistema de recursos hídricos. La base conceptual de la metodología consiste en que el perjuicio económico de la insatisfacción de demandas debido al fallo o rotura de presa se define como la diferencia entre el beneficio económico percibido por cada uno de los usuarios del sistema debido al aprovechamiento del recurso sin el fallo o rotura de presa y dicho beneficio tras el fallo o rotura.

D.3.2. Otros daños debidos a la inexistencia de la presa

Además de los daños sobre el sistema de recursos hídricos, la inexistencia de la presa acarrea otros daños

Pérdida de uso recreacional. En general, la metodología para estimar este tipo de consecuencias consiste en estimar el valor que una persona media está dispuesta a pagar para realizar estas actividades [133]. Este valor es multiplicado por el número de visitantes medio que realiza cada una de las actividades en el tiempo de reconstrucción de la presa, obteniendo las consecuencias totales. Este método puede aplicarse para un elevado nivel de detalle en caso de que se quieran analizar profundamente estas consecuencias.

Pérdida de los beneficios de control de inundaciones. Una primera aproximación a estas consecuencias sería la utilización de las consecuencias económicas medias anuales que se producían en el cauce aguas abajo debido a las inundaciones antes de existir la presa. Estas consecuencias anuales deben ser multiplicadas por el tiempo de reconstrucción de la presa y pasadas a valor presente mediante índices como el IPC. En caso de querer realizar un análisis más detallado, es posible realizar nuevas modelizaciones hidráulicas suponiendo la

inexistencia de la presa, y calculando las consecuencias económicas en los casos estudiados.

Pérdida de producción eléctrica. Con el precio por unidad de producción eléctrica, se puede estimar la pérdida total de producción con la energía media generada anualmente y en el período de reconstrucción.

Bibliografía

- [1] Aboelata, Maged y David S. Bowles: *Lifesim: A tool for estimating and reducing life-loss resulting from dam and levee failures*. 2008.
- [2] Aboelata, Maged, David S. Bowles y Duane M. McClelland: *A model for estimating dam failure life loss*. En *Proceedings of the Australian Committee on Large Dams Risk Workshop*, October 2003.
- [3] Agència Catalana de l'Aigua: *INUNCAT - Pla Especial d'Emergències per Inundacions*, 2009.
- [4] Altarejos-García, L., M. L. Martínez-Chenoll, I. Escuder-Bueno y A. Serrano-Lombillo: *Assessing the impact of uncertainty on flood risk estimates with reliability analysis using 1-D and 2-D hydraulic models*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16:1895–1914, 2012.
- [5] Altarejos García, Luis: *Contribución a la estimación de la probabilidad de fallo de presas de hormigón en el análisis de riesgos*. Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, Noviembre 2009.
- [6] Altarejos-García, Luis, Ignacio Escuder-Bueno, Armando Serrano-Lombillo y Manuel Gómez de Membrillera-Ortuño: *Methodology for estimating the probability of failure by sliding in concrete gravity dams in the context of risk analysis*. *Structural safety*, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.strusafe.2012.01.00>.
- [7] Andreu, Joaquín: *Conceptos y métodos para la planificación hidrológica*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, 1993.
- [8] Ardiles, L., P. Moreno, E. Jenaro, J. Fleitz y I. Escuder: *Dam safety risk analysis, assessment and management in the Duero River Basin (Spain)*. En *Canadian Dam Association Annual Meeting*, Canadá, Octubre 2010.
- [9] Ardiles, L., P. Moreno, E. Jenaro, J. Fleitz y I. Escuder: *La gestión del riesgo en el ámbito de la seguridad de las presas de titularidad estatal de la Cuenca del Duero*. En *IX Jornadas Españolas de Presas*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Junio 2010. ISBN 978-84-92626-68-7.
- [10] Ardiles, L., D. Sanz, J. Fleitz y I. Escuder: *Hacia una gestión integral de la seguridad de las presas de la Confederación Hidrográfica del Duero*. En *II In-*

- ternational Congress on Dam Maintenance and Rehabilitation 2010*, Zaragoza, Noviembre 2010.
- [11] Ardiles, L., D. Sanz, P. Moreno, J. Fleitz y I. Escuder: *Risk assessment and management of 26 dams operated by the Duero River Authority in Spain*. En *DAM ENGINEERING. International papers of technical excellence*, volumen XXI, Abril 2011. ISSN: 0-617-00563-X.
 - [12] Ardiles López, Liana, Esther Jenaro Rabadán, Pedro Moreno Sánchez, Ignacio Escuder, Manuel G. de Membrillera, Óscar Pérez Arroyo y Armando Serrano Lombillo: *Modelo de riesgo de las presas de Camporredondo y Compuerto (río Carrión)*. En *VIII Jornadas Españolas de Presas*, Noviembre 2008.
 - [13] Australian National Committee on Large Dams Incorporated: *Guidelines on Risk Assessment*, Octubre 2003.
 - [14] Ayyub, Bilal M.: *Elicitation of expert opinions for uncertainty and risks*. CRC Press, 2001.
 - [15] Barbero Lartigau, C., X. Fernàndez Caballé, J.A. Díaz Porto y A. Almagro Morales: *Análisis de riesgos aplicado a la gestión de seguridad de la presa de Sant Ponç*. En *Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management*. Taylor & Francis Group, 2012. ISBN 978-0-415-62078-9.
 - [16] Barneich, J., D. Majors, Y. Moriwaki, R. Kulkarni y R. Davidson: *Application of reliability analysis in the environmental impact report (EIR) and design of a major dam project*. En *Proceedings of Uncertainty 1996, Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Agosto 1996.
 - [17] Bockarjova, Marija, Albert E. Steenge y Anne van der Veen: *On direct estimation of initial damage in the case of a major catastrophe: derivation of the "basic equation"*. *Disaster Prevention and Management*, 13(4):330–336, 2004.
 - [18] Bowles, D. S.: *ALARP Evaluation: Using Cost Effectiveness and Disproportionality to Justify Risk Reduction*. En *ANCOLD Bulletin 127*:89-106, Agosto 2004.
 - [19] Bowles, D. S.: *Tolerable Risk for Dams: How Safe is Safe Enough?* En *Proceedings of the 2007 USSD Annual Lecture, Philadelphia, Pennsylvania.*, Marzo 2007.
 - [20] Brunner, Gary W.: *HEC-RAS River Analysis System User's Manual*. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC), 4.1 edición, Enero 2010.
 - [21] Bureau of Reclamation: *Guidelines for defining inundated areas downstream from Bureau of Reclamation dams*. Reclamation Planning Instruction n° 82-11, 1982.
 - [22] Bureau of Reclamation: *Risk Analysis Methodology. Appendix E. Estimating Risk of Internal Erosion and Material Transport Failure Modes for Embankment Dams*. Informe técnico, U. S. Department of the Interior, 2001. Draft.

- [23] Bureau of Reclamation: *Risk Based Profiling System*. Technical Service Center, Enero 2001.
- [24] Bureau of Reclamation: *Guidelines for achieving public protection in dam safety decision making*. Informe técnico, U. S. Department of the Interior, Junio 2003.
- [25] Bureau of Reclamation: *A procedure for estimating loss of life caused by dam failure*. U.S. Department of Interior, Octubre 2006.
- [26] Bureau of Reclamation: *Construction Cost Trends*. Technical Service Center, http://www.usbr.gov/pmts/estimate/cost_trend.html, Abril 2010.
- [27] Bureau of Reclamation: *Dam Safety Public Protection Guidelines (Interim)*. Denver, Colorado, Agosto 2011.
- [28] Bureau of Reclamation, U.S. Army Corps of Engineers, University of New South Wales y URS: *Risk Analysis for Dam Safety*, capítulo A Unified Method for Estimating Probabilities of Failure of Embankment Dams by Internal Erosion and Piping. 2009. Draft.
- [29] Bureau of Reclamation in cooperation with U.S. Army Corps of Engineers: *Dam Safety Risk Analysis Best Practices Training Manual*. Denver, Colorado, version 2.2 edición, Abril 2011.
- [30] Bussi, G., E. Ortiz, F. Francés, L. Pujol, R. Gabaldón, V. Guna, V. Bellver y J.A. Sempere: *Modelación hidráulica y análisis del riesgo de inundación según las líneas guía de la Directiva Marco del Agua. El caso de la Marina Alta y la Marina Baja (Alicante)*. En *II Jornadas de Ingeniería del Agua "Modelos Numéricos en Dinámica Fluvial"*. Barcelona, Spain., 2011.
- [31] Canadian Standards Association: *Risk Analysis Requirements and Guidelines*. Número CSA Q634-M91. National Standard of Canada, Noviembre 1991.
- [32] Chauhan, Sanjay S., David S. Bowles y Loren R. Anderson: *Do current breach parameter estimation techniques provide reasonable estimates for use in breach modeling?* Informe técnico, Utah State University, 2008.
- [33] Comité Nacional Español de Grandes Presas: *Guía Técnica de Seguridad de Presas: N°3. Estudios geológico-geotécnicos y de prospección de materiales*, 1999.
- [34] Committee on dam safety: *Risk assessment in dam safety management. A reconnaissance of benefits, methods and current applications*. Bulletin 130, International Commission on Large Dams, Enero 2005.
- [35] Conselleria D'Obres Públiques Urbanisme i Transports Generalitat Valenciana: *Plan de Acció Territorial de Caràcter Sectorial sobre Prevenció de Risc de Inundació en la Comunitat Valenciana (PATRICOVA)*, 2002.
- [36] Costa, J. E.: *Floods from dam failures*. Informe técnico, U.S. Geological Survey Open-File Report, 1985.

- [37] Dam Safety Committee, International Commission on Large Dams: *Bulletin on Dam Safety Management*. Borrador, Octubre 2010.
- [38] De Cea, J.C., S. García y I. Escuder-Bueno: *Análisis de riesgos de algunas presas de titularidad estatal mediante la técnica de screening*. En IX Jornadas Españolas de Presas, Valladolid, Junio 2010.
- [39] DHI: *MIKE by DHI*. <http://mikebydhi.com>.
- [40] Dutta, Dushmanta, Srikantha Herath y Katumi Musiakke: *A mathematical model for flood loss estimation*. 2003.
- [41] Ekstrand, E. R.: *Estimating economic consequences from dam failure in the safety dams program*. U.S. Department of the Interior. Bureau of Reclamation, EC-2000-01, 2000.
- [42] Elsner, Anne, Stephan Mai, Claus Zimmermann y Volker Meyer: *Integration of flood risk in coastal hinterland management*. En *International Conference on CoastGis, Genua, Italy*, 2003.
- [43] Ericson, Clifton A.: *Fault tree analysis – a history*. En *17th International System Safety Conference*, 1999.
- [44] Escuder, I., M. G. de Membrillera, M. Meghella y A. Serrano: *Damse: a european methodology for risk based security assessment of dams*. En *Twenty-third International Congress on Large Dams*, Mayo 2009.
- [45] Escuder, I., R. Landín, A. Gil, E. Rojo y J.C. Elipe: *Análisis de riesgo aplicado a la gestión de la seguridad de una presa piloto*. En IX Jornadas Españolas de Presas, Valladolid, Junio 2010.
- [46] Escuder, I., M. G. de Membrillera, P. Moreno, O. Pérez, L. Ardiles y E. Jenaro: *Desarrollo de un programa complementario de seguridad basado en análisis de riesgos para las presas de la Confederación Hidrográfica del Duero*. En V Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente, Sevilla, Noviembre 2007.
- [47] Escuder, I., M. G. de Membrillera, P. Moreno, O. Pérez, L. Ardiles y E. Jenaro: *First risk-based screening on a Spanish portfolio of 20 dams owned by the Duero River Authority*. En *Hydrovision*, Sacramento (USA), Julio 2008.
- [48] Escuder-Bueno, I., J. T. Castillo-Rodríguez, S. Zechner, C. Jöbstl, S. Perales-Momparler y G. Petaccia: *A quantitative flood risk analysis methodology for urban areas with integration of social research data*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012. doi : 10.5194/nhess-12-2843-2012.
- [49] Escuder-Bueno, I., J.T. Castillo-Rodríguez, S. Perales-Momparler y A Morales-Torres: *SUFRI Methodology for flood risk evaluation in urban areas. Decision guidance for decision maker*, Septiembre 2011. SUFRI project. WP3.
- [50] Escuder-Bueno, I., A. Serrano-Lombillo, J. Fluixá-Sanmartín y A. Morales-Torres: *Evaluación de la seguridad hidrológica de presas mediante modelos de riesgo simplificados*. En *3IWRDD-FORUM*, Valencia, Octubre 2011.

- [51] Escuder-Bueno, Ignacio y Liana Ardiles: *Role of dams as critical infrastructures to protect citizens from flooding and climate change*. En ICOLD, 2012.
- [52] Escuder-Bueno, Ignacio, Enrique Matheu, Liana Ardiles, Massimo Meghella y Jesica T Castillo-Rodríguez: *Building a common framework for integrating dam safety and security management in the context of risk analysis*. En ASDSO, 2012.
- [53] Evans, Andrew W. y Verlander: *What is wrong with criterion FN-Lines for judging the tolerability of risk?* Risk Analysis, 17(2):157–168, 1997.
- [54] Federal Emergency Management Agency: *Prioritization of dams through risk categorization*. URS, 2006.
- [55] Federal Emergency Management Agency: *HAZUS. FEMA's Methodology for Estimating Potential Losses from Disasters*. United States Department of Homeland Security, <http://www.fema.gov/plan/prevent/hazus>, Mayo 2010.
- [56] Federal Energy Regulatory Commission: *Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects*, capítulo Dam Safety Performance Monitoring Program. Julio 2005.
- [57] Fell, Robin, Chi Fai Wan y Mark Foster: *Methods for estimating the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping - piping through the embankment*. The University of New South Wales, 5, ISBN 85841-395-7.
- [58] Formal Software Construction Ltd.: *OpenFTA*. <http://www.openfta.com>.
- [59] Froehlich, D. C.: *Embankment dam breach parameters revisited*. Proceedings of the 1995 ASCE Conference on Water Resources Engineering, San Antonio, Texas, 1995:887–891, 1995.
- [60] G. de Membrillera Ortuño, Manuel: *Contribución a la aplicación del análisis y declaración de riesgos en presas españolas, incluyendo priorización de inversiones*. Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, Septiembre 2007.
- [61] García Kabbabe, Luis, Luis Chaparro Carrasquel, Ignacio Escuder Bueno y Armando Serrano Lombillo: *Metodología para estructurar modos de fallo en sistemas presa-embalse*. En IX Jornadas Españolas de Presas, Junio 2010.
- [62] García-Wolfrum, S. y J. Gutiérrez: *Análisis de riesgo como elemento adicional a las revisiones de seguridad*. En *Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management*. Taylor & Francis Group, 2012. ISBN 978-0-415-62078-9.
- [63] Gelder, P.H.A.J.M. van y J.K. Vrijling: *Reliability based design of flood defenses and river dikes*. Informe técnico, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, 2003.
- [64] González Corral, M.: *Análisis de riesgos mediante la técnica de screening de presas y balsas de regadío en Catilla y León*. Tesis de Licenciatura, Máster en Explotación y Seguridad de Presas y Balsas, Julio 2011.

- [65] Graham, Wayne J.: *A procedure for estimating loss of life caused by dam failure*. U.S. Department of Interior. Bureau of Reclamation, DSO-99-06, 1999.
- [66] Graham, Wayne J.: *A comparison of methods for estimating loss of life from dam failure*. En *29th USSD Annual Meeting and Conference on Managing our Water Retention Systems*, páginas 1145–1165, Abril 2009.
- [67] Grossmann, G. y T. Seiser: *Survey about risk awareness, SUFRI project, Final Report (unpublished report)*, 2011.
- [68] Hartford, Desmond N. D. y Gregory B. Baecher: *Risk and uncertainty in dam safety*. Thomas Telford Limited, 2004.
- [69] Health y Safety Executive: *Reducing risks, protecting people - HSE's decision-making process*. Health and Safety Executive, 2001, ISBN 0-7176-2151-0.
- [70] Heras, Rafael: *Hidrología y recursos hidráulicos*. Centro de Estudios Hidrográficos, Dirección General de Obras Hidráulicas, Madrid, 1976.
- [71] Hill, P.I., D.S. Bowles, P. Jordan y R.J. Nathan: *Estimating overall risk of dam failure: Practical considerations in combining failure probabilities*. En *ANCOLD Bulletin 127*, páginas 63–72, Agosto 2004.
- [72] Hydro, BC: *Bc Hydro Life Safety Model System V1.0, Guidelines, Procedures Calibration and Support Manual*, engineering report e310 edición, Agosto 2006.
- [73] International Commission of Large Dams: *Dam-break flood analysis*, volumen Bulletin 111. 1998.
- [74] International Electrotechnical Commission: *Analysis techniques for system reliability - Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA)*. Número Reference number: IEC 60812:2006(E). International Standard, 2006.
- [75] iPresas: *Manual de usuario de iPresas Calc*. <http://www.ipresas.com>, 2012.
- [76] iPresas: *Manual de usuario de iPresas Manager*. <http://www.ipresas.com>, 2012.
- [77] James, L. y R. Lee: *Economics of Water Resources Planning*. Water Ressources and Environmental Engineering. McGraw-Hill, 1971.
- [78] Jonkman, Sebastiaan Nicolaas: *Loss of life estimation in flood risk assessment. Theory and applications*. Tesis de Doctorado, Civil Engineering Faculty, Technical University of Delft, 2007.
- [79] Jonkman, S.N. y J.K. Vrijling: *Loss of life due to floods*. Flood Risk Maangement, 1:43–56, 2008.
- [80] Kaplan, Stan: *The words of risk analysis*. Risk Analysis, 17(4):407–417, 1997.
- [81] Kirkpatrick, G. W.: *Evaluation guidelines for spillways adequacy*. En *The evaluation of dam safety, Engineering Foundation Conference, Pacific Grove, California, ASCE*, 1977.

- [82] Kirpichevsky, Yev, Enrique E. Matheu y Yazmin Seda-Sanabria: *Modeling adaptive threats: incorporating a terrorist decision model into security risk assessments*. En *USSD Annual Meeting*, New Orleans, 2012.
- [83] Klipsch, Joan D. y Marilyn B. Hurst: *HEC-ResSim Reservoir System Simulation User's Manual*. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC), 3.0 edición, Abril 2007.
- [84] Lewin, Jack, Geoffrey Ballard y David S. Bowles: *Spillway gate reliability in the context of overall dam failure risk*. En *USSD Annual Lecture*, Charleston, South Carolina, Abril 2003.
- [85] Lichtenstein, S. y J. R. Newman: *Empirical scaling of common verbal phrases associated with numerical probabilities*. *Psychonomic Science*, páginas 563–564, 1967.
- [86] Long, Allen: *Recommended Fault Tree Software and Vendors*. <http://www.fault-tree.net/software.html>.
- [87] Lumbroso, D.M., D. Sakamoto, W. Johnstone, A. Tagg y B.L. Lance: *The development of a Life Safety Model to estimate the risk posed to people by dam failures and floods*. HR Wallingford, 2011.
- [88] MacDonald, T.C. y J. Langridge-Monopolis: *Breaching characteristics of dam failures*. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 110-5:567–586, 1984.
- [89] Mc Bean, E. A., M. Fortin, J. Ding y R. Moulton: *Adjustment factors for flood damage curves. water resources planning and management*. ASCE, 114(6):625–634, 1988.
- [90] Mc Bean, Edward A., Micahel Fortin, John Ding, Ralph Moulton, Jack Gorrie y ASCE: *Flood depth-damage curves by interview survey*. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114(6), Noviembre 1988.
- [91] McClelland, D.M. y D.S. Bowles: *Estimating Life Loss for Dam Safety Risk Assessment - a Review and New Approach*. Institute for Water Resources, U.S. Army Corps of Engineers (USACE), Alexandria, VA, 2002.
- [92] Melchers, Robert E.: *Structural reliability analysis and prediction*. Wiley, 1999.
- [93] Messner, Frank y Volker Meyer: *Flood damage, vulnerability and risk perception - challenges for flood damage research*. *Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures*, páginas 149–167, 2006.
- [94] Millas, Jaime: *La riada, agravada por la rotura de la presa de Tous, provoca grandes pérdidas en la agricultura, viviendas y redes viarias*. *El País*, Octubre 1982.
- [95] Ministerio de Fomento: *Norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación (NCSE-02)*. REAL DECRETO 997/2002, Septiembre 2002.
- [96] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino: *Guía Técnica para la elaboración de los planes de emergencia de presas*. Secretaria de Estado

- de Aguas y Costas. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Subdirección General de Gestión del Dominio Público Hidráulico, Junio 2001.
- [97] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino: *Evaluación de la seguridad hidrológica de presas (suficiencia de aliviaderos) basada en riesgo. Expediente 106/RN08/02.1*, 2011.
- [98] Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente: *Norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación (NCSE-94)*. REAL DECRETO 2543/1994, Diciembre 1994.
- [99] Ministry of Construction of Japan: *Outline of River Improvement Economic Research Investigation*. River Planning Section. River Department, 1996.
- [100] Munger, Dale F., David S. Bowles, Douglas D. Boyer, Darryl W. Davis, David A. Margo, David A. Moser, Patrick J. Regan y Nathan Snorteland: *Interim tolerable risk guidelines for US Army Corps of Engineers dams*. En *USSD Workshop on the future of dam safety decision making: combining standards and risk*, Abril 2009.
- [101] Needham, Jason T., Yazmin Seda-Sanabria y David S. Bowles: *Consequences estimation for critical infrastructures risk management*. 2009.
- [102] NSW Dams Safety Committee: *Risk Management Policy Framework For Dam Safety*. Informe técnico, New South Wales Government, Agosto 2006.
- [103] Nuclear Regulatory Commission: *Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: guidance on uncertainty and expert use*, 1997.
- [104] Oliveri, E. y M. Santoro: *Estimation of urban structural flood damages: the case study of Palermo*. *Urban Water*, 2:223–234, 2000.
- [105] Pérez-Arroyo, Ó., D. Sanz-Jiménez y I. Escuder-Bueno: *Priorización de inversiones en el marco del desarrollo de un programa de seguridad complementario basado en riesgo para las presas de la Confederación Hidrográfica del Duero*. En *VI Congreso Nacional de Ingeniería Civil*, Febrero 2012.
- [106] Quality Associates International: *Failure Mode and Effects Analysis*. <http://www.quality-one.com/services/fmea.php>.
- [107] Reagan, Robert, Frederick Mosteller y Cleo Youtz: *Quantitative meanings of verbal probability expressions*. *Journal of applied psychology*, 74(3):433, 1989.
- [108] Reiter, Peter: *RESCDAM loss of life caused by dam failure, the RESCDAM LOL method and its application to Kyrkosjarvi dam in Seinajoki*. Water Consulting Ltd., 2001.
- [109] Renyi, L. y L. Nan: *Flood area and damage estimation in Zhejiang, China*. *Journal of Environmental Management*, 66:1–8, 2002.

- [110] Rowe, Gene y George Wright: *The delphi technique as a forecasting tool: issues and analysis*. International Journal of Forecasting, 15(4):353–375, 1999.
- [111] Sanz, D., J.C. Bernabé y I. Escuder: *Confección de un modelo de riesgo para la presa de Castrovido*. En IX Jornadas Españolas de Presas, Valladolid, Junio 2010.
- [112] Sanz-Jiménez, D, I. Escuder-Bueno y F. Silva-Tulla: *Lecciones aprendidas a partir del análisis del riesgo cuantitativo de una presa en construcción*. En Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management. Taylor & Francis Group, 2012. ISBN 978-0-415-62078-9.
- [113] Sanz-Jiménez, D., I. Escuder-Bueno y F. Silva-Tulla: *Quantitative risk analysis for a dam under construction in Spain*. En USSD Annual Meeting, New Orleans, Abril 2012.
- [114] Sanz-Jiménez, D, P.J. Moreno-Sánchez, J.C. Bernabé-de la Iglesia, N.E. Bueso-Suárez, Ó Pérez-Arroyo y Serrano-L: *Programa de seguridad basado en el riesgo en la C.H. del Duero*. En Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management. Taylor & Francis Group, 2012. ISBN 978-0-415-62078-9.
- [115] Scharffenberg, William A. y Matthew J. Fleming: *Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual*. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC), 3.5 edición, Agosto 2010.
- [116] Seda-Sanabria, Y., E. Matheu y M.A. Fainberg: *Security risk assessment of dams and navigation locks*. En Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management. Taylor & Francis Group, 2012. ISBN 978-0-415-62078-9.
- [117] Serrano, Armando, Ignacio Escuder, Manuel G. de Membrillera y Luis Altarejos: *iPresas: Software for risk analysis*. En Twenty-third International Congress on Large Dams, Brasilia, Mayo 2009.
- [118] Serrano Lombillo, A., I. Escuder Bueno, M. Gómez de Membrillera Ortuño y L. Altarejos García: *Modelos de riesgo para la ayuda a la toma de decisiones en gestión de seguridad de presas*. En IX Jornadas Españolas de Presas, Valladolid, Junio 2010.
- [119] Serrano-Lombillo, Armando: *Desarrollo de una herramienta completa de análisis y evaluación de riesgos en seguridad de presas*. Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, Marzo 2011.
- [120] Serrano-Lombillo, Armando, Ignacio Escuder-Bueno y Luis Altarejos-García: *Use of risk models for evaluation of risk reduction measures*. En Twenty-fourth International Congress on Large Dams, Kyoto, Junio 2012.
- [121] Serrano-Lombillo, Armando, Ignacio Escuder-Bueno, Manuel G. de Membrillera-Ortuño y Luis Altarejos-García: *Methodology for the Calculation of Annualized Incremental Risks in Systems of Dams*. Risk Analysis, 2010,

- ISSN 1539-6924. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1539-6924.2010.01547.x>.
- [122] Silva, Francisco, T. William Lambe y W. Allen Marr: *Probability and risk of slope failure*. Diciembre 2008.
 - [123] Singh, K. P. y A. Snorrason: *Sensitivity of outflow peaks and flood stages to the selection of dam breach parameters and simulation models*. Journal of hydrology, 68:295–310, 1984.
 - [124] Smith, D.I.: *Flood damage estimation - a review of urban stage-damage curves and loss functions*. Water SA, 20(3), Julio 1994.
 - [125] Soil Conservation Service: *Simplified dam-breach routing procedure*. Water Resources Publications, 1985.
 - [126] Solera, A., J. Paredes y J. Andreu: *AQUATOLDMA SSD para Planificación de Cuencas*. Valencia, 2007.
 - [127] Stamatelatos, Michael, William Vesely, Joanne Dugan, Joseph Fragola, Joseph Minarick y Jan Railsback: *Fault tree handbook with aerospace applications*. NASA Office of Safety and Mission Assurance, Agosto 2002.
 - [128] Stewart, M.G. y R.E. Melchers: *Probabilistic Risk Assessment for Engineering Systems*. Chapman & Hall, 1997.
 - [129] Su, M.D., J. L. Kang, L. F. Chang y A. S. Chen: *A grid-based GIS approach to regional flood damage assessment*. Journal of Marine Science and Technology, 13 (3):184–192, 2005.
 - [130] Surowiecki, James: *The wisdom of the crowds*. Doubleday, 2004, ISBN 978-0385503860.
 - [131] Swain, R. E., D. Bowles y D. Ostenaar: *A framework for characterization of extreme floods for dam safety risk assessments*. Proceedings of the 1998 USCOLD Annual Lecture, Buffalo, New York, 1998.
 - [132] Triana Moreno, Jorge Eduardo: *Contribución a la estimación de consecuencias de fallo y rotura de presas en el contexto del análisis de riesgos*. Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, Noviembre 2006.
 - [133] United States Department of Homeland Security: *Dams Sector. Estimating economic consequences for dam failure scenarios*, draft edición, Abril 2010.
 - [134] United States Department of Homeland Security: *Dams Sector. Estimating Loss of Life for Dam Failure Scenarios*, draft edición, Abril 2010.
 - [135] USBR: *Dam Safety Risk Analysis. Best Practices Training Manual*. United States Bureau of Reclamation in cooperation with U.S. Army Corps of Engineers, 2011.
 - [136] Vesely, W. E., F. F. Goldberg, N. H. Roberts y D. F. Haas: *Fault tree handbook*. Systems and Reliability Research Office of Nuclear Regulatory Commission, Enero 1981.

- [137] Viljoen, M. F., L. A. du Plessis y H. J. Booysen: *Extending flood damage assessment methodology to include sociological and environmental dimensions*. Water SA, 27(4):517–522, Octubre 2001.
- [138] Villemeur, Alain: *Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment*. John Wiley & Sons Inc, Diciembre 1991. ISBN: 978-0-471-93048-8.
- [139] Vrijling, J.K. y P.H.A.J.M. van Gelder: *A framework for risk evaluation*. Journal of Hazardous Materials, 43:245–261, 1995.
- [140] Wahl, Tony L.: *Prediction of embankment dam breach parameters - A literature review and needs assessment*. Informe técnico, Dam Safety Office - U.S. Bureau of Reclamation, 1998.
- [141] Wahl, Tony L.: *Uncertainty of predictions of embankment dam breach parameters*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, May 2004:389–397, 2004.
- [142] Walder, J.S. y J. E. O'Connor: *Methods for predicting peak discharge of floods caused by failure of natural and constructed earth dams*. Informe técnico, Water Resources Research, 1997.
- [143] Yevjevich, Vujica: *Probability and statistics in hydrology*. Water Resources Publication, 1997.
- [144] Zechner, S., C. Jöbstl y H. Knoblauch: *SUFRI Methodology for investigation of risk awareness of the population concerned, SUFRI project, WP4, Final Report*, 2011.